

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет»

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи



КАКАУРОВ Сергей Владимирович

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

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Суворов И.Ф.

Чита, Томск – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ ВОДЫ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫМИ СПОСОБАМИ.....	10
1.1 Обеззараживание воды тлеющим разрядом	11
1.2 Обеззараживание воды барьерным разрядом	15
1.3 Обеззараживание импульсным коронным и частичным разрядами	20
1.4 Обеззараживание искровым и дуговым разрядами	26
1.5 Обеззараживание диафрагменным разрядом.....	29
1.6 Выводы и задачи исследования.....	35
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ	36
2.1 Высоковольтный импульсный источник питания.....	36
2.2 Реактор ДЭР.....	46
2.3 Измерение тока и напряжения.....	48
2.4 Методики проведения лабораторных исследований.....	50
3 СРАВНЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЭР И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК.....	52
3.1 Сравнение реакторов ДЭР	52
3.2 Сравнение источников питания ДЭР	55
3.3 Вольт-амперная характеристика ДЭР	57
3.4 Исследование потребляемой мощности ДЭР в зависимости от температуры обрабатываемой жидкости.....	60
4 ОБРАЗОВАНИЕ ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА ОТ ДЭР	62
4.1 Образование перекиси водорода в зависимости амплитуды импульсного напряжения	62
4.2 Образование перекиси водорода в зависимости от длительности импульсов напряжения	63
4.3 Образование перекиси водорода в зависимости от проводимости модельного раствора.....	64
4.4 Влияние геометрических параметров реактора ДЭР на процесс	

обеззараживания	67
5 ОБРАЗОВАНИЕ ИОНОВ МЕДИ И СЕРЕБРА ОТ ДЭР.....	69
5.1 Образование ионов меди и серебра в зависимости от амплитуды импульсного напряжения	69
5.2 Образование ионов меди и серебра в зависимости от длительности импульсов напряжения	71
5.3 Влияние проводимости модельного раствора на выход ионов меди и серебра.....	72
5.4 Влияние водородного показателя модельного раствора на образование ионов меди и серебра.....	74
6 ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ ДЭР.....	76
6.1 Зависимость выхода бактерицидных агентов от расхода электроэнергии ..	76
6.2 Влияние расхода модельного раствора на образование бактерицидных агентов	77
6.3 Зависимости отмираний бактерий от концентраций ионов металлов при обработке модельного раствора ДЭР.....	79
6.4 Разработка алгоритма управления системой обеззараживания воды плавательных бассейнов	81
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ	84
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	87
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	88
ПРИЛОЖЕНИЕ №1	110

ВВЕДЕНИЕ

Проблема и актуальность. Наличие чистой и обеззараженной воды является проблемой, которой сопутствует постоянный рост населения планеты. Согласно третьему докладу ООН о водных ресурсах мира, 1,1 миллиард человек нуждается в очищенной и стерилизованной воде. По оценкам агентства «Охраны окружающей среды и управления водных ресурсов» США почти 35% смертей в развивающихся странах связано с неэкологичной водой. 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.

Существует множество способов дезинфекции воды, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками. Самыми известными и распространенными являются хлорирование и ультрафиолетовое излучение (УИ), завоевавшие рынок обеззараживающих технологий. Первый способ характеризуется длительным эффектом последствия и сравнительно невысокими затратами. Основным негативным последствием хлорирования является образование в обрабатываемой воде побочных хлорсодержащих веществ, обладающих мутагенностью, канцерогенностью и высокой токсичностью. Кроме того, хлорирование не обеспечивает стерилизацию спорообразующих микроорганизмов и большинства вирусов. Обеззараживание ультрафиолетовыми лучами требует определенные нормы к качеству воды, и после обработки УИ необходимо хлорирование, так как этот способ не обладает эффектом последствия.

Среди множества способов дезинфекции особую нишу занимают электроразрядные технологии, которые в большинстве случаев являются безреагентными и автоматизированными. К таким технологиям относится и способ стерилизации воды диафрагменным электрическим разрядом (ДЭР), который имеет низкие капитальные затраты, является безреагентным, а при

реконструкции существующей технологии обеззараживания не требует дополнительных капитальных затрат на схему обработки воды. 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.

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

Во второй половине прошлого столетия в нашей стране начались проводиться исследования способа обеззараживания и доочистки воды с помощью ДЭР. 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^- . Доказана высокая эффективность этого электроразрядного метода в процессах доочистки и стерилизации воды. Настоящая работа направлена на увеличение эффективности обработки воды, ресурсосбережения, снижение электропотребления и улучшение эксплуатационных характеристик оборудования системы дезинфекции ДЭР.

Степень разработанности темы обеззараживания воды электрическими разрядами относительно высокая, но малое количество работ посвящено дезинфекции воды ДЭР. Недостаточно изучены сама 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.

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

Идея исследования заключается в применении импульсных электрических разрядов для образования перекиси водорода, ионов серебра и меди в реакторе с горизонтальным протоком воды относительно диафрагменной мембраны и подборе оптимальных параметров источника питания и реактора ДЭР.

Для достижения цели потребовалось решить ряд задач:

1. Провести анализ литературных данных о технологиях стерилизации воды электроразрядными способами.
2. Создать ВИИП, позволяющий снизить расход электроэнергии и повысить эффективность обеззараживания.
3. Создать новый реактор ДЭР для уменьшения эксплуатационных затрат и потребления электроэнергии.
4. Установить важнейшие факторы, которые оказывают наибольшее влияние на эффективность ДЭР.
5. Определить оптимальные рабочие параметры установки дезинфекции ДЭР для выхода бактерицидных агентов с минимальным электропотреблением.

Научная новизна заключается в том, что:

1. Впервые установлены зависимости выхода перекиси водорода, ионов меди и серебра в модельных растворах от амплитуды подводимого в зону ДЭР

импульсного напряжения и длительности импульсов, 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 имеет более высокий выход обеззараживающих продуктов в сравнении с реактором с протоком воды через отверстия в диафрагменной мембране (патент РФ №137284 U1 от 19. 06. 2013).

4. Разработан алгоритм управления ВИИП как основа технологии обеззараживания воды.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что:

1. Разработан ВИИП (патент РФ №151949 от 21.11.2013).

2. Разработан реактор ДЭР (патент РФ №137284 U1 от 19. 06. 2013).

3. Применение нового реактора ДЭР с серебряными и медными электродами совместно с ВИИП повышает обеззараживающую эффективность всей технологии более чем в 2 раза в сравнении с реактором ДЭР с протоком воды через отверстия в диафрагменной мембране с медными электродами, питающегося от источника переменного синусоидального напряжения.

4. Разработанный реактор ДЭР улучшает эксплуатационные характеристики обеззараживающей технологии (снижаются рабочие токи и напряжения, что увеличивает срок службы диафрагменной мембраны) (патент РФ №137284 U1 от 19. 06. 2013).

5. Разработаны рекомендации 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 лично участвовал в планировании и проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации полученных данных, формулировании выводов, а также подготовке к публикации докладов и статей.

Достоверность теоретических положений подтверждена патентной чистотой разработанных технических решений. Для решения поставленных задач были 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.

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*.

Апробация работы. Материалы работы докладывались на XI–ой и XII–ой Международной научно-практической конференции «Кулагинские чтения» (Чита, 2011, 2012 г.), XVII–ой Международной научно–практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» СТТ– 2011 (Томск, 2011 г.), II–ой Международной научно-практической конференции «Чистая капля воды» (Чита, 2012 г.), Всероссийской ежегодной научно-практической конференции «Общество, наука, инновации» (НПК-2013) (Киров, 2013 г.), XI–ой Международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применение» (Томск, 2013 г.), Международной научной конференции «Современные технологии и развитие политехнического образования» (Владивосток, 2015 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в материалах XXIII–ой Российской молодежной научной конференции «Проблемы теоретической и экспериментальной химии» (Екатеринбург, 2013 г.), в выпусках периодического журнала «Электробезопасность» (Челябинск, 2012 и 2014 г.). По результатам выполненных исследований и разработок, связанных с темой диссертационной работы, опубликовано 17 научных работ, в том числе 2 патента РФ, 7 статей в рецензируемых изданиях перечня ВАК РФ, две из которых входит в перечень реферативной базы SCOPUS, 8 публикаций в материалах научно-технических конференций, журналов.

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

1 ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ ВОДЫ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫМИ СПОСОБАМИ

Интерес к обеззараживанию воды электрическими разрядами непрерывно растет. Большое количество работ посвящено обеззараживанию воды барьерным, тлеющим, коронным, искровым, дуговым и другими разрядами и их разновидностями. Главное преимущество дезинфекции воды низкотемпературной плазмой заключается в экологичности способа, так как в большинстве случаев не добавляются в воду изготовленные химические реагенты. В плазме разряда образуются бактерицидные агенты, стерилизующие обрабатываемые жидкости, но все они имеют ограниченный период разложения, и через небольшой промежуток времени после образования растворяются в жидкостях. Бактерицидные агенты низкотемпературной плазмы не образуют побочных канцерогенных и мутагенных соединений [59,60]. Не требуется также их транспортировка, потому что они образуются в месте разрядов.

Наиболее распространенным способом стерилизации воды является хлорирование. Он завоевал рынок обеззараживающих технологий своей простотой, низкими эксплуатационными затратами и отсутствием необходимости дорогостоящего оборудования. Но в результате стерилизации химическими соединениями на основе хлора образуются побочные канцерогенные и мутагенные соединения. Исследования ученых доказали, что при регулярном проникновении в организм соединений хлора увеличивается вероятность возникновения рака мочевого пузыря и прямой кишки, повышается риск выкидыша у беременных женщин и задержки внутриутробного развития плода, рождения младенцев с врожденными пороками, также производные хлора негативно влияют на мозг, глаза [142-146]. Хлор и его соединения ухудшают органолептические свойства воды [147].

Существует множество других способов обеззараживания воды. С древних времен использовались термические способы дезинфекции питьевой воды, распространены в настоящее время химические способы с применением окислителей. Более 5000 лет назад при строительстве храмов в Древнем Египте

использовались медные трубы для стерилизации воды, вызывающие пролонгированный олигодинамический эффект в отношении бактерий [148]. Благодаря развитию науки и промышленности сегодня используются способы обеззараживания с помощью радиоактивного излучения, ультрафиолетовых лучей, ультразвука, магнитных полей, микрофльтрации и т.п. Распространенность применения этих способов зависит от стоимости технологий, их эксплуатационных затрат, экологичности и технологической простоты.

Практическое применение электрических разрядов для обеззараживания воды появилось относительно недавно. Эти технологии в большинстве случаев сложны по своей структуре, их эксплуатационные затраты на обеззараживание сравнимы с химическими способами стерилизации, но они являются более экологичными [60]. Электроразрядная дезинфекция не так распространена, как например, хлорирование, и скорее всего, не будет применяться повсеместно [114]. Совершенствование этих методов обработки воды не останавливается, каждый способ обладает своими преимуществами и недостатками, рассмотрим их подробнее.

1.1 Обеззараживание воды тлеющим разрядом

Применение тлеющего разряда для обеззараживания воды, твердых поверхностей достаточно широко изучено большим количеством авторов и проводятся множество исследований в России и за рубежом. Этот вид разряда имеет большую перспективу для применения в промышленности, медицине, пищевой отрасли и в других областях народного хозяйства [34]. Наибольший интерес вызывает тлеющий разряд атмосферного давления, потому что он не требует специальных устройств регулирующих давление, поэтому не ограничивается место его применения. Можно отметить основные преимущества данной технологии: образуется большое количество бактерицидных агентов, имеет значительное количество физических обеззараживающих факторов, потребляет малые рабочие токи, может применяться для твердых и жидких поверхностей [4]. Из недостатков тлеющего разряда можно выделить

техническую сложность организации процесса стерилизации на его основе и значительную стоимость издержек на дезинфекцию большого объема воды. Разряд может применяться с некоторыми газами, например, аргоном или гелием, для уменьшения рабочего напряжения и улучшения пробивной способности разряда. Многие исследователи используют для получения разряда высокочастотное напряжение 13-60 МГц [34, 46, 47], делая рабочий ток практически емкостным.

Одна из принципиальных схем ячейки тлеющего разряда изображена на рисунке 1.1.1 [49]. Ячейка содержит два электрода (1), магнитную мешалку (4), находящихся в герметичном корпусе, в который заливается раствор электролита (3). Зона плазмы (2) возникает у электрода, находящегося над поверхностью жидкости. Полярность электродов может быть изменена, также как может быть изменена форма воздействующего напряжения и его частота. Разряд может применяться с твердыми поверхностями без растворов электролитов. Несмотря на присутствие одного из электродов в жидкости, разряд фактически происходит между одним твердым электродом, находящимся над поверхностью воды, и жидким электродом, которым является раствор в герметичном корпусе. Разряд развивается либо от верхнего электрода по воздуху и заканчивается в жидкости, либо наоборот (рис. 1.1.2). Он не достигает в нормальном режиме электрода, находящего в растворе электролита. В случае достижения тлеющим разрядом этого электрода, разряд может перейти в дуговой, сопровождающийся большими токами и возможностью выхода из строя оборудования, образующего разряд. Недопущения режима дугового разряда и контроль тлеющего разряда является одной из технических сложностей обеззараживания этим способом. Отличительная особенность разряда в том, что низкотемпературная плазма возникает как в воздушной, так и в жидкой среде, что способствует более интенсивному образованию бактерицидных агентов [28].

Исследователи Солошенко И.А. и Баженов В.Ю. изучали стерилизующие способности тлеющего разряда в случае, когда обеззараживающим фактором является только ультрафиолетовое излучение, изолировав разряд от

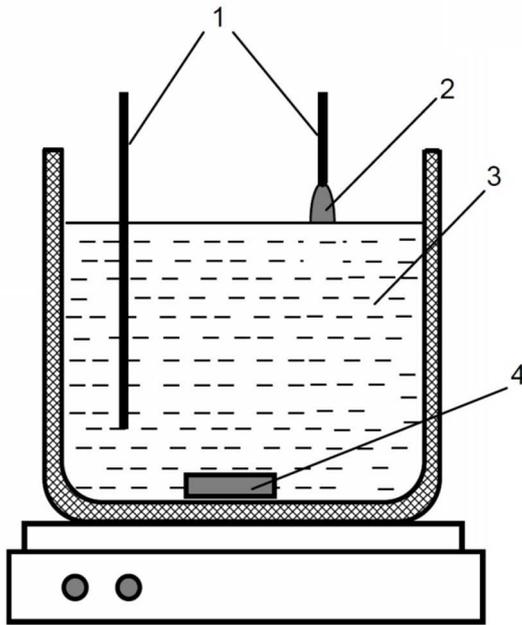


Рисунок 1.1.1 – Принципиальная схема ячейки тлеющего разряда [49]



Рисунок 1.1.2 – Тлеющий разряд с одним жидким электродом [39]

экспериментальных чашек с бактериями. Результаты тлеющего разряда оказались практически на одном уровне с ультрафиолетовыми лампами низкого DB-30 и среднего PRK-400 давлений [1]. Но многие исследователи, Laroussi M., Leipold F., Kelly-Wintenberg K., и др. считают фактор обеззараживания ультрафиолетовым излучением от тлеющего разряда малоэффективным и не основным в уничтожении бактерий [3,4,6-9]. Исследователи Perni S, Walsh J.L., Kong M.G. и др. считают, что в большей степени на стерилизацию влияют бактерицидные агенты, образующиеся в плазме разряда, нежели остальные физические факторы дезинфекции [29-31,34]. Основными бактерицидными агентами этого разряда являются образования активных форм кислорода и азота: перекись водорода H_2O_2 [10-17, 28], атомарный кислород O [2, 4, 6, 14, 18-22, 26-28, 35], озон O_3 [2, 4, 6, 14, 23-25], гидроксильный радикал OH^\bullet [2, 4, 6,14, 25-28, 35, 36], супероксид O_2^- [2, 4, 6, 14, 25, 28], оксид азота NO [6,58-60,96], диоксид азота NO_2 [4,58-60,96] и молекулярный ион азота N_2^+ [58-60,96]. Laroussi M. и Leipold F. экспериментально подтвердили влияние на уничтожение бактерий теплового эффекта плазмы [6]. Солошенко И.А., Баженов В.Ю., Fridman A. подтвердили воздействие ультрафиолетового излучения от разряда на стерилизацию [1,2]. Kelly-Wintenberg

К., Hodge A., Montie T. C. и др. утверждают, что лизис бактерий зависит также от заряженных частиц [2, 29-33], а Perni S, Walsh J.L., Shi J.J. и др. считают электрические поле одним из основных факторов дезинфекции [29-31]. Но во всех перечисленных работах не рассматривался олигодинамический эффект обеззараживания в случае использования электродов из меди, серебра или цинка. При возникновении разряда происходил бы электролиз металлов с электродов в жидкую среду, если бы были использованы электроды из перечисленных выше металлов. Ионы металлов от электродов вносили бы значительный вклад в процесс стерилизации жидкостей [37,141].

Вызывает большой интерес механизм стерилизации низкотемпературной плазмой. Среди исследователей нет единого мнения на счет механизма уничтожения бактерий. Mendis D. A., Rosenberg M. и Azam F. предполагают, что обеззараживание происходит в основном из-за заряженных частиц плазмы и электрического поля. Заряженные частицы сосредотачиваются на поверхности бактерий, вызывая кулоновское натяжение мембраны микроорганизмов. В местах наибольших неровностей поверхностей бактерий возникает максимальное кулоновское усилие и происходит их разрыв [32]. Этим механизмом объясняется разное воздействие плазмы разряда на грамположительные и грамотрицательные бактерии, потому что у них разная толщина защитного слоя [28, 32]. Из-за более прочной оболочки грамположительных бактерий низкотемпературная плазма на них воздействует менее интенсивно. Исследователи P. A. Hyslop, D. B. Hinshaw, I. U. Scraufstatter и др. считают, что лизис микроорганизмов происходит из-за их окисления бактерицидными агентами [40-42]. В. Halliwell, J. M. C. Gutteridge, C. E. Cross и др. полагают, что объектом поражения микроорганизмов продуктами разрядов являются рибонуклеиновая и дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК и РНК) [35,43-45]. Установление истинного механизма обеззараживания низкотемпературной плазмой позволит ученым решить множество вопросов и усовершенствовать процесс стерилизации [60].

1.2 Обеззараживание воды барьерным разрядом

Обеззараживание воды барьерным разрядом применяется во многих странах, сам разряд весьма хорошо изучен. Свыше 150 лет назад компания «Siemens» проводила первые эксперименты с барьерным разрядом [50]. Исследователи обнаружили возникновение плазмы разряда без соприкосновения стримеров с электродами. Обнаруженный вид разряда назвали «тихим разрядом», а в дальнейшем барьерным разрядом, по причине присутствия диэлектрика между электродами, который необходим для предотвращения перехода этого разряда в дуговой [48, 56]. Несмотря на его присутствие, N. Y. Babaeva, G. V. Naidis, G. E. Georghiou и др. утверждают, что на ранних этапах пробоя барьерный разряд имеет характеристики разряда без диэлектрика [52-56]. В настоящее время озонаторы на основе этого разряда имеют другой вид, чем когда разряд был обнаружен. Принципиальная схема реактора и электродов барьерного разряда в водовоздушной среде изображена на рисунке 1.2.1 [51]. Фотографии стримеров барьерного разряда и одиночного стримера изображены на рисунках 1.2.2 и 1.2.3 [57]. В приведенных фотографиях разрядов обработка воды проводилась реактором, у которого одним электродом является поверхность воды, а второй электрод изолирован стеклокерамическим диэлектриком.

Преимуществами барьерного разряда являются большое количество бактерицидных агентов, образующихся в плазме разряда, в особенности озона, высокие напряженности электрического поля. Его разновидности могут использоваться для обеззараживания наружных частей тел людей и животных, значительное количество физических дезинфицирующих факторов, может применяться для стерилизации твердых и жидких поверхностей [60]. Среди недостатков можно отметить техническую сложность оборудования этого разряда, относительно короткое время жизни бактерицидных агентов, ограниченную длину разрядного промежутка, что вносит некоторые ограничения в применении разряда. Обеззараживающими факторами разряда являются бактерицидные агенты, УИ, заряженные частицы, электрическое поле [61].

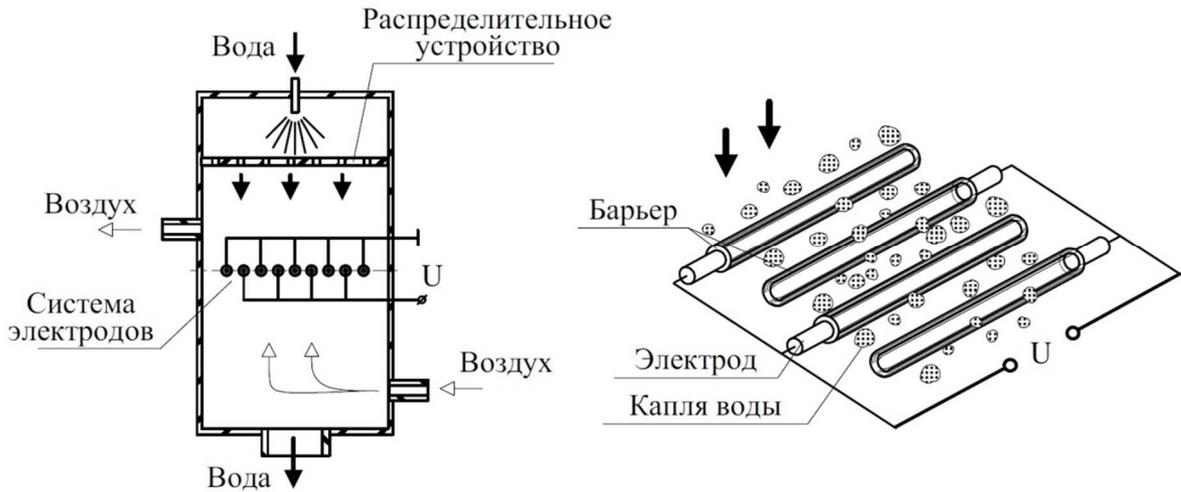


Рисунок 1.2.1 - Схема реактора и электродов барьерного разряда в водо-воздушной среде [51]

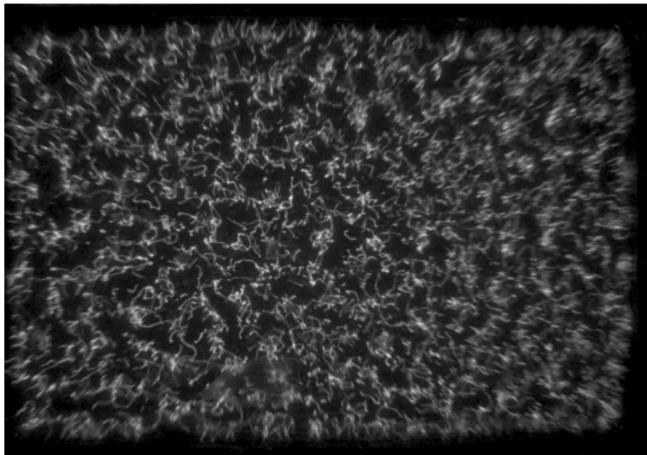


Рисунок 1.2.2 – Стримеры барьерного разряда в водо-воздушной среде [57]

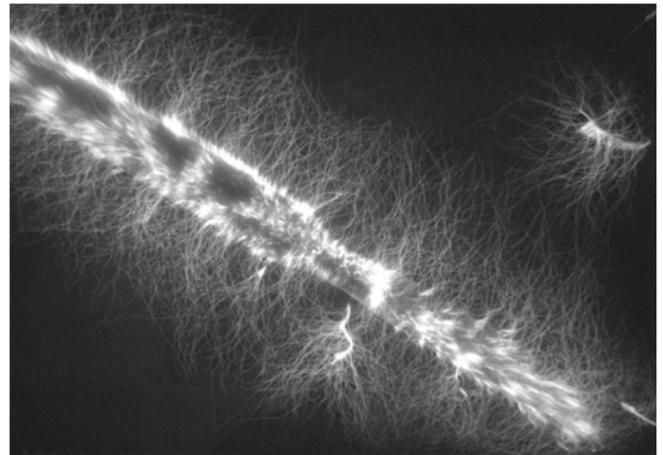


Рисунок 1.2.3 – Стример барьерного разряда [57]

В плазме разряда образуются бактерицидные агенты из активных форм кислорода и азота. Активными формами кислорода барьерного разряда являются озон O_3 [50,51,58-66,70,71,87,98], атомарный кислород O [50,51,58-60,70,71,98] перекись водорода H_2O_2 [58-60,67,68,70,71,98], гидроксильный радикал OH^\bullet [58-60,70-72,98,100], супероксид O_2^- [58-60,70,71,73,98,100]. Активными формами азота являются оксид азота NO [59,60,72,74-77,98], диоксид азота NO_2 [58-60,87,98] и молекулярный ион азота N_2^+ [59,60,76,77,99].

Бактерицидные свойства озона хорошо известны [78,79]. Генерируемый O_3 вносит вклад в уничтожение бактерий во время обработки воды и твердых

поверхностей барьерным разрядом [97,101]. В основном озон оказывает влияние на систему дыхания клеток [60]. Клеточные мембраны состоят из липидных слоев, в которых находятся ненасыщенные жирные кислоты. Озон, а также другие активные формы кислорода и азота, вступают в химическую реакцию с этими кислотами, в результате чего происходит окисление клеточной мембраны, что может вызвать лизис микроорганизмов [82].

Gallagher M., Gutsol A., Vaze N. и др. провели исследования инактивационных способностей озона [80,81]. Для эксперимента использовались кишечная палочка *E. coli*, смесь из стрептококков, стафилококков и дрожжей. Одна партия микроорганизмов была обработана барьерным разрядом, при этом концентрация озона была на уровне 28 ppm (установлено с помощью измерителя концентрации озона MedOzon 254/5). Другая партия не подвергалась воздействию низкотемпературной плазмы, а была пробно простерилизована озоном, полученным с помощью озонатора Quinta, с такой же концентрацией, как и в первом эксперименте. После более 30 минутного воздействия все микроорганизмы, обработанные барьерным разрядом, были нейтрализованы, а у бактерий, находившихся только в зоне озона, гибель не была зафиксирована. В результате было установлено, что O_3 имеет не главный вклад в процесс дезинфекции. Схожие эксперименты провели Gallagher M. и Friedman G. [83,84]. Барьерным разрядом обрабатывался воздушный фильтр бактерий, которым до начала обработки был профильтрован значительный поток воздуха с содержанием бактерий. Воздействие низкотемпературной плазмы на фильтр составило около 12 секунд. Затем установка была отключена и не подвергалась каким-либо воздействиям 2,5 минуты, за это время накопленная в ней концентрация озона практически не изменялась. В результате эксперимента за период непосредственного воздействия плазмы на фильтр, количество колониеобразующих единиц кишечной палочки *E. coli* уменьшилось с 100 % до 3 %, а под дальнейшим воздействием O_3 (и возможных оставшихся неразложившихся активных форм кислорода и азота) оставшиеся бактерии были дезинфицированы только более чем за 2 минуты. Авторы также делают вывод,

что озон влияет на дезинфекцию, но является не решающим фактором в обеззараживании с микроорганизмов.

Стерилизационные свойства перекиси водорода хорошо изучены, она широко применяется в медицине. Образованию H_2O_2 в зоне разрядов предшествует появление гидроксильных радикалов OH^\bullet , которые объединяясь, создают молекулы перекиси водорода [59,60]. Окислительные свойства H_2O_2 слабее, чем у OH^\bullet , а время существования больше. Проникающая способность перекиси водорода через клеточные мембраны микроорганизмов не хуже, чем у гидроксильного радикала. Попадая в бактерии, перекись водорода вызывает окисление защитного покрова и разрыва нитей ДНК [85,86]. Fridman A. и Friedman G. установили вклад в обеззараживание барьерным разрядом перекиси водорода [60]. Несколько порций кишечной палочки *E. coli* были обработаны раствором дистиллированной деионизированной воды и H_2O_2 . В результате, полная стерилизация микроорганизмов наблюдалась только при концентрации перекиси водорода более 2 моль/л, при меньших значениях обеззараживание бактерий было не полным. Исследователи, обработав другую часть микроорганизмов барьерным разрядом, получили полную их инактивацию при достижении концентрации перекиси водорода до значения 6,5 ммоль/л, которая более чем в 300 раз ниже, чем в первом опыте. Результаты исследований привели авторов к выводу, что участие H_2O_2 в стерилизации играет не главную роль.

Обладающие большой стерилизационной способностью активные формы кислорода, такие как гидроксильный радикал OH^\bullet , супероксид O_2^- , атомарный кислород O имеют относительно малый срок жизни [58,60,76,84,95]. Стерилизаторы активных форм азота, такие как NO , NO_2 , N_2^+ , менее реакционно-способные, но также являются дополнительным фактором дезинфекции низкотемпературной плазмой [59,60,76]. В отличие от озона и перекиси водорода, время разложения которых составляет несколько минут (в зависимости от внешних условий среды: температуры, водородного показателя, давления и т.д.), время разложения остальных активных форм кислорода и азота намного меньше, и влияние их на стерилизацию возникает только в случае непосредственного

воздействия разрядов на обрабатываемый объект [60,95]. Активные формы кислорода и азота вызывают окисление мембран микроорганизмов, которые действуют барьером для проникновения пагубных молекул и ионов внутрь клеток. В отличие от реакций с OH^\bullet , O_2^- и O действия остальных активных форм кислорода и азота протекают медленнее [82], следовательно, медленнее наступает инактивация бактерий [58,60,84]. Попадая внутрь клеток, активные формы кислорода и азота окисляют белки клеток, а также ДНК и РНК, разрыв нитей которых приводит к утрате функций или гибели микроорганизмов [88].

Влияние УИ низкотемпературной плазмы на обеззараживание изучено многими авторами [89,90,93,94]. Фотоны УИ имеют высокий уровень энергии для проникновения и разрушения клеток бактерий. Оказавшись внутри микробов, они также вступают в химические реакции с ДНК и РНК, наносят вред или разрушают их [60]. Fridman A., Gutsol A. и Gangoli S. исследовали стерилизующие способности УИ барьерного разряда. На середину чашки Петри с кишечной палочкой *E. coli* была положена пластина из кварца, размер которой был меньше чашки Петри, и бактерии подверглись воздействию барьерного разряда. Часть бактерий, находящихся под пластиной из кварца, обрабатывались только УИ разряда, на остальных воздействовали все обеззараживающие факторы разряда. В итоге, часть кишечной палочки *E. coli*, находящейся под пластиной из кварца, осталась невредимой, другая же порция была полностью простерилизована. Результаты проведенного эксперимента сходятся с мнением большинства ученых, которые считают, что вклад от УИ низкотемпературной плазмы в стерилизацию мал и им можно пренебречь [5, 91,92].

Тепловой эффект плазмы барьерного разряда имеет небольшой вклад в стерилизацию обрабатываемых объектов, даже в случае применения мощных разрядов. Большинство исследователей считают, что этот эффект практически ничтожный и его можно не учитывать [102-104]. Высокая температура разряда влияет на обеззараживание при мощных единичных разрядах, таких как дуговой или искровой, но ее влияние также можно не принимать в расчет в общей дезинфекции воды [60].

Влияние заряженных частиц низкотемпературной плазмы на стерилизацию рассматриваются небольшим количеством ученых как фактор обеззараживания [60,104,105]. Их бактерицидный эффект присутствует только при непосредственном воздействии разряда на обрабатываемый объект. Накопленные заряженные частицы на поверхности мембран бактерий вызывают воздействие кулоновских сил на микроорганизмы, и, в случае преодоления ими механической прочности бактерии, происходит ее физическое разрушение. Заряженные частицы являются не основным компонентом обеззараживания низкотемпературной плазмой, но вместе с остальными стерилизационными факторами они дают синергетический эффект уничтожения бактерий, что значительно улучшает качество дезинфекции [60].

В большинстве своих исследований ученые не рассматривают влияние электрического поля низкотемпературной плазмы на обеззараживание. Neumann E., Sowers A.E. и Jordan C.A. считают влияние электрического поля на дезинфекцию незначительным [38]. A M., Mendis D. A., Rosenberg M. и др. утверждают, что воздействие электрического поля на микроорганизмы существенно в уничтожении бактерий [32,69]. Katsuki S., Moreira K., Dobbs F. и др. зафиксировали сокращение числа микроорганизмов в сто раз от применения электрического поля барьерного разряда [106,107]. Авторы предполагают, что электрический пробой бактерий в воде возможен, если разность потенциалов на их поверхностях будет превышать 1 В. Электропорация бактерий обычно приводит к их смерти или ограничению функций жизнедеятельности [60]. Вклад электрического поля низкотемпературной плазмы в обеззараживание до конца не выяснен по причине технических сложностей таких исследований, а роль электрического поля в синергетическом эффекте стерилизации нельзя исключить [104].

1.3 Обеззараживание импульсным коронным и частичным разрядами

Коронный разряд является самостоятельной формой разряда, возникающий в резко неоднородных электрических полях. Главными его особенностями

являются неоднородность, сильное электрическое поле и расположение основной ионизации и светимости вблизи одного электрода, а не по всей длине промежутка между электродами [108]. Коронный разряд возможен на всех формах напряжения [109], может образовываться в газовой [110], водо-воздушной [111] и жидкой средах [108,112,114,132]. Согласно [113], частичным разрядом является разряд, шунтирующий лишь часть изоляции между электродами, находящимися под равными потенциалами. Fridman A., Gutsol A., Cho Y. I. и Yang Y. считают, что импульсный коронный разряд имеет одинаковую природу с частичным разрядом [108, 112]. Авторы отмечают, что в большинстве случаев при дезинфекции воды коронным разрядом используется именно импульсное напряжение для предотвращения перехода разряда в искровой или дуговой. Для обеззараживания воды коронный разряд может находиться над ее поверхностью, под водой, над поверхностью и под водой одновременно или в водо-воздушной среде. Gupta S. B., Heesch E.J.M., Pemen A.J.M. и др. утверждают, что наиболее эффективным для стерилизации воды является подводный его вид [114,133]. Эффективность подводного частичного разряда также подтверждается исследователями в [115].

Схема одного из реакторов стерилизации воды подводным коронным разрядом изображена на рисунке 1.3.1 [114]. На рисунке 1.3.2 запечатлен снимок импульсного коронного разряда в представленном реакторе. Анод реактора представляет собой проводник, покрытый тонким слоем пористой керамики (200-300 мкм). Такое техническое решение позволяет создать неоднородное электрическое поле без тонких выпирающих проводников, которые изнашиваются при длительной работе [117]. Разряды происходят в местах наличия пор в диэлектрике. Для развития коронного разряда в воде необходимы высокие электрические напряженности, более 1 МВ/см [114]. Подробное развитие этого разряда в воде описали W. An. K. Baumung, и H. Bluhm (рисунок 1.3.3 [116]).

Преимуществами импульсного коронного разряда являются высокие электрические напряженности полей, большое количество стерилизующих



Рисунок 1.3.1 – Реактора обеззараживания воды коронным разрядом [114]

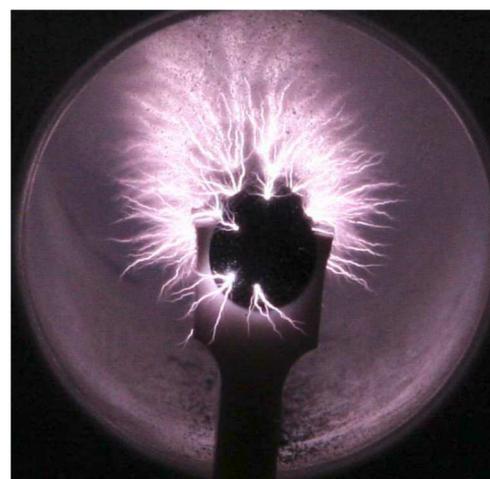


Рисунок 1.3.2 – Импульсный коронный разряд в воде [114]

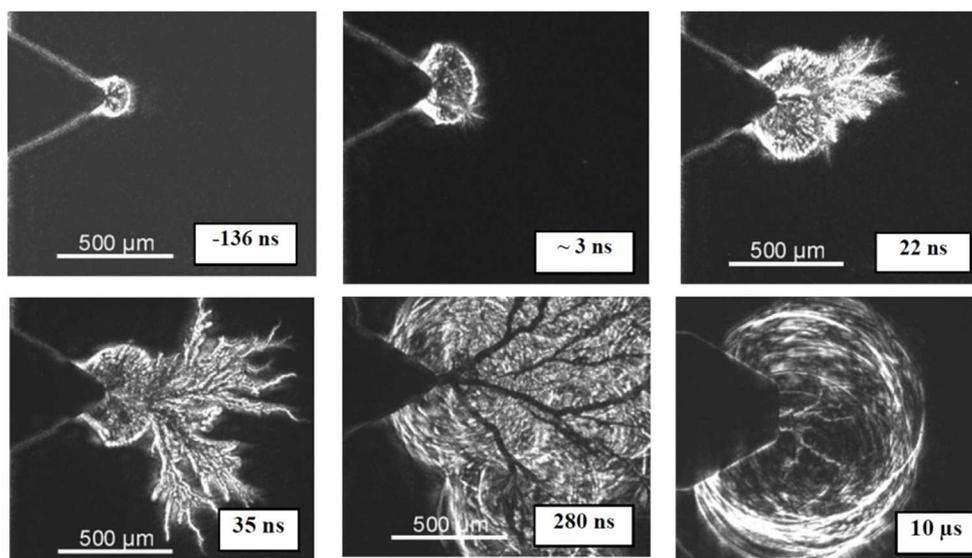


Рисунок 1.3.3 – Развитие коронного разряда в воде [116]

факторов, бактерицидных агентов. Среди недостатков можно отметить необходимость наличия очень высокой напряженности для образования разряда, техническая сложность организации процесса стерилизации, контроль над переходом в дуговой и искровой разряд, повышенный износ электродов, значительный расход электроэнергии на стерилизацию воды.

Дезинфицирующими факторами импульсного коронного разряда являются УИ, электрическое поле, заряженные частицы. Во время разряда образуются бактерицидные агенты активных форм кислорода, такие как озон O_3 [59,60,114,127,131], атомарный кислород O [59,60,114,125,129] перекись водорода H_2O_2 [114,118-120,126,128,130], гидроксильный радикал OH^\bullet [121-124,126,128],

супероксид O_2^- [59,60,114,127]. В случае локализации разряда в воздушной или водо-воздушной среде, способствовать дезинфекции будут и активные формы азота: оксид азота NO, диоксид азота NO_2 и молекулярный ион азота N_2^+ [59,60]. Стерилизующие способности активных форм кислорода разные, также как и разное время разложения этих химических молекул. Их окислительный потенциал представлен в таблице №1 [112,114]. Чем выше окислительный потенциал, тем сильнее обеззараживающие способности молекул и меньше время их разложения. Для сравнения, самым высоким окислительным потенциалом из химических элементов обладает фтор F (3,03 В), а самый распространенный элемент для обеззараживания воды хлор Cl имеет окислительный потенциал всего 1,36 В [112].

Таблица №1 – Окислительные потенциалы активных элементов в воде [112]

Наименование	Формула	Окислительный потенциал, В
Гидроксильный радикал	OH^\bullet	2,80
Атомарный кислород	O	2,42
Озон	O_3	2,07
Перекись водорода	H_2O_2	1,78

Значительным недостатком обеззараживания воды коронным разрядом является большое потребление электроэнергии [114]. Gupta S. B. на основании своих исследований подводного коронного разряда приводит результаты около 4-5,5 кВт·ч/м³ в случае загрязнения воды до миллиона единиц бактерий на литр. Автор считает, что основой расход электроэнергии тратится на джоулевые потери, отмечает нагрев обрабатываемых растворов до полной дезинфекции на 6-10 °С. Основной причиной нагрева жидкостей Gupta S. B. и Lukeš P. отмечают значительную проводимость сточных вод (около 0,4 мСм/см) [114,132]. Gupta S. B. доказывает, что в случае меньшей проводимости воды затраты на электроэнергию меньше. Снижение потребления электроэнергии при увеличении сопротивления воды указывает и зависимость выхода H_2O_2 от проводимости воды при обработке импульсным коронным разрядом, что представлено на рисунке 1.3.4.

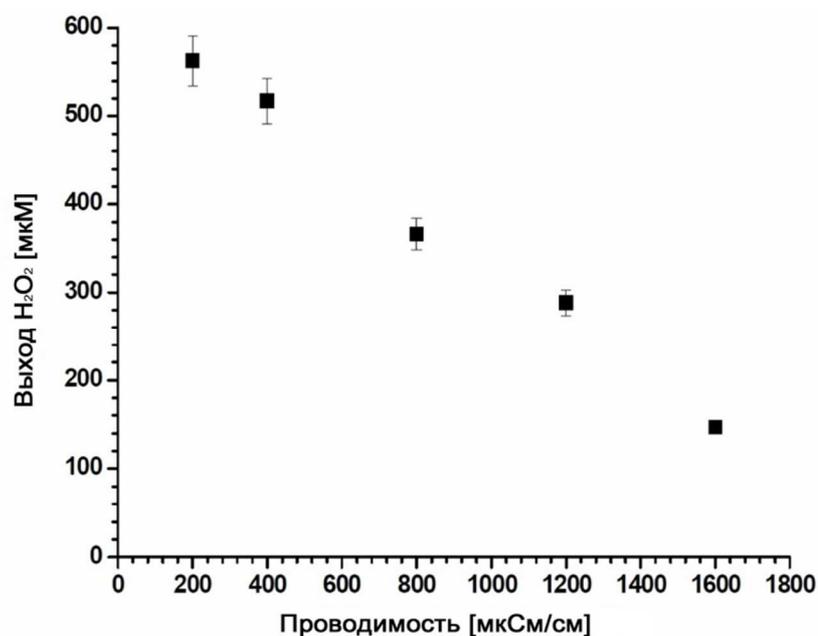


Рисунок 1.3.4 – Зависимость выхода перекиси водорода от проводимости воды при обработке импульсным коронным разрядом [114]

Одним из вариантов снижения эксплуатационных затрат автор видит в увеличении сопротивления обрабатываемой воды путем барботирования. Heesch E.J.M., Remen A.J.M. и Huijbrechts A.H.J. добились значения потребления электроэнергии до уровня $7 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ для уменьшения числа грамположительных и грамотрицательных бактерий в 10 раз при обработке воды импульсным коронным разрядом, но в случае загрязнения воды до миллиона *E. coli* потребуется около $42 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$, что практически соразмерно с затраченной электроэнергией на кипячения такого же объёма воды [133]. Katsuki S., Schoenbach K.H., Joshi R.P. и др. отметили результат расхода электроэнергии при дезинфекции импульсным коронным разрядом около $2,7 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ при уменьшении концентрации *E. coli* в 1000 раз [134-138]. Существенный разброс в результатах затраченной электроэнергии на стерилизацию воды, возможно, связан с отсутствием оптимизации режимов работы разрядов. Katsuki S., Schoenbach K.H., Joshi R.P. и др. в своих работах применяли электроды из вольфрама, что исключает воздействие олигодинамического эффекта на микроорганизмы. Если бы в исследованиях были использованы электроды из меди, серебра или цинка, они значительно бы снизили потребление электроэнергии [37]. Gupta S. B. в своих

работах использовал медный анод в реакторе импульсного коронного разряда, но он был покрыт тонким керамическим слоем и электролиз металла был возможен только через поры керамики, откуда развивался и сам разряд. Автор отмечает вклад ионов меди в дезинфекцию и их участие в синергетическом эффекте. Несмотря на это, немецкий ученый не заостряет внимание на олигодинамическом эффекте, не оценивает образование ионов меди и их участие в стерилизации воды.

Исследователь утверждает, что природа синергетического эффекта обеззараживания заключается в образовании самого сильного дезинфицирующего компонента OH^\bullet при взаимодействии в различных сочетаниях в воде перекиси водорода, ионов меди, озона, супероксида, ультрафиолетового излучения и даже электрогидравлического эффекта. Например, при взаимодействии озона и УИ разряда, O_3 распадается на O_2 и O с образованием гидроксильного радикала. В. S. Oh, S. J Park, H. G. Lee, K. S. Kim доказали это утверждение в своих экспериментах [139]. А воздействие УИ на перекись водорода также вызывает распад молекулы с образованием OH^\bullet [140].

Gupta S. B. отмечает зависимость затрат электроэнергии на обеззараживание от водородного показателя воды (рисунок 1.3.5 [114]). На этом рисунке представлены две зависимости генерации перекиси водорода при разных значениях водородного показателя воды, одна с $\text{pH} = 6,2$ и другая с $\text{pH} = 8,38$.

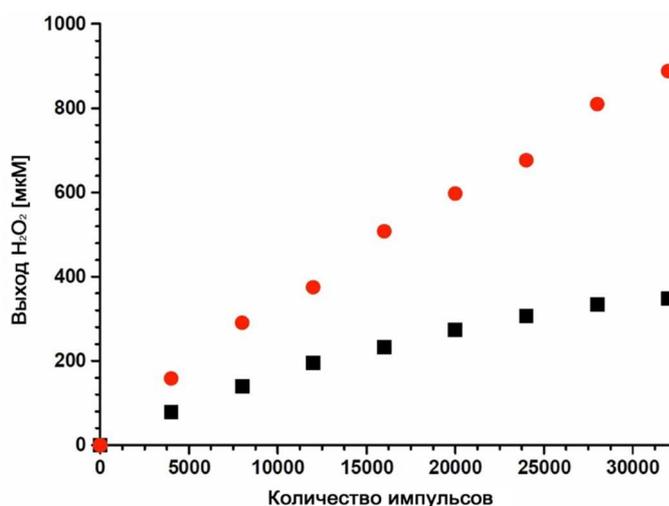


Рисунок 1.3.5 - Влияние pH на выход перекиси водорода в зависимости от количества импульсов (● = раствор с $\text{pH} = 6,2$, ■ = раствор с $\text{pH} = 8,38$ [114])

Автор не приводит зависимости образования H_2O_2 от всех значений рН воды, но отмечает снижение количества ее образования при смещении рН воды в сторону щелочной среде. Несмотря существующие недостатки обеззараживания воды импульсным коронным разрядом, авторы считают перспективным его применение и видят значительное количество направлений совершенствования данного способа дезинфекции [114,132-138].

1.4 Обеззараживание искровым и дуговым разрядами

Искровой и дуговой разряды схожи по своей природе, искровой разряд обычно является предшественником дугового, различаются они в основном величинами токов и температур, первый характеризуется рабочими токами до 1 кА и температурами в несколько тысяч Кельвин, второй токами выше 1 кА и температурами выше 10000 °К [108,60]. Разряды существенно отличаются от остальных большими рабочими токами. Подводный искровой разряд и схема технологии его образования изображена на рисунке 1.4.1 [108]. Основными преимуществами этих разрядов в области обеззараживания воды являются

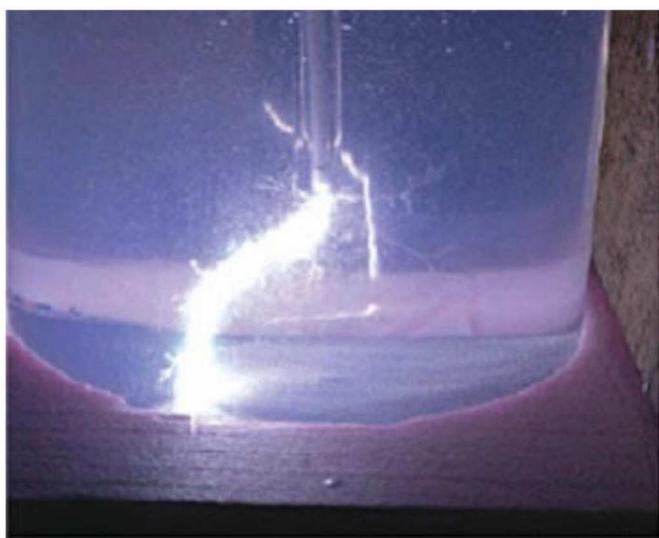


Рисунок 1.4.1 а, б - Подводный искровой разряд (а) и схема технологии его образования (б) [108]

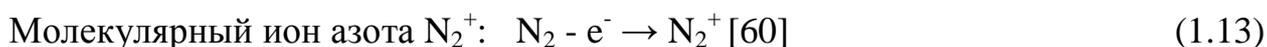
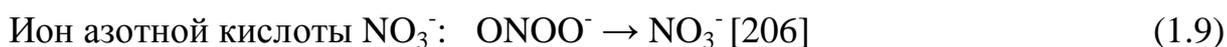
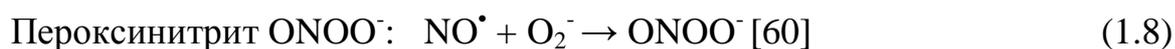
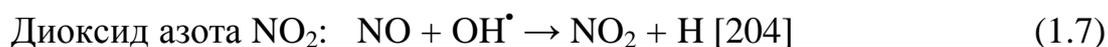
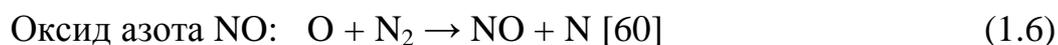
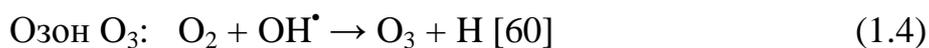
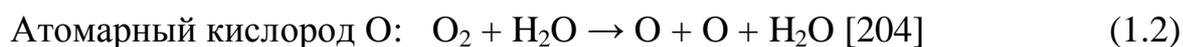
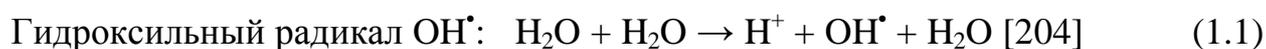
большое количество образующихся бактерицидных агентов в стримере разрядов, значительное количество физических обеззараживающих факторов,

относительная простота технологии стерилизации. Среди недостатков можно отметить значительное потребление электрической энергии на процесс дезинфекции воды.

Основными обеззараживающими факторами этих разрядов являются бактерицидные агенты, ударные волны, УИ, электрическое поле, заряженные частицы. В случае расположения разрядов в водной среде происходит образование озона O_3 [59,60,203,206,209,212,214], атомарного кислорода O [59,60,202-209,214], перекиси водорода H_2O_2 [59,60,202-204,207,209,212,214], гидроксильного радикала OH^\bullet [59,60,202-207,209,210,212,214], супероксида O_2^- [59,60,202-209,213,214]. В случае образования разряда в воздушной и водовоздушной среде, генерируются оксид азота NO [59,60,203,204,206,209,213,214], диоксид азота NO_2 [59,60,203-209,211,213,214], оксид диазота N_2O [205,206,208,209,214], азотистый ангидрид N_2O_3 [206,209,214], тетраоксид диазота N_2O_4 [206,209,214], ион азотной кислоты NO_3^- [203,205,207-209,211,213,214], молекулярный ион азота N_2^+ [59,60,203] и пероксинитрит $ONOO-$ [203,208,209,213,214]. Можно отметить, что в дуговом и искровом разрядах, в отличие от других разрядов с малыми рабочими токами, образуются больше элементов активных форм азота [206,208,209]. Авторы также отмечают более высокую концентрацию образующихся от дугового и искрового разрядов активных молекул на основе азота и низкую концентрацию активных молекул на основе кислорода, в особенности перекиси водорода и озона [205,207,208]. Причиной этому служат большие рабочие токи и низкая напряженность электрического поля во время горения разряда [206]. Исследователи указывают и на самопроизвольное снижение содержания всех частиц в случае их высокой концентрации из-за взаимоуничтожения.

Все перечисленные бактерицидные агенты образуются за счет образования плазмы разряда, УИ, электрического поля, заряженных частиц, высокой температуры разряда и ударных волн [60]. Они требуют разные удельные энергии на свое образование [59]. В случае развития разряда в водной или водовоздушной среде происходит синтез активных форм кислорода, и, не смотря на

то, что в некоторых экспериментах иногда не обнаруживаются какие-либо элементы из этих активных форм, они обязательно будут присутствовать в обрабатываемой среде, хоть и в малом количестве. Это связано с тем, что при образовании одних активных форм кислорода образуются все остальные из первоначально появившихся активных элементов на основе кислорода. По этому, из-за возникновения разряда в водной или водо-воздушной среде обязательно возникнут все активные формы кислорода, возможно, некоторые в больших концентрациях, некоторые в малых. Такую же зависимость имеют и образующиеся активные формы азота [60]. Основные пути образования этих реакционно-способных элементов имеют следующий вид:



Несмотря на большие рабочие токи и потребление электроэнергии, Ching W.K., Locke B.R., Campbell C.A. и др. отмечают высокую эффективность обеззараживания дуговым и искровым разрядами [198-201,216]. Юткин Л.А. оценил удельный расход электроэнергии на стерилизацию сточной воды $0,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ за счет одного электрогидравлического эффекта [215], который заключается в физическом уничтожении бактерий ударной волной, образованной

мощным разрядом.

Для ограничения величины токов и снижения энергопотребления данных разрядов применяются ВИИП. Импульсы напряжений в этом случае требуют отстройки длительностей и амплитуд от геометрии разрядных камер и электрических характеристик всей обеззараживающей технологии. В случае подачи в разрядную камеру слишком коротких импульсов или импульсов с малой амплитудой напряжения, сильноточный разряд может отсутствовать. В случае питания разрядной камеры слишком длительными импульсами или импульсами с большой амплитудой напряжения увеличится джоулевый нагрев воды и снизится эффективность дезинфекции. Оптимизация параметров ВИИП и разрядных камер открывают перспективы применения и развития описанных разрядов в стерилизующих технологиях [60,215].

1.5 Обеззараживание диафрагменным разрядом

И. В. Божко и Н. И. Фальковский назвали ДЭР феноменальным разрядом за его особенную природу [152,159]. Разряд возникает не между электродами, а только в отверстиях диафрагмы, а его стримеры имеют направление не от электродов, а от разрядных отверстий во всех направлениях [157]. ДЭР можно охарактеризовать как разряд с жидкими электродами, потому что он фактически развивается между двумя разделенными объемами воды, и не касается в нормальном режиме электродов [153,154]. Разряд возникает в воздушных пузырьках, появляющихся в отверстиях диафрагменной мембраны. Образование пузырьков происходит за счет джоулева нагрева воды протекающим электрическим током, плотность которого в отверстиях мембраны в сотни раз превышает плотность тока за их пределами. Схема реактора ДЭР на постоянном напряжении представлена на рисунке 1.5.1 [156], она содержит источник постоянного напряжения, анод 1, катод 2, раствор электролита 5, изображены отрицательные 3 и положительные 4 стримеры ДЭР. Разряд в промышленном реакторе на переменном напряжении частотой 50 Гц представлен на рисунке 1.5.2 [155]. Подробные снимки ДЭР на положительном и отрицательном импульсе с

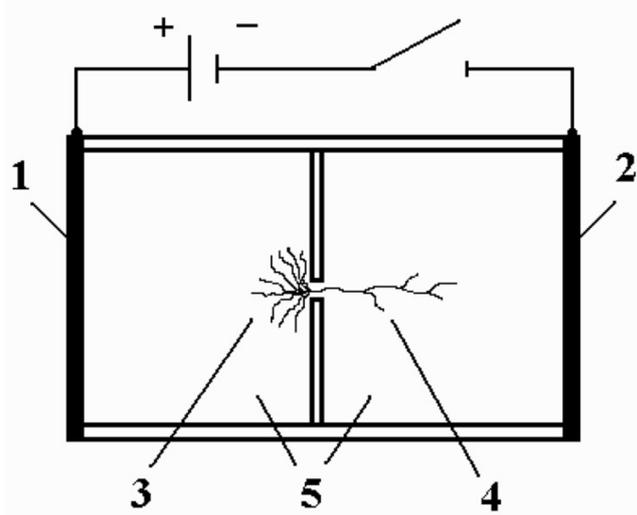


Рисунок 1.5.1 - Реактор ДЭР на постоянном напряжении [156]



Рисунок 1.5.2 - ДЭР промышленного реактора [155]

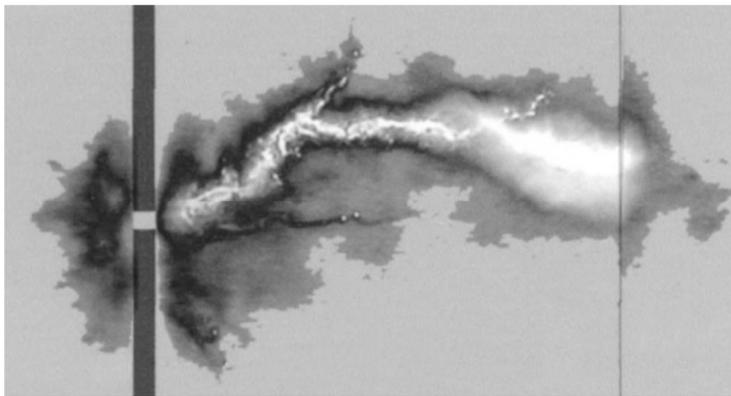


Рисунок 1.5.3 – Анодный факел ДЭР в воде [157]

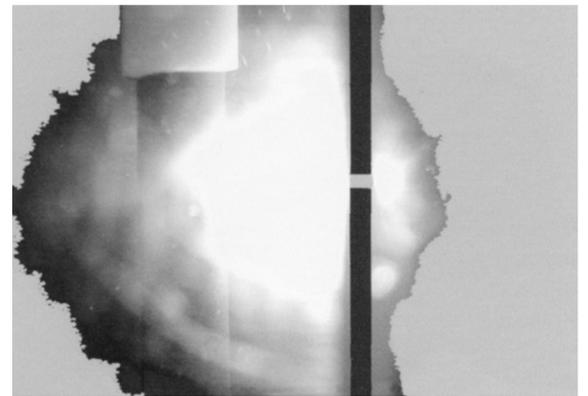


Рисунок 1.5.4 – Катодный факел ДЭР в 5 см растворе NaCl [157]

амплитудой напряжения 12 кВ и длительностью 0,7 мс приведены на рисунках 1.5.3 и 1.5.4 [157].

В отличие от тлеющего, барьерного и других разрядов, ДЭР слабо изучен [158,160]. Ограничено количество работ, описывающих стерилизационные способности этого разряда [161]. Существенный вклад в развитие способа обеззараживания воды на основе ДЭР внесли Суворов И.Ф., Юдин А.С., Лапшакова К.А. [149,162,217-228]. Основными преимуществами разряда являются большое количество обеззараживающих факторов, бактерицидных агентов, он может образовываться от любых форм напряжения. Среди недостатков выделяется техническая сложность технологии дезинфекции,

относительно быстрый срок износа диафрагменной мембраны, повышенный расход электрической энергии на стерилизацию воды. Из основных дезинфицирующих факторов ДЭР можно выделить ударные волны, УИ, электрическое поле, заряженные частицы, тепловое воздействие и олигодинамический эффект, в случае использования электродов из меди, серебра или цинка. В зоне разряда образуются бактерицидные агенты, в состав которых входят озон O_3 [161,163,164,177,179], атомарный кислород O [163-165] перекись водорода H_2O_2 [149,153,154,156,161-175,177-186], гидроксильный радикал OH^\bullet [163-165,167,176,178,189], супероксид O_2^- [60,162,164,181]. Для увеличения бактерицидных свойств воды и увеличения срока пролонгированного действия обеззараживающих элементов в реакторе ДЭР могут применяться электроды из меди, серебра или цинка [187].

Обеззараживающие свойства этого разряда зависят от большого количества факторов [149], таких как величина и полярность воздействующего напряжения, длина и диаметр разрядных отверстий, водородный показатель воды и ее температура и проводимость, геометрия реактора и материал электродов и т.п. Из-за своей уникальной природы, вольт-амперная характеристика (ВАХ) ДЭР весьма своеобразна. Крста F. описывает ВАХ капиллярного и диафрагменного разрядов реактора с одним отверстием в разделяющих мембранах, при питании реактора от источника постоянного напряжения (рисунок 1.5.5) [188]. Наибольшую нелинейность имеет ВАХ капиллярного разряда, что связано с более неустойчивыми термическими процессами в капилляре. Образование паровоздушных пузырьков в ДЭР отмечено небольшим увеличением потребляемого тока, в капиллярном разряде появление пузырьков практически не приводит к изменениям в ВАХ. Появление разряда в обеих характеристиках сопровождается быстрым броском тока.

Stará Z. указывает на нелинейное влияние образования перекиси водорода от проводимости электролита при использовании аналогичной конфигурации оборудования для образования ДЭР (рисунок 1.5.6) [168]. В эксперименте использовались два вида раствора, дистиллированная вода с $NaCl$ и Na_2HPO_4 .

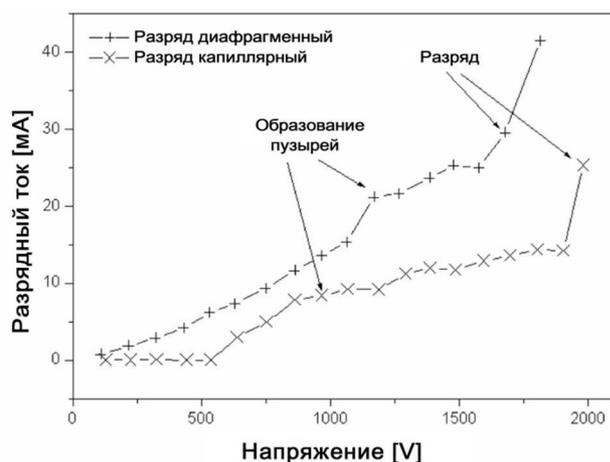


Рисунок 1.5.5 – Выход капиллярного и диафрагменного разрядов [188]

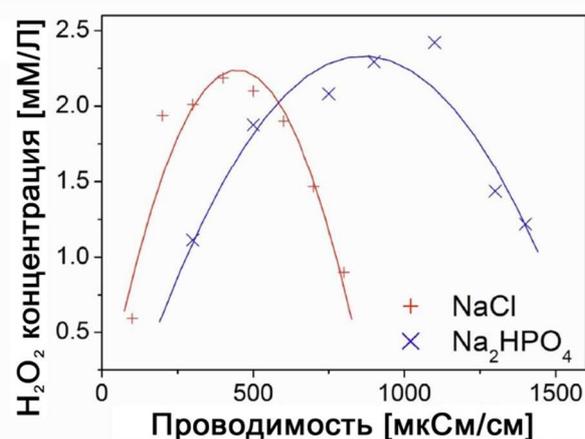


Рисунок 1.5.6 – Зависимость образования H_2O_2 от проводимости электролита [168]

Максимум образования перекиси водорода для раствора с хлоридом натрия наблюдался при проводимости около 400 мкС/см, а для раствора гидрофосфата натрия около 900 мкС/см. Исследователь не дает каких-либо объяснений об экстремумах зависимостей, о причинах нарастания и спада характеристик.

Л. А. Кузьмичева, Ю.В. Титова и А.И. Максимов установили зависимость выхода перекиси водорода от материала электродов [178]. В экспериментах был использован модельный раствор из дистиллированной воды и сульфата натрия, зависимость 1 – конфигурация электродов графит-графит, 2 – графит – нержавеющая сталь (рисунок 1.5.7 [178]). После 30 минут обработки электролита ДЭР было зафиксировано уменьшение образования H_2O_2 для электродов графит – нержавеющая сталь. Причиной этому послужил расход молекул перекиси водорода на окисление ионов железа и в результате уменьшения итоговой концентрации H_2O_2 .

Никифоров А.Ю. и Максимов А.И. выявили неодинаковые зависимости образования перекиси водорода во время обработки ДЭР на переменном напряжении с разными длинами отверстий в диафрагме, но с неизменным их диаметром 0,5 мм (рисунок 1.5.8 [190]). Однако сравнение разрядных промежутков было не совсем корректным, потому что прикладываемая мощность для разрядных промежутков была разная, соответственно и отличался энергозатрат в разряд. Авторы знали об этой зависимости, потому что в этой же

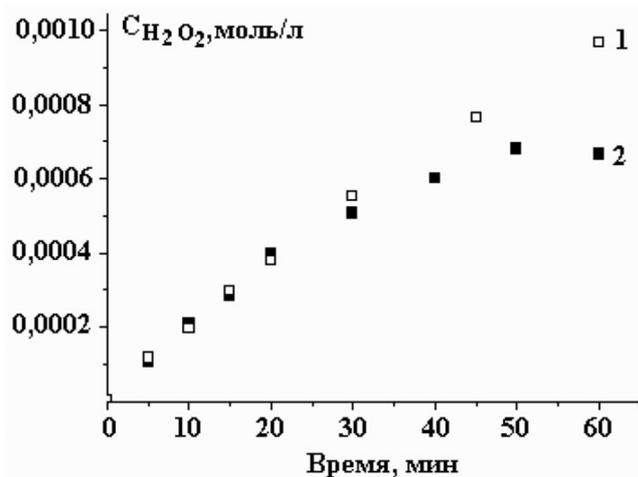


Рисунок 1.5.7 – Выход H_2O_2 от времени обработки ДЭР с разными конфигурациями электродов [178]

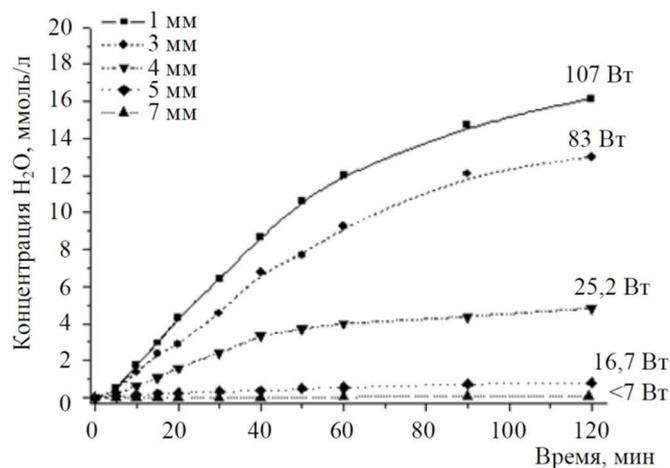


Рисунок 1.5.8 – Выход H_2O_2 от времени обработки ДЭР с разными отверстиями в мембране [190]

статье приводят характеристики генерации H_2O_2 от мощности ДЭР, но, не смотря на знание описанных закономерностей, эксперименты были проведены в условиях разного потребления электроэнергии. Исследователи отмечают, что с практической точки зрения наибольшая генерация перекиси водорода с наименьшим электропотреблением происходит при длине разрядного промежутка 5 мм.

Юдин А.С. исследовал влияние диаметра отверстий диафрагменной мембраны на образование H_2O_2 и ионов меди при неизменной длине отверстий в 5 мм (рисунок 1.5.9 а, б [149]). Автор отмечает, что наиболее рациональным является использование диаметра отверстий мембраны в диапазоне 1-1,2 мм. При больших диаметрах отверстий наблюдается значительное увеличение плотности тока в отверстиях мембраны, что приводит к увеличению тепловых потерь. При диаметрах отверстий менее 1 мм происходило уменьшение массопереноса бактерицидных агентов из зоны разряда в жидкость. Ученый отмечает зависимость образования бактерицидных агентов ДЭР от значительного количества факторов, которые сложно исследовать в одной работе.

Ограниченное количество работ посвящено обеззараживанию воды с помощью ДЭР, все эти исследования осуществлялись на реакторах с питанием

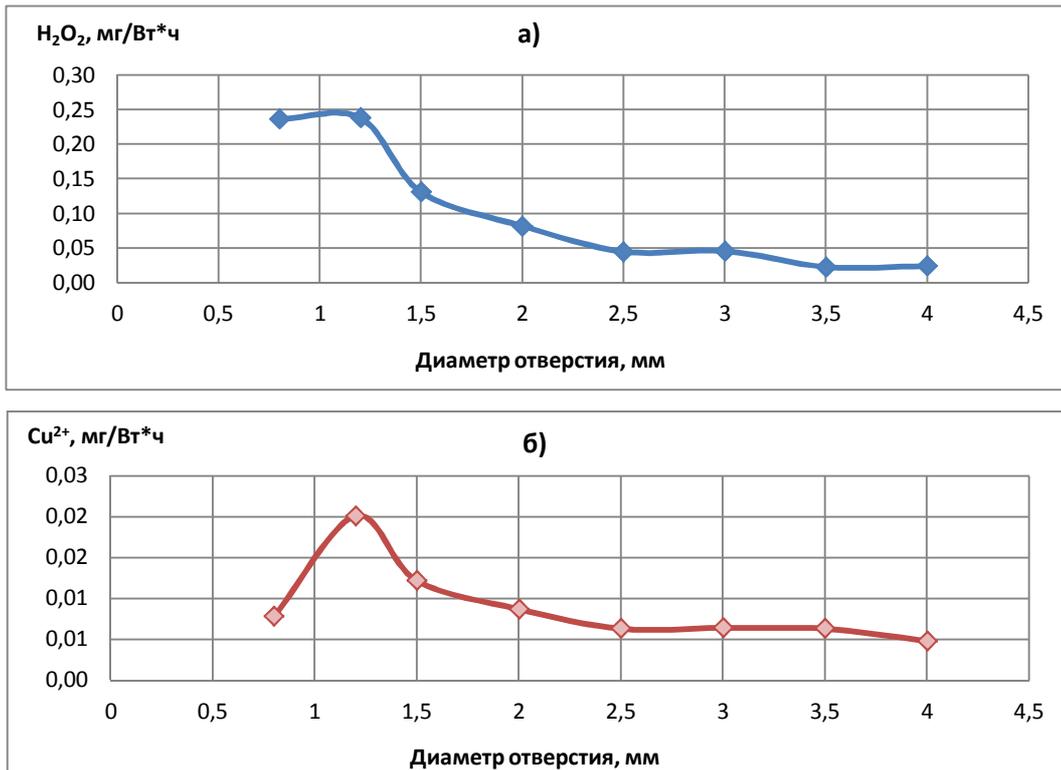


Рисунок 1.5.9 – Выход перекиси водорода (а) и ионов меди (б) в зависимости от диаметра отверстий диафрагмы [149]

преимущественно от источников постоянного или переменного промышленного напряжений, стерилизационные способности импульсного ДЭР не рассматривались. Практически не освещены вопросы образования ионов металлов от обработки воды ДЭР, олигодинамический эффект обеззараживания учтен лишь единицами из авторов. Слабо изучены реакторы ДЭР со способностью протекания через них воды, подавляющее большинство работ посвящено реакторам без какого-либо протока жидкостей через них. В малом количестве работ рассмотрено применение многоочагового ДЭР. Настоящая работа выполнена с целью определения бактерицидных свойств ДЭР при питании реактора импульсным напряжением для увеличения эффективности дезинфекции воды.

1.6 Выводы и задачи исследования

Дезинфекция воды является важнейшей задачей науки и народного хозяйства. Обеззараживающие технологии должны соответствовать основным требованиям: быть экологичными, наименее затратными и наиболее простыми. На основании обзора электроразрядных способов стерилизации можно отметить, что описанные способы являются перспективными направлениями в дезинфекции воды, они по праву занимают свою часть работы во всех сферах обеззараживания. Доказано, что ДЭР выполняет эффективно стерилизацию воды и имеет значительный запас для дальнейшего совершенствования метода [149].

Для подтверждения или опровержения предположений о ДЭР в работе были поставлены и решены следующие задачи:

- Создать ВИИП для реактора ДЭР с техническими характеристиками, позволяющими уменьшить потребление электроэнергии, с широким диапазоном регулирования частот следования импульсов.
- Создать новый тип реактора ДЭР, позволяющий значительно снизить эксплуатационные затраты, затраты электроэнергии.
- Определить оптимальные параметры импульсов для дезинфекции воды (амплитуда напряжения, частота следования импульсов).
- Установить зависимости стерилизации жидкостей ДЭР от параметров обрабатываемых растворов (температура, проводимость, водородный показатель).

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1 Высоковольтный импульсный источник питания

Для проведения исследований дезинфекции воды ДЭР был разработан ВИИП [151]. Устройство имеет возможность регулирования длительностей импульсов от 1 до 16 мкс, амплитуд импульсов от 0 до 3 кВ. Максимальная мощность ВИИП составляет 4 кВт.

Блок-схема изобретения изображена на рисунке 2.1.1, она содержит блок

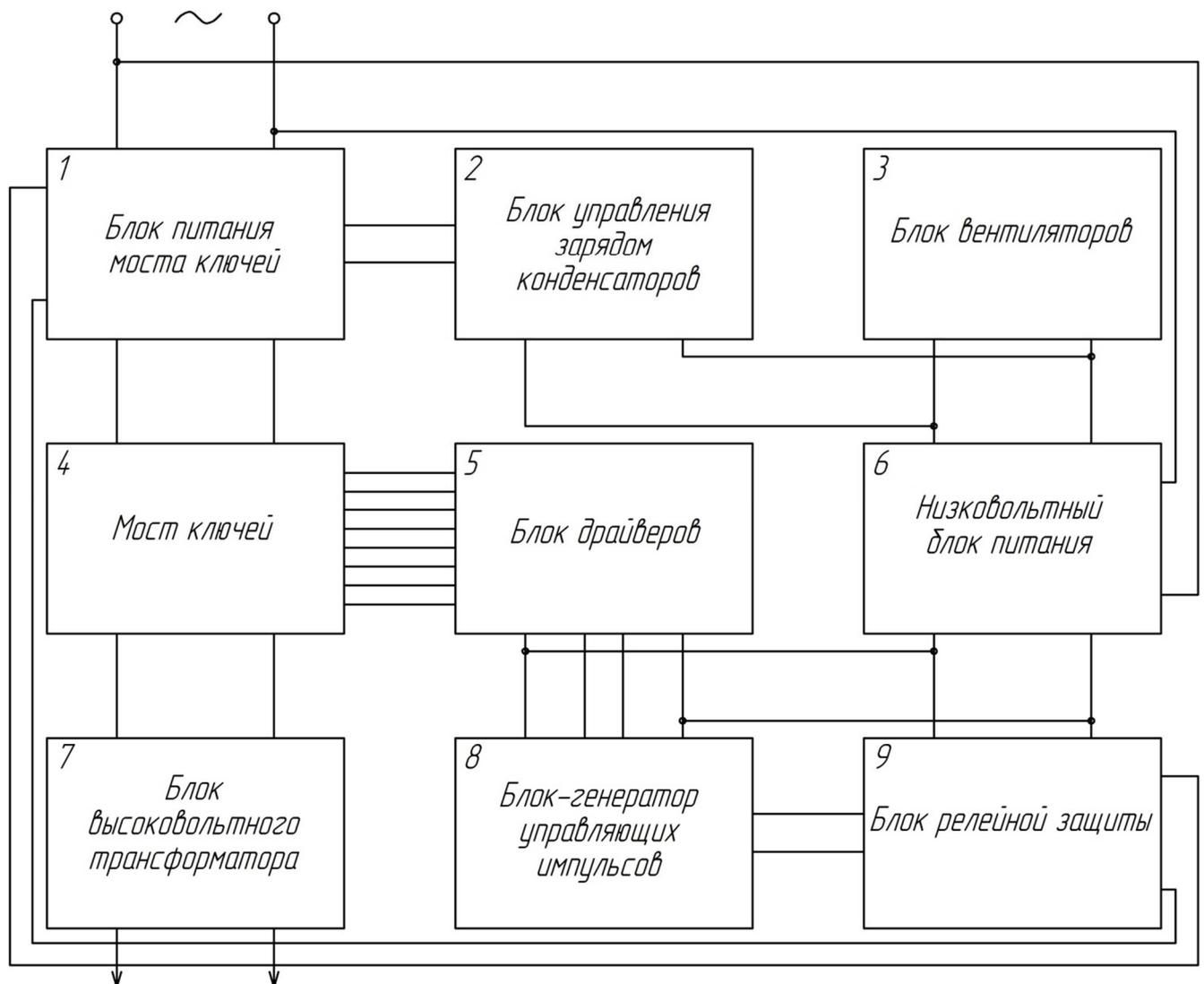


Рисунок 2.1.1 - Блок-схема высоковольтного импульсного источника питания с регулируемыми длительностями импульсов

питания моста ключей 1, блок управления зарядом конденсаторов 2, блок вентиляторов 3, мост ключей 4, блок драйверов 5, низковольтный блок питания 6,

блок импульсного трансформатора 7, блок-генератор управляющих импульсов 8, блок релейной защиты 9. Выходы высоковольтной обмотки импульсного трансформатора подключаются к электродам реактора ДЭР.

Принципиальная схема устройства изображена на рисунке 2.1.2. Работа ВИИП осуществляется следующим образом. После включения кнопки «Пуск» поступает напряжение в блок питания моста ключей 1 и низковольтный блок питания 6. Блок 6 питает постоянным напряжением блок управления зарядом конденсаторов 2, блок вентиляторов 3, блок драйверов 5, блок-генератор управляющих импульсов 8 и блок релейной защиты 9. В случае срабатывания блока релейной защиты прекращается питание блока высоковольтного трансформатора 7, обесточивание остальных блоков не происходит. Блок 8 генерирует управляющие импульсы с регулируемыми длительностями импульсов, его сигналы в дальнейшем поступают в блок драйверов 5. Блок 5 усиливает сигналы блока 8 для дальнейшей их подачи на полевые транзисторы моста ключей 4, а также обеспечивает гальванической развязкой от блока 4 свои драйверы и блок 8. На мост ключей 4 поступает постоянное напряжение 310 В от блока 1 и управляющие сигналы от блока 5, в результате чего начинает работать мост ключей и на его выходах генерируются силовые разнополярные импульсы с величиной максимального мгновенного напряжения 310 В. Из блока 4 силовые импульсы напряжения поступают в блок высоковольтного трансформатора 7, который имеет ответвления на низковольтной обмотке для переключения количества витков с целью регулирования амплитуд импульсов. Выводы высоковольтной обмотки трансформатора подключаются к реактору ДЭР, в результате чего на него поступают высоковольтные разнополярные импульсы напряжения.

Блок питания моста ключей 1 начинает работать с момента включения кнопки SB1, после чего переменное напряжение поступает для выпрямления на диодный мост VD1 через резисторы R1 и R2, которые ограничивают пусковой ток. От включения SB1 начинают заряжаться сглаживающие напряжение конденсаторы C1 и C2, что может вызвать срабатывание автоматических

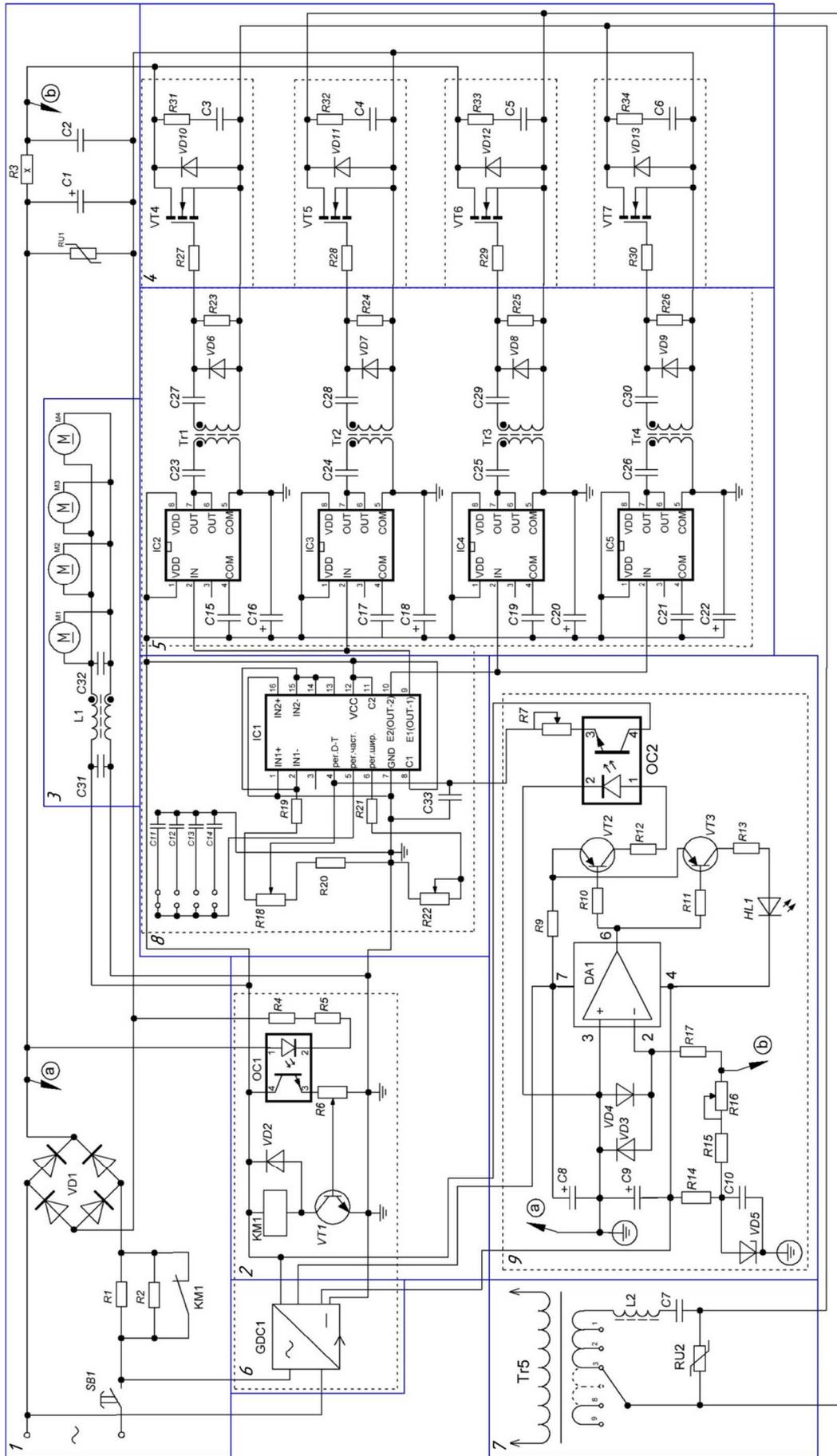


Рисунок 2.1.2 - Принципиальная схема ВИИП

выключателей в питающей сети. После снижения величины зарядного тока конденсаторов $C1$ и $C2$, сопротивления $R1$ и $R2$ шунтируются контактом реле $KM1$, способ срабатывания которого представлен ниже в описании блока 2. Блок 1 снабжен защитой от перенапряжений сети в виде двухстороннего ограничителя перенапряжений $RU1$ с быстродействием около 9 нс (рисунок 2.1.3).

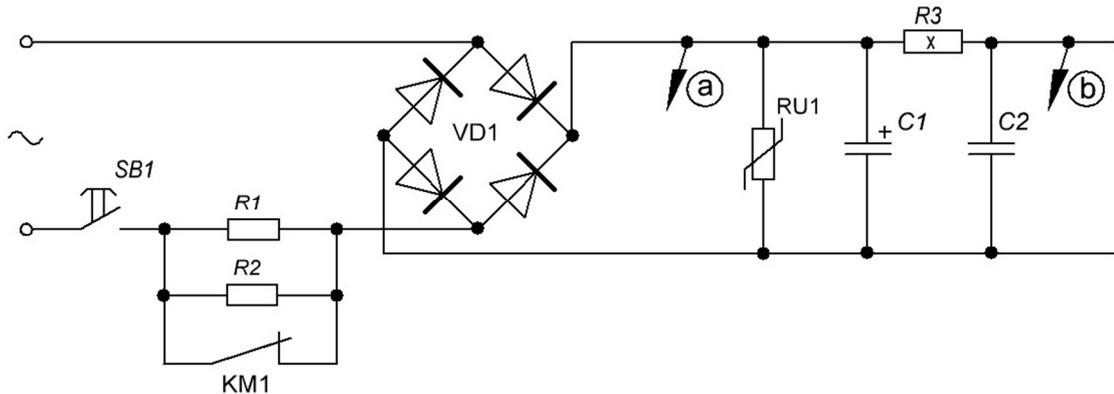


Рисунок 2.1.3 – Принципиальная схема блока питания моста ключей

Блок управления зарядом конденсаторов 2, питающийся от низковольтного блока питания 6, обеспечивает шунтирование пусковых резисторов, принцип которого основан на измерении восстановленного напряжения на конденсаторах $C1$ и $C2$ блока 1 (рисунок 2.1.4). Резисторы $R4$ и $R5$ и светодиод оптопары $OC1$

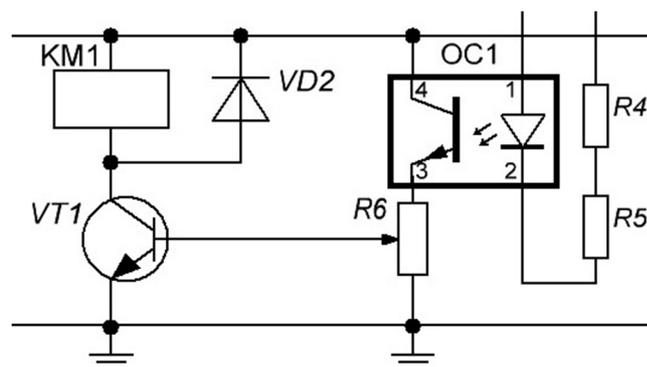


Рисунок 2.1.4 - Блок управления зарядом конденсаторов

образуют слаботочный делитель выходного напряжения блока 1. Когда конденсаторы $C1$ и $C2$ заряжаются до определенного настраиваемого напряжения, которое регулируется резистором $R6$, транзистор $VT1$ открывается и срабатывает реле $KM1$, контакты которого шунтируют резисторы $R1$ и $R2$ блока 1. Далее ВИИП начинает работать в полную мощность.

Блок релейной защиты 9 отвечает за защиту от сверхтоков блоков 4 и 7, которая основана на измерении разности напряжений до и после резистора R3 блока 1 (рисунок 2.1.5). Защита является настраиваемой, в зависимости от

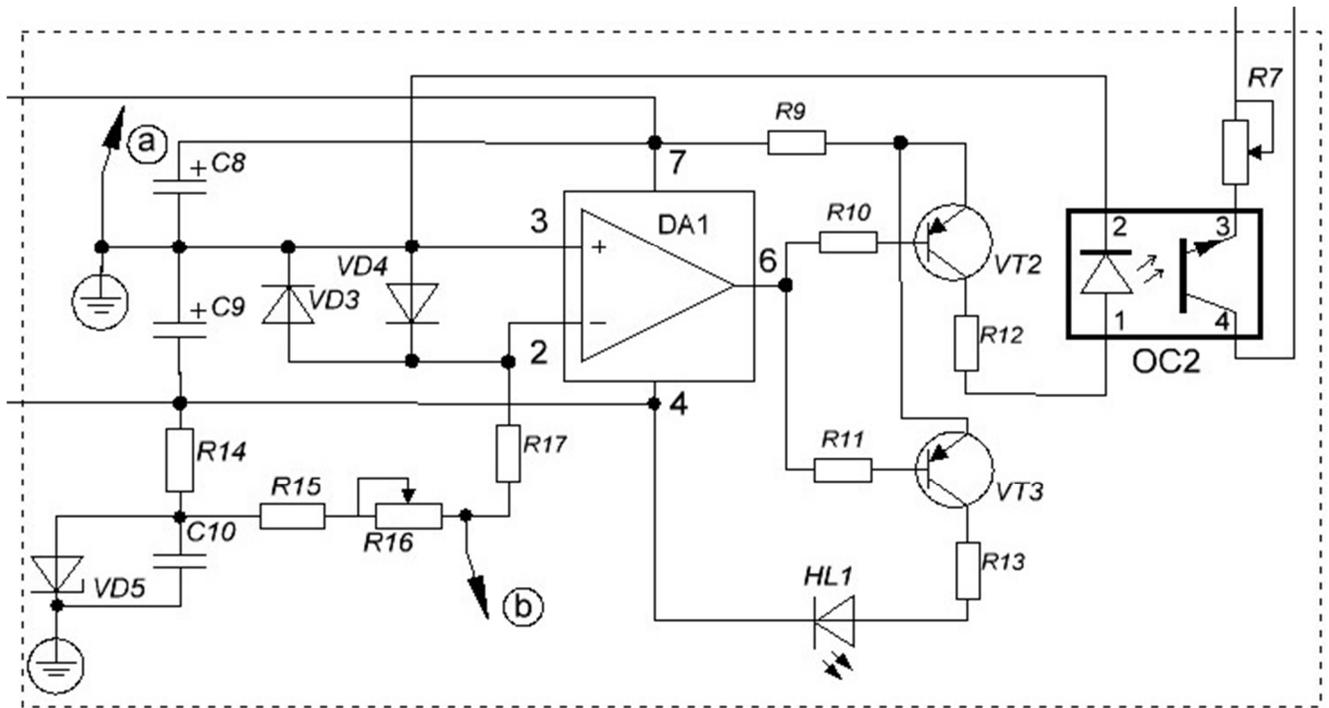


Рисунок 2.1.5 – Принципиальная схема блока защиты

мощности потребления. В случае возникновения замыкания или перегрузки в реакторе ДЭР или в блоках 4 и 7 резко увеличивается разность напряжений на выводах сопротивления R3. Вывод опорного напряжения резистора R3 включается в точку «а» и к катоду стабилитрона VD5 блока релейной защиты. Вывод сравниваемого напряжения R3 подсоединен в точку «b» между резисторами R16 и R17. Пока разница напряжений между точками «а» и «b» не велика, блок 9 не оказывает ни какого влияния на работу всего устройства. Относительно нулевого потенциала защитного заземления, напряжение в точках «а» и «b» блока 9 находится на уровне 310 В, по этому вся схема блока защиты находится под положительным напряжением блока 1. Данный вариант схемы защиты осуществим только с использованием источника низковольтного питания GDC1 с гальванической развязкой от сети (рисунок 2.1.2) и с применением гальванической развязки блока 9 от блока 8, в настоящем случае осуществленной оптопарой OC2. Когда аварийный ток через R3 возрастет выше настраиваемого

уровня, на выходе операционного усилителя DA1 появляется напряжение, которое через сопротивления R10 и R11 поступает на базы транзисторов VT2 и VT3. Открытие транзистора VT2 приводит к подаче напряжения на оптопару OC2, что вызывает отправку аварийного сигнала на контроллер широтно-импульсной модуляции (ШИМ) IS1 блока 8 и он прекращает работу, а открытие транзистора VT3 приводит к свечению светодиода HL1 и информированию оператора о срабатывании блока защиты. ШИМ-контроллер IS1 после появления сигнала на входе 4 практически мгновенно перестает генерировать управляющие импульсы, в результате чего в закрытом положении остаются все силовые ключи-транзисторы VT4-VT7 блока 4, что полностью устраняет аварийные токи в защищаемых элементах. Отсутствие сторонних коммутаций в блоках 4 и 7 позволяет избежать перенапряжений на силовых ключах, что снижает вероятность их выхода из строя и повышает надежность всего ВИИП. Общее время срабатывания защиты от превышения напряжения на R3 блока 1 до закрытия транзисторов VT4-VT7 блока 4 составляет менее 3,5 мкс. Защита является циклической, через 0,4 с после ее срабатывания блок 9 возвращается в исходное положение и ВИИП продолжает работу, если короткое замыкание не устранилось, то устройство периодически выключается и включается. Такая последовательность работы ВИИП необходима по причине того, что замыкания и перегрузки в реакторе ДЭР являются частым случаем, но в подавляющем большинстве случаев они являются самоустранимыми.

Блок-генератор управляющих импульсов 8 основан на микросхеме TL494, позволяющей регулировать длительности импульсов, имеющей средства коррекции симметрии выходных напряжений, что важно для моста ключей 4. Управляющие импульсы исходят из микросхемы IC1 с выходов 9 и 10. Регулирование длин импульсов происходит переменным резистором R22. Переключение диапазонов регулирования осуществляется переключками конденсаторов C11-C14. Управляющие импульсы приходят на входы 2 драйверов IC2-IC5 блока 5 (рисунок 2.1.6).

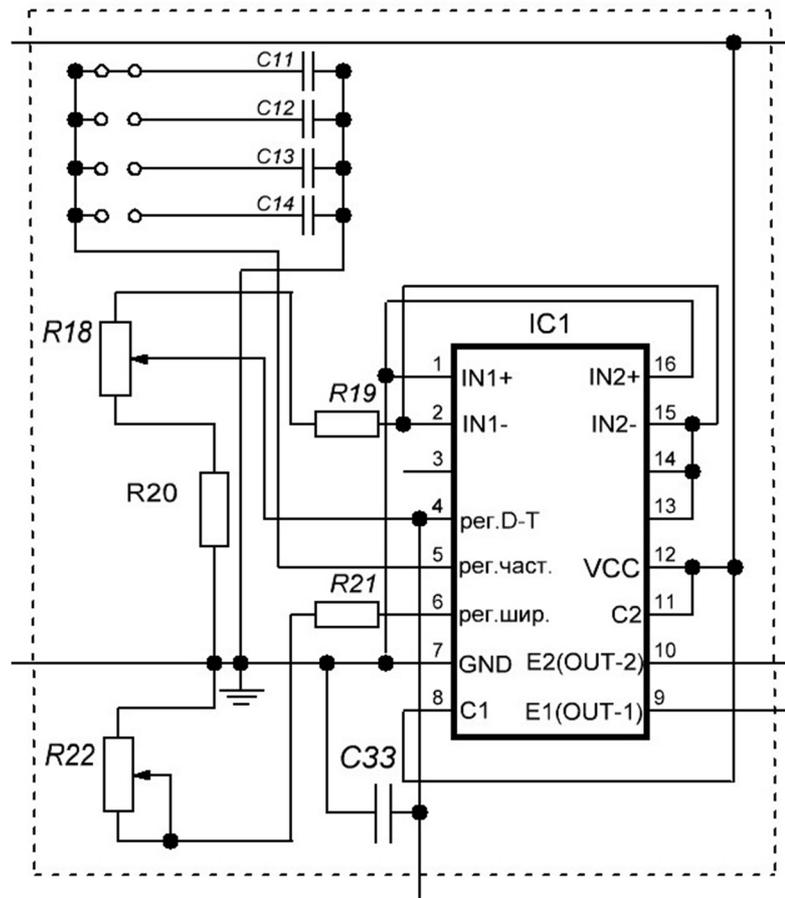


Рисунок 2.1.6 – Принципиальная схема блока-генератора управляющих импульсов

Блок драйверов 5 с гальваническими развязками усиливает сигналы блока 8, а также обеспечивает блок-генератор управляющих импульсов и свои драйверы защитой от повышенных напряжений моста ключей 4 гальваническими развязками. Управляющие импульсы приходят от микросхемы IC1 блока 8 на драйверы IC2-IC5 блока 5. Сигналы управления усиливаются драйверами IC2-IC5 и затем гальванически развязываются от моста ключей с помощью импульсных трансформаторов Tr1-Tr4 с наборами пассивных элементов, необходимых для корректной передачи однополярных импульсных сигналов на емкостные нагрузки затворов полевых транзисторов. Во избежание насыщения сердечников трансформаторов Tr1-Tr4 необходимо убирать возникающие постоянные составляющие насыщений при помощи конденсаторов C23-C26. На выходах Tr1-Tr4 образуются двухполярные сигналы, полностью совпадающие по длине с входящими однополярными. Амплитуды импульсов на выходах трансформаторов

Tr1-Tr4 зависят от коэффициентов заполнения управляющих сигналов. Для устранения разбросов выходных напряжений установлены конденсаторы C27-C30 и диоды VD6-VD9. Резисторы R23-R26 необходимы для разряда затворов транзисторов при отсутствии управляющих сигналов, иначе на затворах транзисторов могут оставаться заряды, и транзисторы останутся открытыми, что приведет к короткому замыканию в мосте ключей 4 (рисунок 2.1.7).

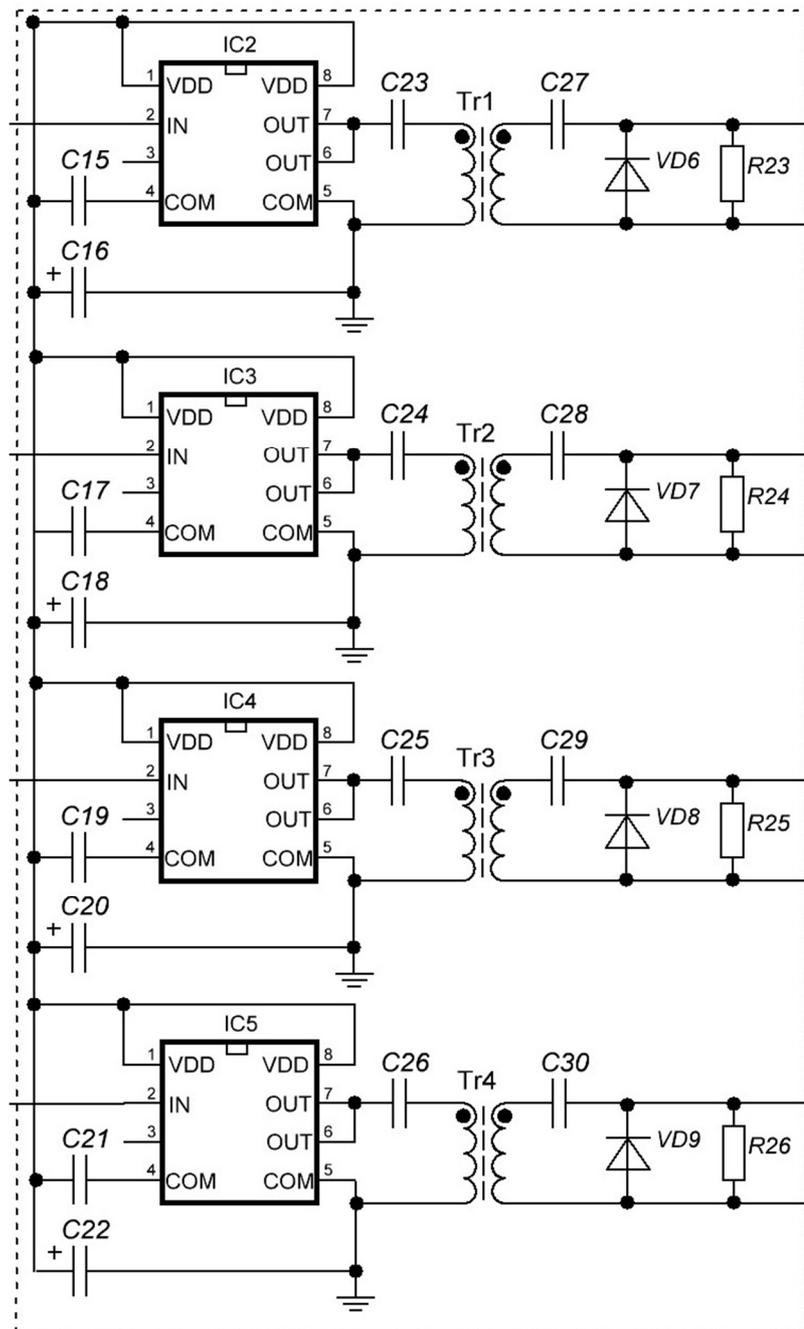


Рисунок 2.1.7 – Принципиальная схема блока драйверов с гальваническими развязками

Мост ключей 4 содержит четыре ключа, работающих попарно, которые являются отдельными модулями, содержащими полевые транзисторы VT4-VT7 (рисунок 2.1.8). Сопротивления R27-R30 предназначены для защиты драйверов IC2-IC5 блока 8 от коротких замыканий и выхода из строя в случае сгорания транзисторов блока 4. Диоды VD10-VD13 совместно со снаберрами из активных сопротивлений R31-R34 и емкостей C3-C6 защищают силовые ключи от перенапряжений с индуктивной цепи блока высоковольтного трансформатора. Выводы блока 4 подключаются к низковольтной обмотке импульсного трансформатора 7.

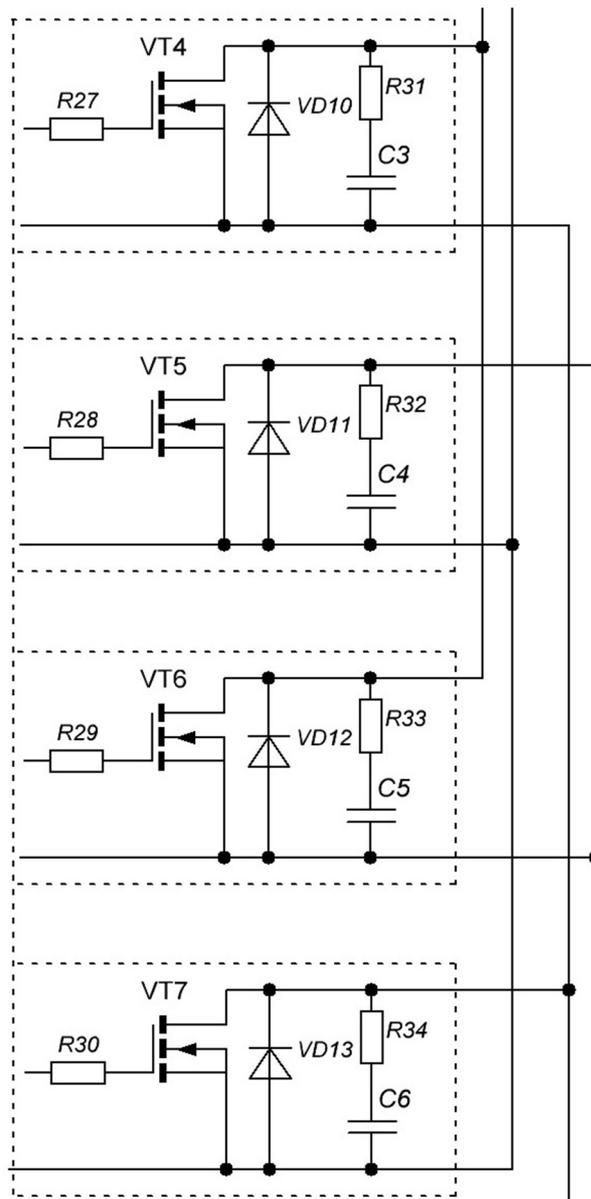


Рисунок 2.1.8 – Принципиальная схема блока драйверов с гальваническими развязками

Блок вентиляторов 3 выполняет функцию охлаждения радиаторов транзисторов VT4-VT7 блока 4. Он содержит 4 вентилятора M1-M4, синфазный фильтр L1 и сглаживающие напряжение конденсаторы C31 и C32. Фильтрация напряжения необходима для предотвращения прохождения помех в остальные блоки ВИИП от блока 3, питающихся от блока 6 (рисунок 2.1.9).

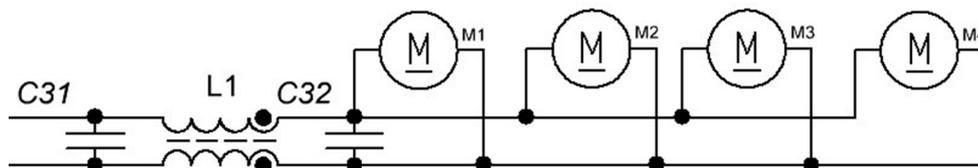


Рисунок 2.1.9 – Принципиальная схема блока вентиляторов

Блок высоковольтного трансформатора представляет собой силовой однофазный ферритовый трансформатор Tr5 310/3000 В, дроссель L2 для ограничения аварийный токов, конденсатор C7 для компенсации индуктивного сопротивления и ограничитель перенапряжений RU2, который защищает силовые ключи блока 4. Низковольтная обмотка трансформатора Tr5 имеет ответвления для переключения количества витков с целью регулирования амплитуды напряжения на высоковольтной обмотке трансформатора, выводы которой подключаются к электродам реактора ДЭР (рисунок 2.2.10). Внешний вид ВИИП представлен на рисунке 2.2.11.

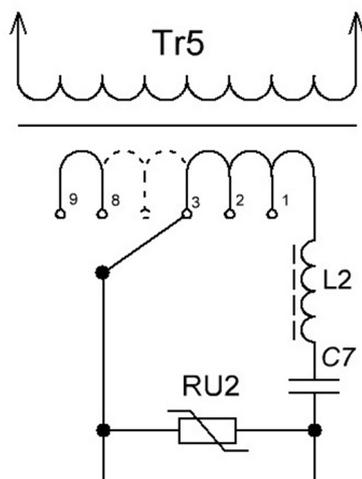


Рисунок 2.2.10 – Принципиальная схема блока трансформатора

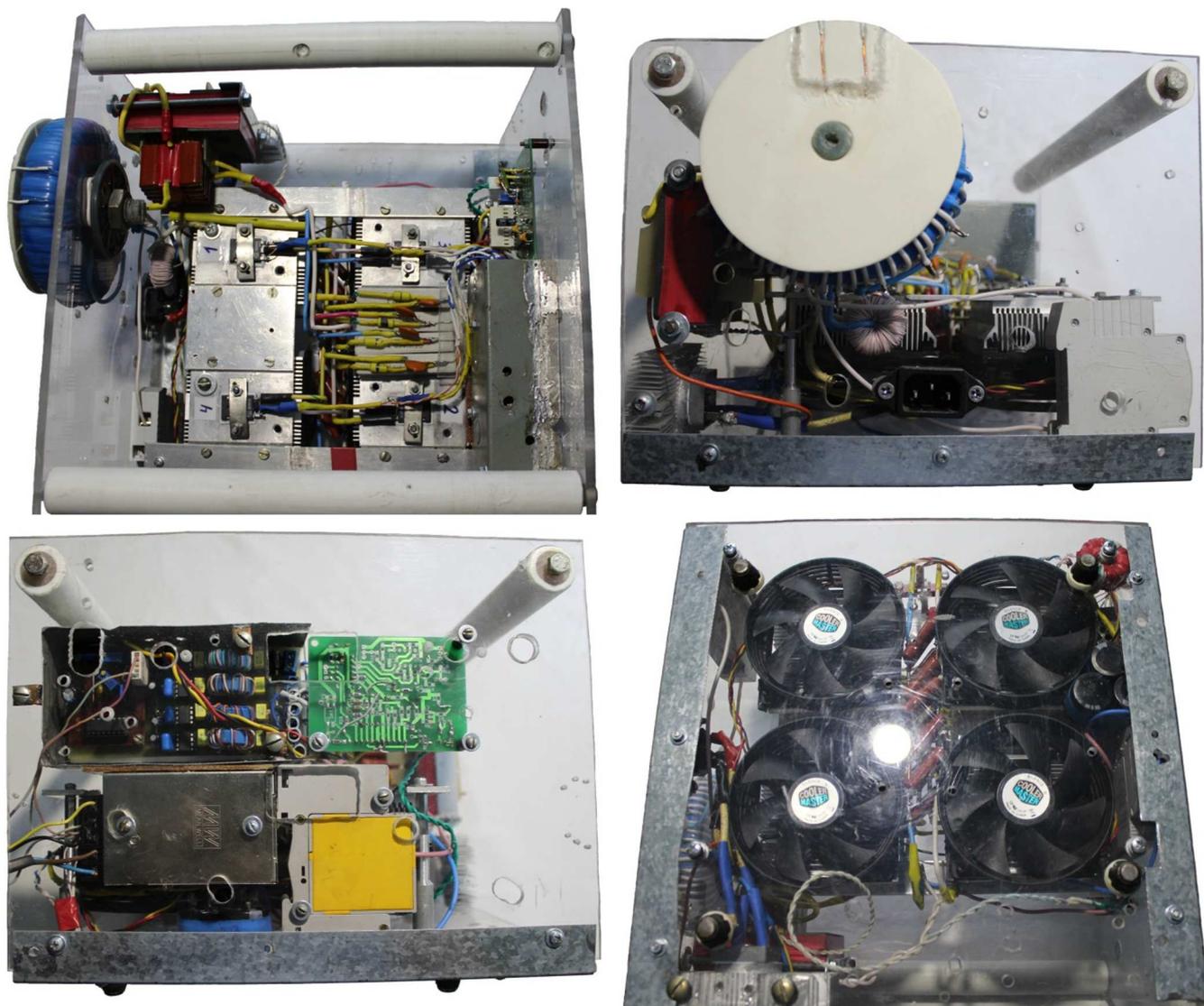


Рисунок 2.2.11 – Исполнение ВИИП

2.2 Реактор ДЭР

Для постановки экспериментов был разработан новый реактор ДЭР, позволяющий существенно снизить затраты электроэнергии на дезинфекцию воды [150] в сравнении с [193].

Устройство, изображенное на рисунке 2.2.1, содержит герметичный корпус 1, разделенный на верхнюю 2 и нижнюю 3 камеры диафрагменной мембраной 4, в которой просверлены отверстия 5. В реакторе находятся металлические электроды 6 и 7, верхние 8, 9 и нижние 10, 11 патрубки. Устройство подключается к источнику питания 12. К электродам изобретения можно подключать источники питания любых форм напряжения. Для снижения давления в реакторе установлен

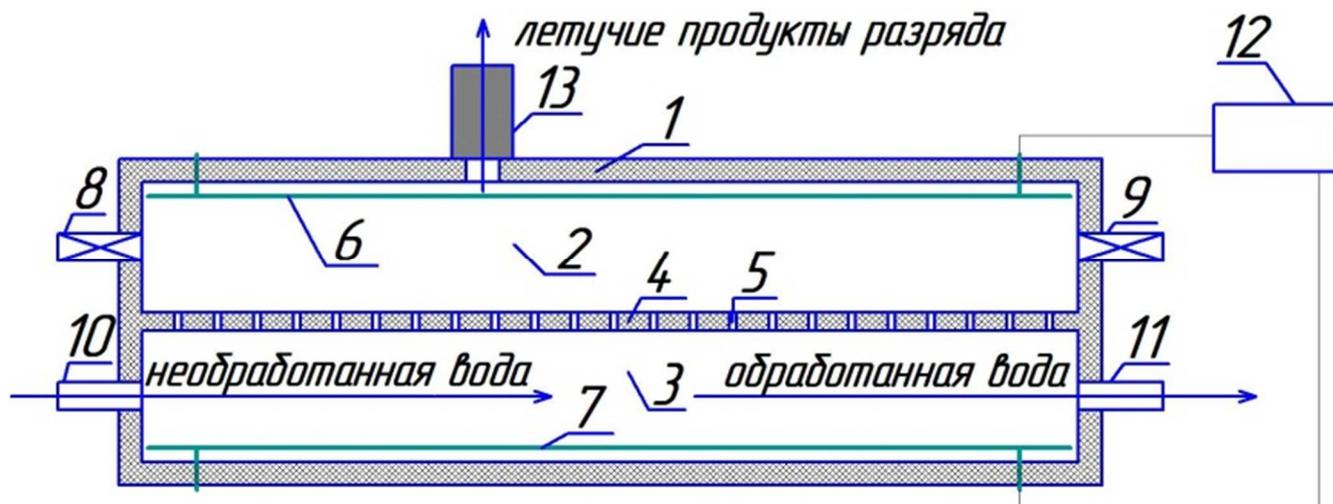


Рисунок 2.2.1 – Схема реактора ДЭР

воздушный клапан 13, через который выходят парогазовые продукты разряда.

С целью моделирования различных режимов работы реактора его патрубки могут быть закрыты в разных сочетаниях, в зависимости от необходимого режима подачи воды. Необработанная вода подается на обеззараживание через входной патрубков в камеры. На верхний и нижний металлические электроды подается от источника питания воздействующее напряжение. Диафрагменный электрический разряд образуется в отверстиях диафрагменной мембраны за счет прохождения через них тока, нагревания, вскипания воды и образования парогазовых пузырей и их пробоя под действием приложенного по обе стороны диэлектрической мембраны напряжения. В результате разряда образуются обеззараживающие продукты, которые непосредственно перемешиваются с обрабатываемой водой. Обеззараженная вода вытекает из выходного патрубка. Вода в верхней камере находится в неподвижном состоянии и в процессе работы устройства может нагреваться до температуры 90-97°C.

На рисунке 2.2.2 показано исполнение реактора. Основная часть корпуса изготовлена из винипласта, верхняя и нижняя камера имеет прозрачные стенки из оргстекла, которые припаяны к корпусу реактора. Камеры вместе с диафрагменной мембраной из фторопласта Ф4 скрепляются металлическими болтами М6. Во всех экспериментах использовались диафрагменные мембраны из фторопласта Ф4 толщиной 5 мм, с диаметрами отверстий 1,2 мм, с количеством

отверстий 80 штук.

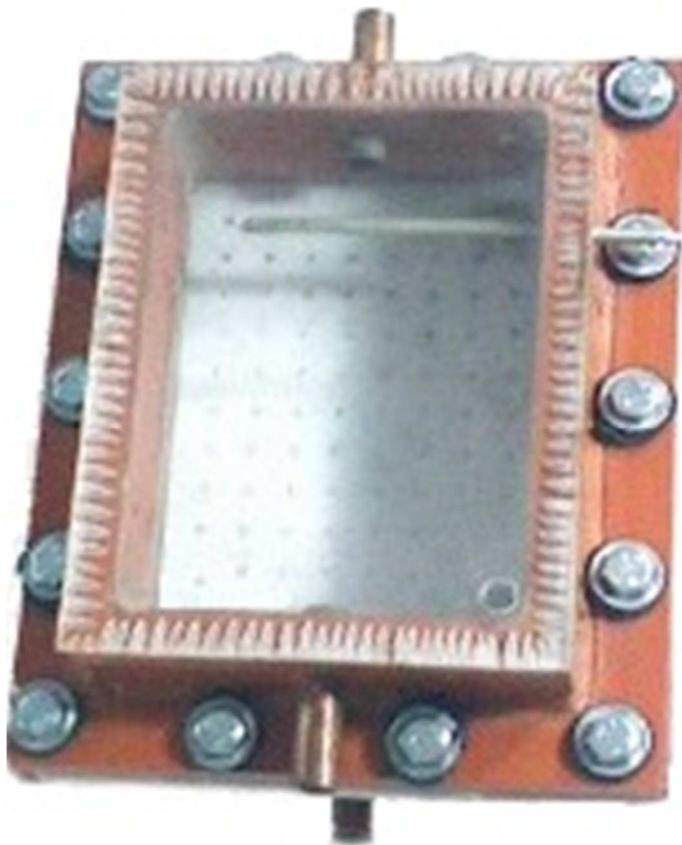


Рисунок 2.2.2 –Исполнение реактора ДЭР

2.3 Измерение тока и напряжения

Для определения импульсов тока и напряжения в реакторе ДЭР использовались активные сопротивления, включенные последовательно для измерения тока и параллельно для измерения напряжения. Полная схема подключения ВИИП, реактора ДЭР и измерительных сопротивлений указана на рисунке 2.3. Первоначально, в электрическую сеть 220 В включался счетчик электрической энергии Р11 марки ЦЭ 6807П с классом точности 1,0. К счётчику электроэнергии подключался ВИИП G1. В случае необходимости плавного регулирования напряжения на реакторе ДЭР FK1 между Р11 и G1 подключался латр марки TDGC2-5 с максимальным током нагрузки 20 А. Латр был использован в экспериментах по определению ВАХ ДЭР, образования перекиси водорода, ионов меди и серебра от амплитуды импульсов напряжения и расхода электроэнергии. Реактор ДЭР подключался к ВИИП, один электрод был

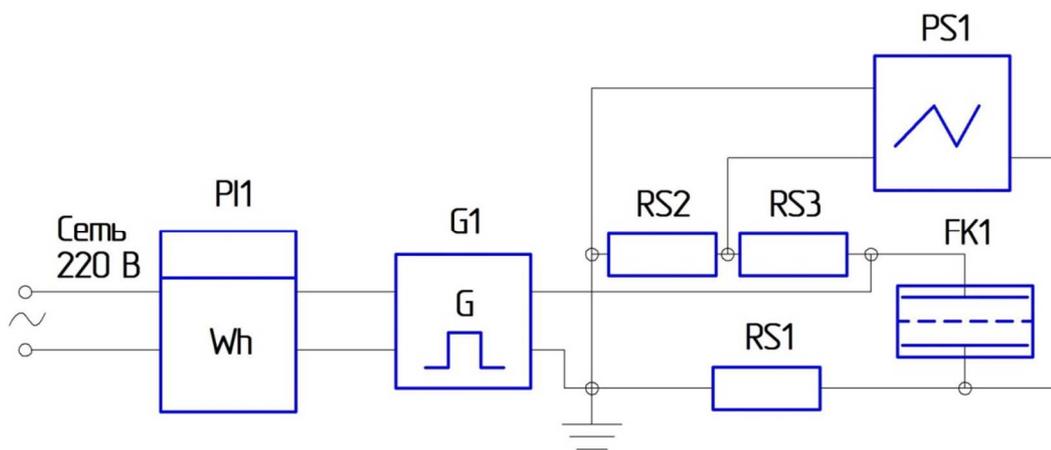


Рисунок 2.3 –Схема включения реактора ДЭР и ВИИП в сеть и подключение измерительных сопротивлений

присоединен напрямую, а второй через токовое измерительное сопротивление RS1. Проводник на выходе из G1, подключаемый токовому измерительному сопротивлению, был заземлен. В качестве измерительных сопротивлений были использованы только углеродистые низкоиндуктивные резисторы марки С1-4. Номинальное сопротивление RS1 составляло 1 Ом при его мощности рассеивания тепла 3 Вт. Сопротивление реактора ДЭР во всех рабочих режимах было более 1 кОм, т.е. больше токового измерительного сопротивления не менее чем в тысячу раз, в результате чего, включение RS1 в цепь реактора ДЭР не вносило значительные изменения в рабочий режим FK1. Общее сопротивление делителя напряжения равнялось 1,01 МОм, 1 МОм имело значение измерительное сопротивление RS3 и 10 кОм RS2. Суммарное сопротивление RS2 и RS3 было в сотни раз больше сопротивления FK1, что также способствовало малому влиянию делителя напряжения на режим работы реактора ДЭР. Измерительные щупы осциллографа PS1 Tektronix TDS 2022B подключались к RS1 и RS2 с незаземленной стороны, а щуп опорного напряжения подсоединялся к заземлению. Величина амплитуды импульсов тока определялась по закону Ома, как отношение величины напряжения на RS1 и его сопротивления. Значение амплитуды импульсов напряжения устанавливалось путем умножения сигнала с осциллографа на 101.

2.4 Методики проведения лабораторных исследований

Определение концентрации ионов меди и серебра осуществлялось ААС с помощью прибора АAnalyst 400 в сертифицированной и аккредитованной лаборатории ОАО «Лицимс», находящейся по адресу г. Чита, ул. Горького 43. В экспериментах в приборе использовалась электротермическая атомизация, имеющая низкую погрешность измерения (не более 5% в оптической плотности 0,5-2 Б) и низкий предел обнаружения концентрации элементов 0,004-4 мкг/дм, согласно паспортным данным. Большим преимуществом метода является минимальное влияние содержащихся элементов в воде на определение концентрации рассматриваемого компонента.

Концентрация перекиси водорода в исследуемых растворах устанавливалась перманганатометрическим методом, согласно ГОСТ 177-88, в лаборатории ОАО «Лицимс». Используемый метод характеризуется простотой и высокой точностью определения концентрации H_2O_2 . Согласно данному способу анализа, в ходе эксперимента отбирались 3 пробы исследуемой жидкости, и в них, независимо друг от друга, устанавливалась концентрация перекиси водорода. За результат метода принималось среднеарифметическое значение трех параллельных измерений, если абсолютное расхождение значений между ними не превышало 0,1% (согласно госту), если это значение превышало 0,1%, эксперимент считался несостоявшимся.

В экспериментах обеззараживания модельных растворов начальная концентрация культуры кишечной палочки *E. coli* и ее концентрация после завершения опытов устанавливалась по методике определения общих и термотолерантных колиформных бактерий методом мембранной фильтрации, согласно МУК 4.2.1018-01 (основной методом). Метод является наиболее точным для определения количества бактерий. Для экспериментов дезинфекции жидкостей был использован модельный раствор из водопроводной воды и культуры кишечной палочки *E. coli*, потому что она является санитарным показателем заражения воды микроорганизмами. Микробиологические исследования осуществлялись в сертифицированной и аккредитованной лаборатории ГБОУ ВПО «Читинская государственная медицинская академия», находящаяся по адресу г. Чита, ул.

Горького 39-а. Химический состав водопроводной воды, из которой с добавлением кишечной палочки *E. coli* был изготовлен модельный раствор, был установлен в лицензируемой с сертифицируемой лаборатории ООО «ИВИТРО», которая находится по адресу г. Чита, ул. Шилова, 14. Описание состава химических компонентов воды приведено в приложении №1.

Определение проводимости и уровня водородного показателя жидкостей осуществлялось измерителем параметров воды Hanna HI 9813-6, с погрешностью измерения $\text{pH} \pm 0,1$ и проводимости воды $\pm 2\%$. Калибрование шкалы проводимости и водородного показателя прибора осуществлялось калибровочными растворами Hanna по двум контрольным точкам.

3 СРАВНЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЭР И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК

3.1 Сравнение реакторов ДЭР

Основное оборудование способа обеззараживания воды ДЭР представляет собой реактор и подключенный к нему источник питания. Принцип дезинфекции заключается в том, что часть необработанной воды поступает в нижнюю камеру реактора (рисунок 2.2.1) и после обработки возвращается в основной поток. На металлические электроды реактора подается напряжение от источника питания, в потоке воды возникает электрический ток, плотность которого возрастает в отверстиях диафрагменной мембраны. Протекая через отверстия мембраны, ток вызывает нагревание, вскипание воды, парообразование и пробой парогазовых пузырей за счет возникновения перенапряжения при разрыве контура тока этими пузырями, 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 [193]. Остальные известные виды реакторов не предназначены для обработки больших объемов жидкостей, а только для экспериментальных целей, процесс протока через них каких-либо растворов не рассматривается, а в диафрагменной мембране используется только одно отверстие [152,156-161,163-180,188-190,194-196]. Применение мембраны только с одним отверстием, возможно, вызвано тем, что в большинстве исследований было применено постоянное или выпрямленное напряжение, а при их использовании для реактора ДЭР разряд возникает только в одном произвольном отверстии диафрагменной мембраны. При образовании ДЭР на постоянном и выпрямленном напряжениях в одном отверстии, в других отверстиях он не загорается. В ранее известном реакторе [193] (рисунок 3.1.1) используется способ подачи воды, при котором вся исходная вода протекает через отверстия диафрагменной мембраны. Разработанный реактор [150] (рисунок 3.1.2) имеет иной способ подачи воды, при

котором обрабатываемая вода не протекает через отверстия мембраны, а проходит только через нижнюю камеру 3. Последний способ конструктивно отличается от первого тем, что в верхней камере устанавливается автоматический выпускной воздушный клапан для выхода летучих продуктов разряда, а входной патрубком смещается ниже диафрагменной мембраны. Несмотря на несущественные конструкционные различия, меняется способ обработки воды и его эффективность.

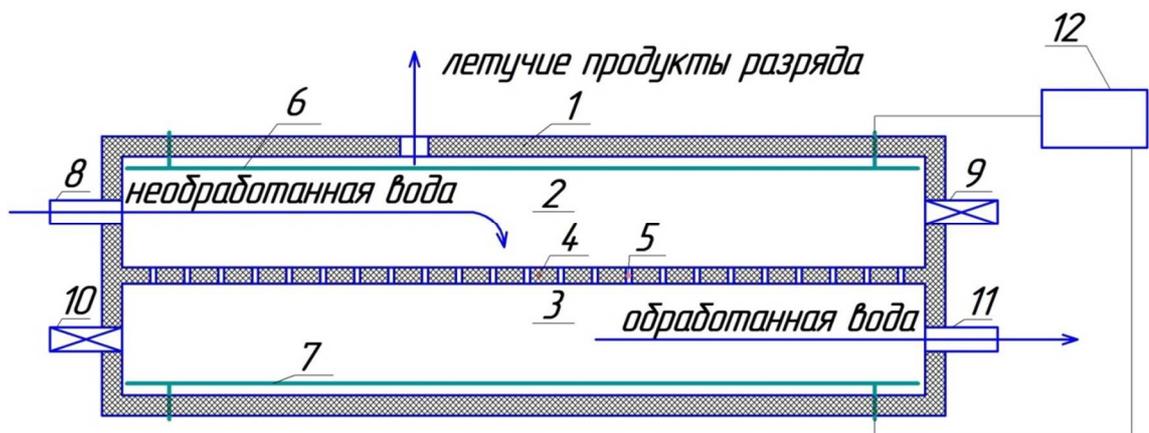


Рисунок 3.1.1 – Реактор с протоком воды через отверстия в диафрагменной мембране

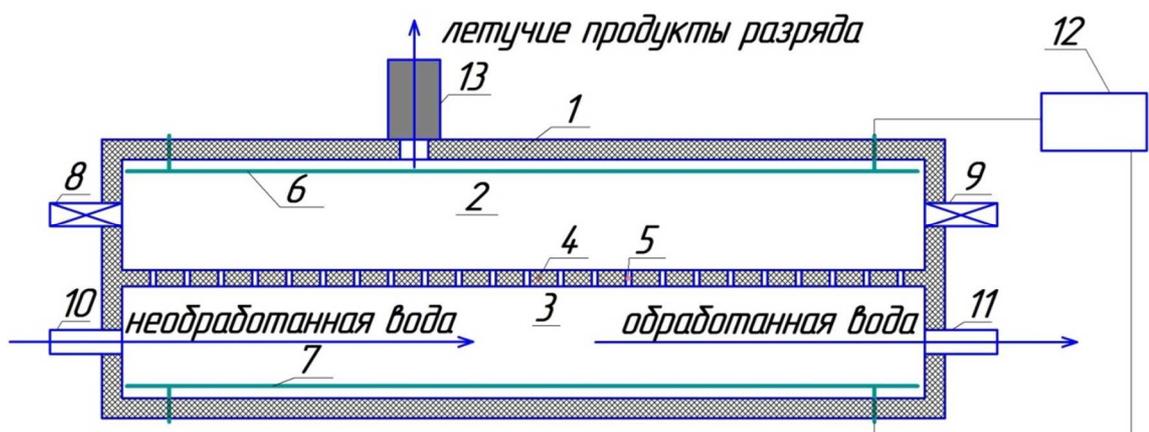


Рисунок 3.1.2 – Реактор с горизонтальным протоком воды относительно диафрагменной мембраны

Основные различия рассмотренных способов подачи жидкостей в том, что во втором случае обрабатываемая вода не протекает через отверстия диафрагменной мембраны и не смываются предразрядные продукты (парогазовые пузырьки), а в верхней части камеры вода остается неподвижной и может

нагреваться до температуры 90-97°C, что способствует улучшению образования парогазовой смеси и увеличению интенсивности разряда. Более интенсивный разряд при одинаковом потреблении электроэнергии повышает образование всех бактерицидных агентов при использовании напряжения, входящего в оптимальный рабочий диапазон для ДЭР. Перетекания нагретой воды из верхней части камеры в нижнюю не происходит за счет разной плотности теплой и горячей воды, температура воды в нижней части камеры обычно не превышает 60°C. 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 рабочее напряжение и напряжение зажигания ДЭР, уменьшаются рабочие токи устройства. Снижение рабочих токов способствует увеличению срока эксплуатации диафрагменной мембраны, потому что меньше изнашиваются отверстия в ней. Значительно сокращается потребление электрической энергии из-за снижения рабочих токов и напряжений.

Сравнение реактора с горизонтальным протоком воды относительно диафрагменной мембраны и реактора с протоком воды через отверстия в диафрагменной мембране производилось по разности концентрации образовавшейся перекиси водорода H_2O_2 . В экспериментах использовался ВИИП, с установленной выходной амплитудой импульсов 2,0 кВ, их длительностью 7 мкс и скважностью 2,02. Во всех опытах в реакторе, емкостью 0,7 литров, была установлена одна и та же диафрагменная мембрана. В разрядных камерах реактора использовались медные электроды, расположенные симметрично относительно диафрагменной мембраны на расстояниях по 1 см. Для обоих реакторов в экспериментах расходы модельных растворов дистиллированной воды и NaCl, с проводимостью 0,45 мСм/см, Ph 7,2, составили по 4 литра, затрачено на обработку жидкостей по 250 Вт·ч электрической энергии. Скорость протока воды в экспериментах составляла 0,4 л/мин, при этом, скорость движения через диафрагму для реактора с протоком воды через отверстия в диафрагменной мембране составила 0,077 м/с, что входит в наиболее эффективный интервал

скоростей для этого реактора, согласно [149]. Сгенерированной перекиси водорода в реакторе, изображенном на рисунке 3.1.1, было установлено 0,58 мг/Вт·ч, а в реакторе, представленном на рисунке 3.1.2, 0,87 мг/Вт·ч, что на 50% выше, чем в первом опыте. Эксперимент был повторен 5 раз с различными расходами воды, но с неизменной скоростью протока воды через реакторы 0,4 л/мин, во всех результатах выход H_2O_2 для нового реактора ДЭР был выше на 40-50%.

3.2 Сравнение источников питания ДЭР

Источниками питания технологии обеззараживания воды ДЭР могут служить источники с различными формами напряжений. Каждые источники обладают своими преимуществами и недостатками. Одной из целей исследования ДЭР являлось выяснить, какая из форм напряжения более эффективна для обеззараживания воды: синусоидальная или импульсная. Постоянное и выпрямленное напряжение не рассматривалось по причине технической проблемы реализации реакторов ДЭР при питании от этих напряжений. Во время использования постоянного и выпрямленного напряжений разряд образуется только в одном отверстии диафрагменной мембраны, что приводит к его быстрому прогоранию и расширению. Увеличение диаметра отверстий способствует резкому ухудшению эффективности обеззараживания ДЭР и повышению вероятности образования дугового разряда. Для практической реализации реакторов ДЭР с наиболее продуктивными параметрами диафрагменной мембраны (диаметр отверстий 1,2 мм, толщина 5 мм) при питании от постоянного или выпрямленного напряжения необходимо было бы изготовление большого количества реакторов, подключенных параллельно, и применение диафрагменной мембраны из тугоплавких диэлектрических материалов. Перечисленные факторы создают техническую сложность применения такой системы стерилизации воды.

Все источники питания обладают своими внутренними сопротивлениями и, следовательно, потерями электроэнергии во время работы, которые необходимо

учитывать при сравнении этих источников. Выход обеззараживающих продуктов зависит от величины воздействующего напряжения, поэтому, в экспериментах оно поддерживалось практически на одном уровне. Опыты проводились в статическом режиме реактора (без протока воды). В качестве модельного использовался раствор из дистиллированной воды и хлорида натрия NaCl с проводимостью 0,45 мСм/см, водородным показателем Ph 7,3.

Среднее электрическое сопротивление реактора с одной и той же диафрагменной мембраной и одним модельным раствором практически одинаково при различных формах напряжения, следовательно, подавая на реактор от источников питания одинаковые мощности, мы получаем практически одинаковые действующие напряжения и токи. Источники питания для исследований были сконструированы с одинаковыми мощностями, равными 4 кВт, следовательно, они имели практически равные внутренние сопротивления. Сопротивление исследуемого реактора с модельным раствором проводимостью 0,45 мСм/см составляло 2,8 кОм (определено методом амперметра и вольтметра при питании от ВИИП в режиме отсутствия образования парогазовых пузырей), сопротивления источников питания в данном случае были на порядки ниже, и их разница не вносила воздействие на полученные результаты. Источники питания подключались в одном и том же месте, поэтому, сопротивление системы питания было для них одинаково. Равные подаваемые мощности контролировались счетчиком электрической энергии и секундомером. Счетчик электроэнергии подключался до источников питания и их внутренние потери суммировались к потребленной на эксперимент энергии. На каждый опыт было затрачено по 50 Вт·ч за 60 секунд, эксперимент был повторен 3 раза на разных мощностях. 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 составляло 1,69 кОм. В результате, перекиси

водорода от ДЭР при питании от ВИИП образовалось 1,54 мг/Вт·ч, в то время как в разряде от переменного синусоидального напряжения ее было всего 0,76 мг/Вт·ч, что согласуется с [149]. Причиной этому могло служить то, что ДЭР от импульсного напряжения был намного интенсивней, стримеры были длиннее (точные измерения не производились) и шум разряда практически отсутствовал в сравнении с использованием синусоидального напряжения. Показатели выхода перекиси водорода на уровне 1,54 мг/Вт·ч являются не самыми высокими для электроразрядных технологий. Максимов А.И., Стройкова И.К. исследовали стерилизационные способности тлеющего разряда и ДЭР [190]. Авторы отмечают более сильные бактерицидные свойства ДЭР и его длительный эффект последствия, не смотря на то, что выход перекиси водорода в их работах был выше у тлеющего разряда [178]. Причиной этому, по их мнению, служит то, что на обеззараживание воды влияет не только H_2O_2 и другие активные формы кислорода, но и структурное изменение воды, которое проявляется в большей степени у ДЭР.

3.3 Вольт-амперная характеристика ДЭР

Для определения характера ДЭР необходимо было определить его вольт-амперную характеристику (ВАХ). Исследование ВАХ ДЭР проводилось в статическом режиме работы реактора на водопроводной воде с температурой 30 °С, ее водородным показателем Ph 7,4 и проводимостью 0,45 мСм/см. Длительность импульсов напряжения составляла 7 мкс, скважность 2,02, и скорость нарастания амплитуды около 200 В/с.

Амплитуда импульсов и их длительность влияют на пробивную способность воздействующего напряжения, которое создает разряд в паровоздушных пузырьках, образующихся в отверстиях диафрагменной мембраны. Форма импульсов напряжения изображена на рисунке 3.3.1. Импульсы тока полностью совпадали по внешнему виду с импульсами напряжения, сдвиг между ними отсутствовал на всех длительностях. Образование пузырьков происходит в отверстиях диафрагменной мембраны за счет джоулева нагрева

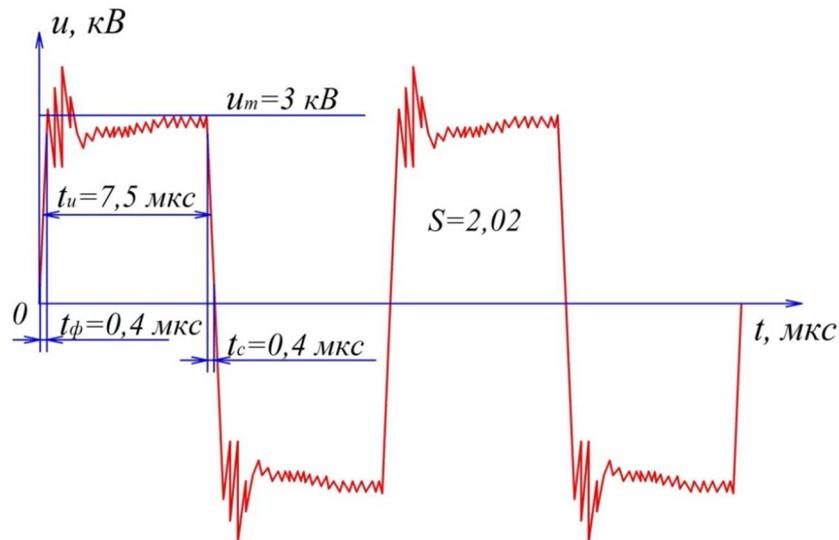


Рисунок 3.3.1 – Импульсы напряжений ВВИП

воды протекающим электрическим током, плотность которого в отверстиях мембраны в сотни раз превышает плотность тока за их пределами. В результате происходящих процессов ВАХ реактора ДЭР, питающегося от ВВИП с разнополярными импульсами, весьма нелинейная, имеет серпообразный характер (рисунок 3.3.2) и зависит в большей степени от образования паровоздушной

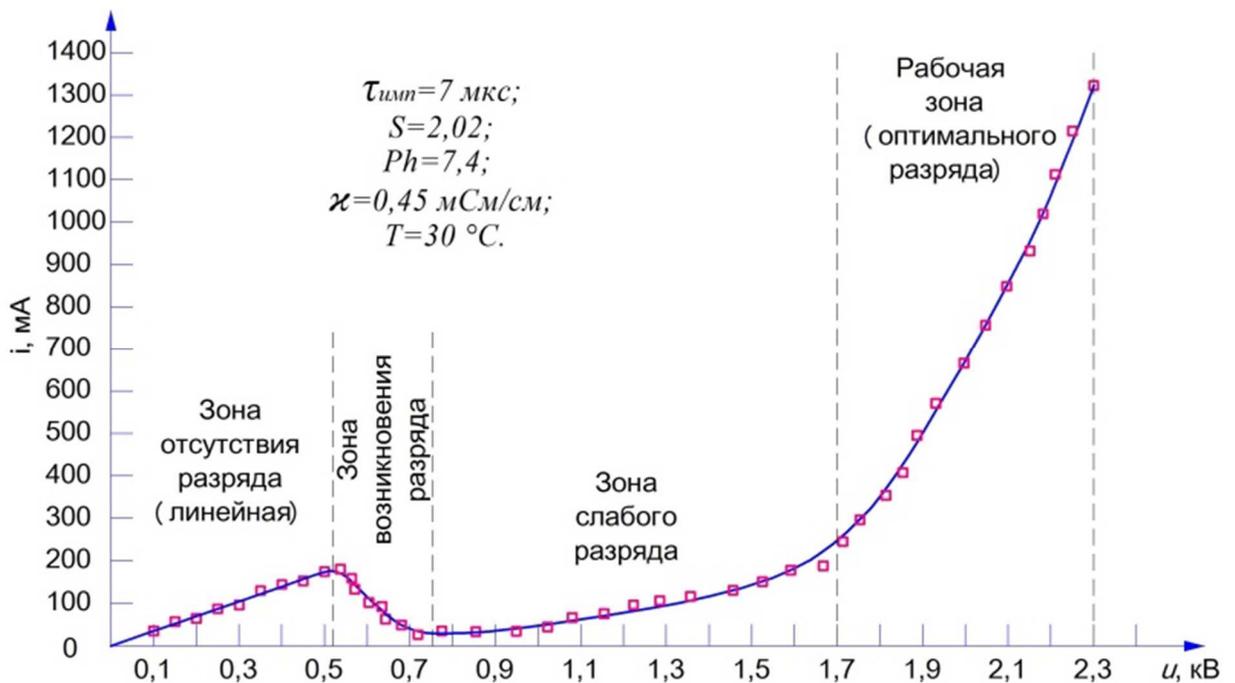


Рисунок 3.3.2 - Вольт-амперная характеристика ДЭР

смеси, чем от сопротивления воды. На участке амплитуд импульсов напряжений от 0 до 525 В ток растет линейно, пропорционально напряжению, так как разряд

при данных напряжениях отсутствует. В работах Krčma F., Hlavatá L., Hlochová L. и др. [188], в которых исследовался ДЭР на постоянном напряжении в реакторе с одним отверстием в диафрагменной мембране, сложно выделить аналогичный участок, он практически сливается с остальными (рисунок 1.5.5). Возможно, это вызвано разной природой ДЭР на постоянном и импульсном напряжениях. 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. В работе [188] этот участок отсутствует, несмотря на то, что разряд на постоянном напряжении также образуется после образования парогазовых пузырей. 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 [192]) и нелинейному увеличению ее проводимости. В исследованиях [188] ВАХ ДЭР тоже нелинейная, но сложно отметить одинаковые участки характеристик на постоянном и импульсном напряжениях. В случае использования импульсов напряжения, после значений амплитуд импульсов более 755 В ВАХ растет нелинейно, но равномерно, в отличие от ВАХ на постоянном напряжении. При питании реактора ДЭР от постоянного напряжения образование разряда сопровождается броском тока, что вероятнее всего связано с увеличением проводимости жидкости в одиночном разрядном отверстии. В итоге можно сделать вывод, что ВАХ ДЭР на импульсном и постоянном напряжении значительно отличаются.

3.4 Исследование потребляемой мощности ДЭР в зависимости от температуры обрабатываемой жидкости

Во время проведения экспериментов с ВАХ ДЭР было установлено, что она практически не изменяется и имеет одну и ту же форму при температурах воды от

2 до 60 °С. Исследования подтверждают предположение о зависимости ВАХ ДЭР в основном от образования парогазовой смеси, а не от сопротивления воды, которое изменяется от температуры не линейно. При более высоких температурах жидкостей происходит более интенсивное парообразование в отверстиях диафрагменной мембраны, в результате чего, потребляемая мощность разрядами резко падает без уменьшения интенсивности разряда (рисунок 3.4). Исследование

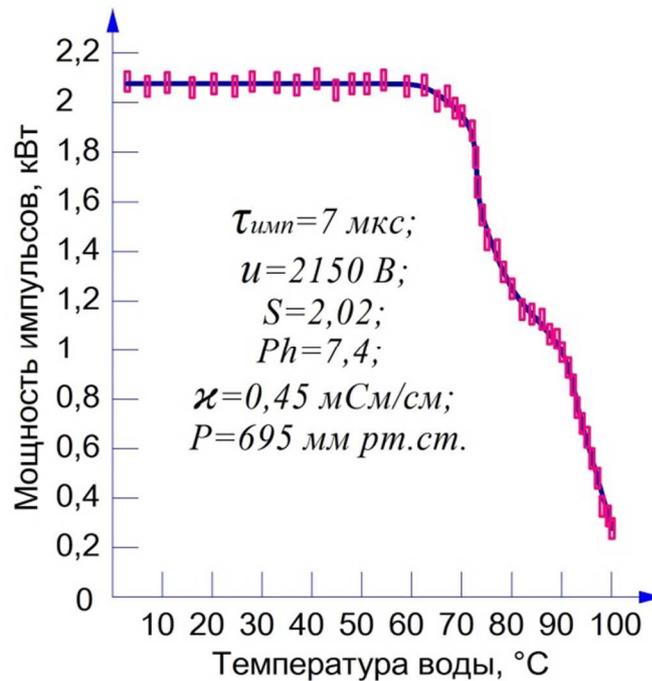


Рисунок 3.4 - Зависимость потребляемой мощности реактора ДЭР от температуры обрабатываемой воды

зависимости потребляемой мощности реактором ДЭР от температуры воды проводились при тех же условиях, что и в исследовании 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 ниже характеристики был сконструирован реактор с горизонтальным протоком воды относительно диафрагменной мембраны [150]. Рабочая температура верхней камеры, на основании рис. 3.4 находится в диапазоне 90-97 °С, нижней камеры выше исходной температуры жидкости не более чем на 5 °С.

В отличие от реактора, в котором вода проходит через отверстия в диафрагменной мембране [149,162] (из камеры 2 в 3, рисунок 3.1.1), в новом варианте в верхней камере реактора вода неподвижна и нагревается практически до температуры кипения. Высокая температура воды поддерживает интенсивность разряда при меньших потребляемых мощностях и, соответственно, затрат на электроэнергию. В нижней части камеры вода непрерывно перемещается и нагревается незначительно, в результате чего, выход бактерицидных агентов выше при одинаковом потреблении электроэнергии [150,153,154].

4 ОБРАЗОВАНИЕ ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА ОТ ДЭР

4.1 Образование перекиси водорода в зависимости амплитуды импульсного напряжения

Выход перекиси водорода при обработке жидкостей ДЭР существенно зависит от величины напряжения. В работе Юдина А.С. [149] показан выход H_2O_2 в реакторе с протоком воды через отверстия в диафрагменной мембране в статическом режиме в зависимости от величины переменного напряжения промышленной частоты без учета расхода электроэнергии. Схожий эксперимент был исследован на реакторе с горизонтальным протоком воды относительно диафрагменной мембраны, при питании от ВИИП с длительностью импульсов и их скважностью 7 мкс и 2,02 соответственно. На каждую исследованную контрольную точку было затрачено по 50 Вт·ч электрической энергии и по 7 литров модельного раствора. Изучены были амплитуды напряжений от 1,5 до 2,7 кВ. В реакторе использовались медные электроды. В качестве модельного раствора использовалась дистиллированная вода с NaCl, проводимостью 0,45 мСм/см, Ph 7,2. Зависимость выхода перекиси водорода от амплитуды импульсного напряжения изображена на рисунке 4.1.

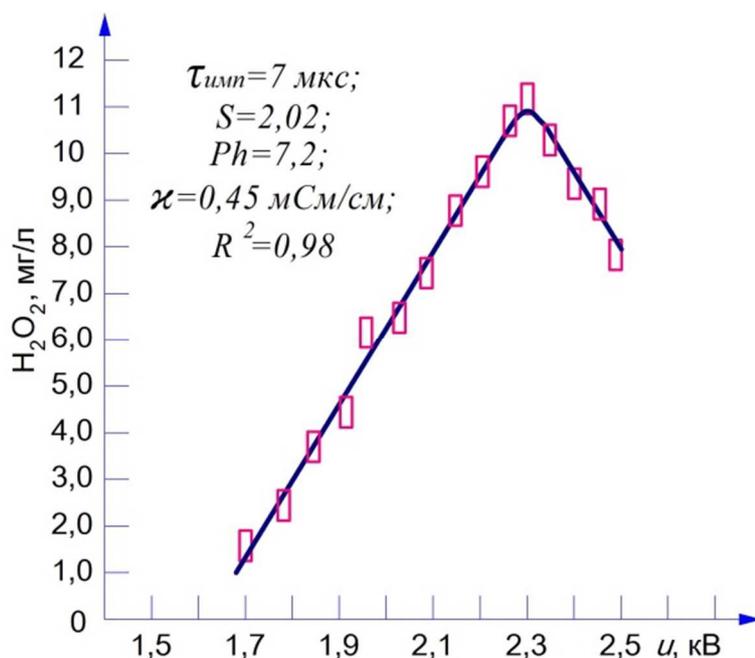


Рисунок 4.1 – Зависимость выхода перекиси водорода от амплитуды импульсного напряжения с медными электродами в реакторе

Диапазон исследуемых мгновенных напряжений был определен экспериментальным путем и взят в интервале от 1,5 кВ до 2,7 кВ. При напряжениях ниже 1,7 кВ ДЭР был низкой интенсивности, при напряжениях выше 2,5 кВ происходили короткие замыкания, сопровождающиеся взрывом продуктов разряда в реакторе. Из зависимости, приведенной на рисунке 4.1 видно, что на участке напряжений от 1,7 кВ до 2,3 кВ кривая носит линейный нарастающий характер, а после 2,3 кВ линейный убывающий, причем угол спада кривой равен углу нарастания. Изображенная зависимость доказывает то, что увеличение напряжения питания ДЭР имеет положительный эффект до определенной переломной точки, после которой повышение напряжения носит отрицательный результат. Слишком высокое напряжение разряда увеличивает его мощность и соответственно энергозатраты в разряд, что негативно влияет на удельный выход обеззараживающих продуктов [150], если вода же требует более эффективной обработки, ее можно увеличить путем многократного пропускания через реактор. В результате, можно выделить наиболее продуктивный диапазон импульсов напряжений в интервале от 2,0 до 2,3 кВ.

4.2 Образование перекиси водорода в зависимости от длительности импульсов напряжения

В отличие от большинства источников питания на переменном напряжении частотой 50 Гц, ВИИП обычно имеют возможность регулирования длительности импульсов. Было установлено, что длительность импульсов также как и их амплитуда влияет на выход дезинфицирующих компонентов (рисунок 4.2). В

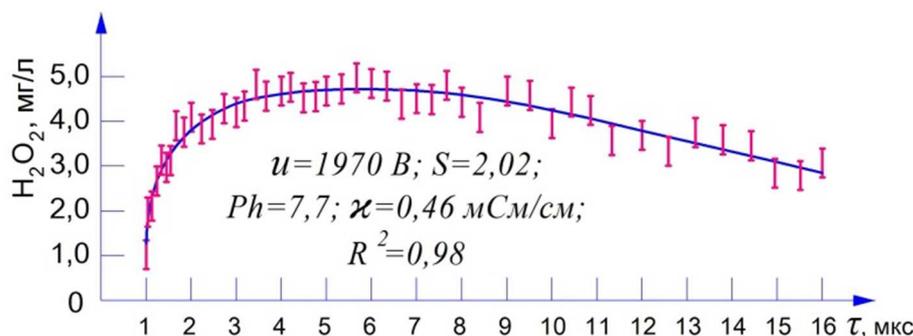


Рисунок 4.2 – Зависимость генерирования перекиси водорода H_2O_2 от длительности импульсов напряжения

исследованиях использовался ВИИП с диапазоном регулирования длительностей импульсов от 1 до 16 мкс. Эксперименты проводились на ректоре с серебряными электродами, в динамическом режиме на модельном растворе дистиллированной воды и NaCl проводимостью 0,46 мСм/см, Ph 7,7. На каждый опыт было затрачено 50 Вт·ч электрической энергии и 7 литров исследуемого раствора. Амплитуда и скважность импульсов на протяжении всех экспериментов были неизменны 1970 В и 2,02 соответственно, а длительность импульсов изменялась от 1 до 16 мкс. Начальная температура воды составляла 20 °С, конечная температура колебалась около 23 °С. На основании рисунка 4.2 можно сделать вывод, что оптимальная длительность импульсов, при которой достигается наибольшая производительность перекиси водорода, находится в диапазоне 4-8 мкс. При значениях длительностей импульсов менее 4 мкс наблюдается низкая производительность исследуемого бактерицидного агента. Это 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 тепловых потерь.

4.3 Образование перекиси водорода в зависимости от проводимости модельного раствора

Важной задачей являлось установление зависимости выхода перекиси водорода от проводимости воды при фиксированном расходе электроэнергии. Проводимость вод в различных условиях не одинаковая, поэтому необходимо было выяснить характер влияния на обеззараживание жидких сред их проводимости. Исследование зависимости выхода перекиси водорода от проводимости воды производились в динамическом режиме реактора, на мгновенном максимальном напряжении ВИИП 1,7 кВ с длительностью импульсов 7 мкс, с серебряными электродами, на модельном растворе дистиллированной воды с NaCl. На каждую исследуемую точку было затрачено 50 Вт·ч электрической энергии и 7 литров жидкости (рисунок 4.3). Было выбрано

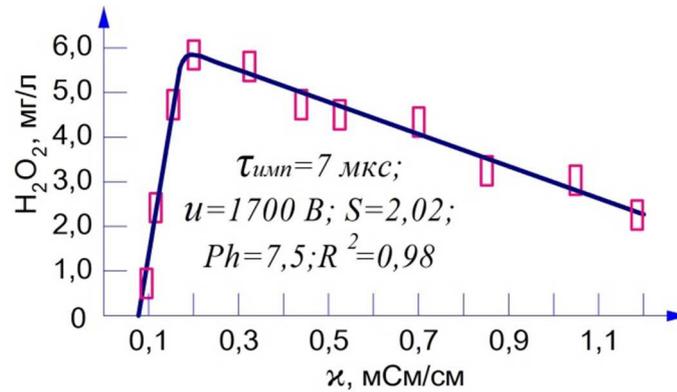


Рисунок 4.3 – Зависимость выхода перекиси водорода от проводимости воды

практически минимальное эффективное напряжение ДЭР по причине того, что на более высоких амплитудах напряжений возможный исследуемый диапазон проводимости растворов был намного меньше. Например, при амплитуде импульсов 2,3 кВ и проводимости растворов 0,9 мСм/см, (в среднем в 2 раза большей, чем у водопроводной воды) уже происходили короткие замыкания в реакторе, которые препятствовали проведению экспериментов. На графике видно, что на участке проводимости от 0,07 мСм/см до 0,17 мСм/см происходило резкое увеличение концентрации H₂O₂ из-за нарастания интенсивности разряда, при значениях проводимости ниже 0,07 мСм/см разряд на используемом напряжении почти полностью отсутствовал. На участке от 0,17 до 1,2 мСм/см наблюдался линейный спад производительности, связанный с увеличением тепловых потерь на процесс обработки воды. За пределами значений 1,2 мСм/см возникали короткие замыкания, сопровождающиеся взрывом продуктов разряда в реакторе, из-за чего исследования проводимостей выше 1,2 мСм/см были сложно осуществимы.

Stará Z. в своей работе [168] приводит исследования образования перекиси водорода в зависимости от проводимости электролита при использовании реактора ДЭР с одним отверстием в разделяющей мембране без какого-либо протока воды, при питании реактора от источника постоянного напряжения (рисунок 1.5.6). В лабораторных экспериментах использовались модельные растворы из дистиллированной воды с NaCl и Na₂HPO₄. Максимумы образования H₂O₂ для растворов с хлоридом натрия и гидрофосфатом натрия были

установлены на разных проводимостях. Автор не комментирует причины нарастаний, спадов и наличия экстремумов зависимостей. Stará Z. не отмечает величины, которые были неизменными в ходе экспериментов, например, время обработки, энергозатрат, температура воды, в результате чего до конца не понятны характеры зависимостей исследования. Gupta S. В. в своих исследованиях обеззараживания воды подводным импульсным коронным разрядом [114] также установил зависимость выхода перекиси водорода от проводимости воды (рисунок 1.3.4). Неизменной величиной во всех точках графика экспериментов являлся расход электрической энергии. Самая низкая проводимость, рассматриваемая в лабораторных опытах, была 0,2 мСм/см. Меньшую проводимость немецкий ученый не рассматривал, возможно, из-за отсутствия импульсного коронного разряда в воде или его низкой интенсивности. Автор отмечает линейное уменьшение выхода H_2O_2 с увеличением проводимости. Зависимость на рисунке 1.3.4 по своей структуре схожа с рисунком 4.3, если на последнем не рассматривать линейное нарастание концентрации перекиси водорода на участке от 0,07 до 0,17 мСм/см. Отличаются графики скоростью падения концентрации бактерицидного агента. На линейном участке спада концентрация H_2O_2 на рисунке 4.3, в случае увеличения проводимости на 0,01 мСм/см в среднем уменьшается на 4,7 мкг/Вт, у Gupta S. В. в реакторе обработки воды импульсным коронным разрядом она снижается более круто, на 10,2 мкг/Вт.

Проводимость питьевых и сточных вод в большинстве случаев выше значения 0,17 мСм/см. На основании эксперимента можно сделать вывод, что с увеличением проводимости обрабатываемой воды эффективность технологии ДЭР падает. Одним из путей решения этой проблемы является применение барботирования. Этот процесс снизит проводимость воды и увеличит интенсивность разряда, что было доказано в главе 3.3 и 3.4, потому что интенсивность ДЭР в основной степени зависит от образования парогазовых пузырьков, а не от сопротивления воды. Исследование реактора ДЭР с использованием барботирования не входило в рабочие задачи представленной работы.

4.4 Влияние геометрических параметров реактора ДЭР на процесс обеззараживания

Геометрия разрядных камер всегда значительно влияет на продуктивность электроразрядных технологий [60]. Для реакторов ДЭР исследована большая часть всех известных параметров геометрии, но малая их часть остается не исследованной и какая-то еще неизвестной [149]. Например, одним из неизвестных ранее параметров реактора ДЭР являлся угол наклона к горизонтальной плоскости земли диафрагменной мембраны. Для его определения в настоящей работе были рассмотрены два основных расположения диафрагмы: вертикальное и горизонтальное относительно плоскости земли. Условия проведения экспериментов были практически идентичны с условиями исследования зависимости образования перекиси водорода от амплитуды импульсов напряжений (глава 4.1), только их амплитуда в этих экспериментах была неизменной 2,3 кВ, а изменялась только ориентация диафрагменной мембраны в пространстве. В результате, выход перекиси водорода в горизонтальном расположении диафрагменной мембраны составил 11 мг/л, а в вертикальном 5 мг/л, что меньше более чем в 2 раза. Эксперимент был неоднократно повторен, но все результаты отличались лишь на величину погрешности методики определения концентрации перекиси водорода. Генерация H_2O_2 с вертикальным положением диафрагмы менее эффективна из-за локализации ДЭР только в верхней части диафрагменной мембраны на площади, равной приблизительно 1/3 от рабочей площади мембраны. Такая локализация ДЭР образовывалась по причине более низкой плотности воды и более высокой ее температуры в верхней части реактора, даже при нагревании воды до температуры кипения расположение разряда не менялось. На основании проведенного исследования можно утверждать, что наибольшая производительность обеззараживания будет при горизонтальном положении мембраны, без отклонения угла плоскости мембраны от ровной поверхности места расположения реактора.

Эксперименты с аналогичными условиями были проведены на реакторе с горизонтальным расположением диафрагменной мембраны, но с различными расстояниями электродов до диафрагменной мембраны, с целью определения зависимости выхода бактерицидных агентов от этих расстояний. Контрольные расстояния составили 0,5 см, 2 см и 3,5 см от электродов до диафрагмы, они регулировались у обоих электродов, в данном исследовании симметрично относительно мембраны. Для всех трех положений электродов образование перекиси водорода было 11,1 мг/л, 11 мг/л и 11 мг/л соответственно. Разность выхода H_2O_2 входила в пределы погрешностей измерений. Возможно, расстояния электродов от диафрагмы будут влиять на производительность реактора по бактерицидным агентам, но при более длинных расстояниях, чем исследованные. Связь такой зависимости, возможно, будет от потери напряжения в толще воды между электродами, что соответственно приведет к снижению генерации обеззараживающих продуктов.

5 ОБРАЗОВАНИЕ ИОНОВ МЕДИ И СЕРЕБРА ОТ ДЭР

5.1 Образование ионов меди и серебра в зависимости от амплитуды импульсного напряжения

Неотъемлемым фактором обеззараживания воды ДЭР является олигодинамический эффект стерилизации. С древних времен благородные металлы использовались для обеззараживания воды [148]. Известно, что вода, отстоявшаяся небольшой промежуток времени в сосуде, сделанном из серебра или меди, не только обеззараживается, но и становится бактерицидной [37]. Впервые в научном мире антимикробные действия серебра и меди описал швейцарский ботаник Карл Негель. Он наблюдал гибель микроорганизмов в воде при концентрациях в ней металлов, составляющих миллионные доли от количества раствора, т.е. следовые. Проникая в клетки микроорганизмов, ионы дезинфицирующих металлов блокируют их жизнедеятельность, что приводит к гибели бактерий [149]. В 2012 году ученые из Хьюстона (США) доказали, что основой обеззараживания являются ионы металлов, а не их нано частицы [191]. Также известно, что совместное присутствие ионов серебра и меди усиливает антимикробный эффект, в отличие от отдельного воздействия [37].

В лабораторных исследованиях ДЭР были установлены зависимости концентрации ионов меди Cu^{2+} и серебра Ag^+ от различных факторов. Юдин А.С. в своих исследованиях доказал, что образование ионов металлов в реакторе ДЭР не укладываются в законы классической электрохимии [149]. Одним из факторов выхода 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 ААС. В поваренной соли, которая используется ингредиентом в модельном растворе, и в дистиллированной воде (не деионизированной) обычно присутствует определенная концентрация ионов меди, в исходном модельном

растворе проводимостью 0,45 мСм/см суммарная ее концентрация равнялась 0,058 мг/л. На протяжении всего опыта использовался только один заранее приготовленный модельный раствор. Итоговые результаты зависимости образования ионов Cu^{2+} были получены путем разности полученных данных после обработки жидкости и исходного значения ионов меди до обработки, т.е. все значения уменьшались на 0,058 мг/л. Содержание ионов серебра в дистиллированной воде и препарате NaCl не было обнаружено. Зависимости образования ионов металлов от амплитуды импульсов показаны на рисунке 5.1.

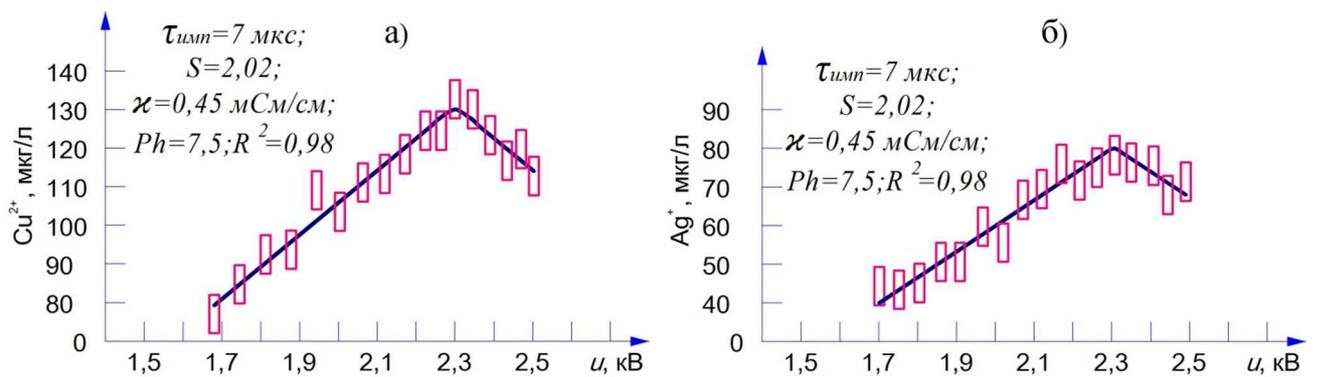


Рисунок 5.1 - Зависимости выхода ионов меди (а) и ионов серебра (б) от мгновенного импульсного напряжения

Формы зависимости выхода Cu^{2+} и Ag^+ схожи с зависимостью выхода перекиси водорода. Кривые прямолинейно нарастают от значения 1,7 кВ до 2,3 кВ, значения менее 1,7 кВ не рассматривались, потому что при них разряд был слабой интенсивности, и ионизация модельного раствора была низкой. При превышении амплитуд импульсов выше 2,3 кВ генерация ионов уменьшается, что связано с увеличением тепловых потерь на обработку жидкости. Увеличение джоулевых потерь привело к снижению удельной ионизации модельного раствора по отношению к потребленной электроэнергии. Приведенные зависимости показывают, что увеличение напряжения и энергозатрат в разряд имеет положительный эффект ионизации воды до определенного значения напряжения, после которого их повышение имеет отрицательный результат. Аналогичную закономерность для активных форм барьерного разряда обнаружил Я.И. Корнев [51]. Кривые образования ионов меди и серебра имеют разные углы наклона, что

свидетельствует о разных характерах выхода ионов металлов при одинаковых условиях. При всех значениях напряжений генерация Cu^{2+} интенсивней Ag^+ (в среднем на 40-50 мкг/л из-за меньшей окисляемости серебряных электродов в сравнении с медными). Таким образом, наиболее продуктивный диапазон импульсов напряжений характеристики, приведенной на рис. 5.1, находится в пределах от 2,0 до 2,3 кВ.

5.2 Образование ионов меди и серебра в зависимости от длительности импульсов напряжения

В связи с определением зависимости образования ионов металлов от амплитуды импульсов напряжения, необходимо было установить зависимости выхода этих ионов от длительности импульсов напряжения. Эксперименты по определению наиболее эффективной длительности импульсов для выхода ионов меди и серебра осуществлялись в условиях, аналогичных условиям определения концентрации ионов металлов в главе 5.1, отличающиеся тем, что была установлена неизменной амплитуда импульсов 1970 В, а длительность импульсов изменялась от 1 до 16 мкс.

Регулирование амплитуды импульсов влияет на выход перекиси водорода. Было также установлено, что длительность импульсов влияет и на образование ионов металлов (рисунок 5.2 а и б). Также как и на зависимости образования H_2O_2 на рисунке 4.2 оптимальная длительность импульсов, при которой достигается наибольшее образование ионов металлов, находится в диапазоне 4-8 мкс. При значениях длительностей импульсов менее 4 мкс наблюдается низкая производительность исследуемых бактерицидных агентов, что связано с недостаточным временем воздействия напряжения, которое требуется для развития разряда. Снижение ионизации модельного раствора также зафиксировано в случаях длительностей импульсов более 8 мкс, причиной чему, возможно, служит увеличение джоулевого нагрева воды.

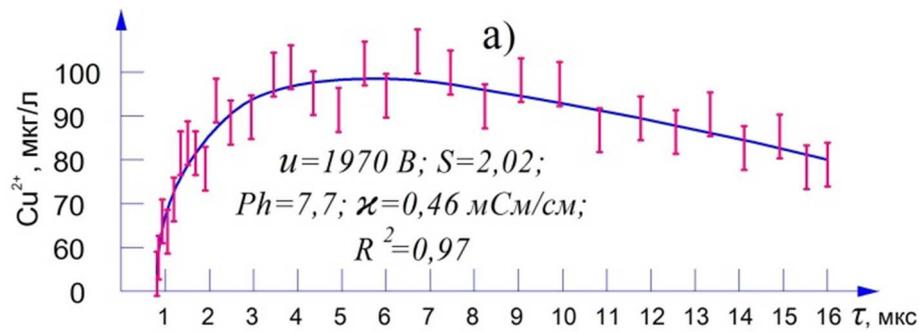


Рисунок 5.2 а - Зависимость образования ионов меди Cu^{2+} от длительности импульсов напряжения

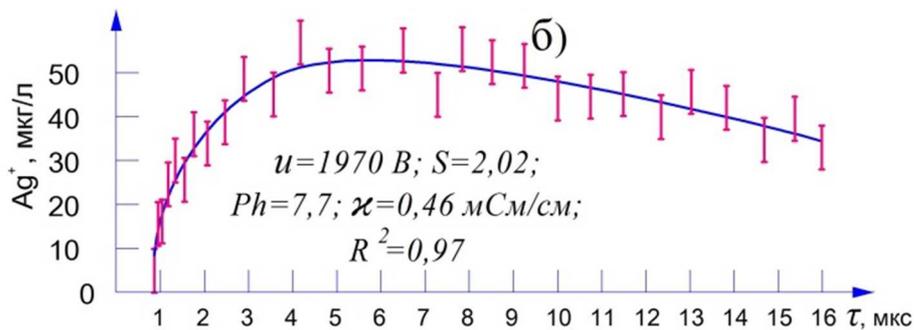


Рисунок 5.2 б - Зависимость образования ионов серебра Ag^+ от длительности импульсов напряжения

5.3 Влияние проводимости модельного раствора на выход ионов меди и серебра

Проводимость воды также влияет на выход ионов серебра и меди, как и на генерацию перекиси водорода, что подтвердил следующий эксперимент, результаты которого изображены на рисунке 5.3. Условия исследования практически аналогичны условиям в главе 4.3. Отличались они тем, что в начале опытов была заготовлена дистиллированная вода в объеме 100 л. Вода находилась в нескольких бутылках, и все бутылки были между собой тщательно перемешаны так, что исходная концентрацией ионов меди составляла в них 0,024 мг/л. Отдельно была заготовлена бутылка с модельным раствором дистиллированной воды и NaCl проводимостью 3 мСм/см. Изготовление модельного раствора для исследований требуемой проводимости происходило путем смешивания в определенной пропорции жидкостей из емкостей без поваренной соли и с ней. Проведенный ход работы был необходим для равномерного распределения в воде

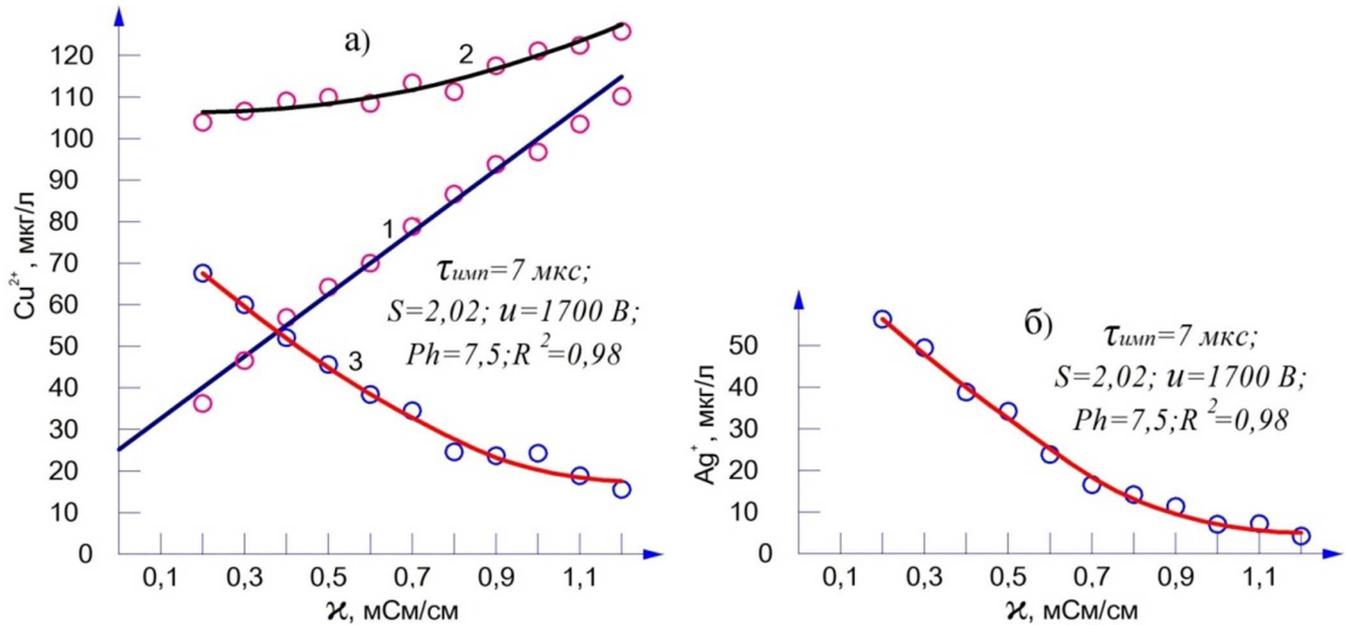


Рисунок 5.3 а, б - Зависимости образования ионов меди (а) и серебра (б) от проводимости модельного раствора

ионов меди, содержащихся в соли, потому что их распределение в кристаллах NaCl неравномерно. Диапазон исследований проводимостей был выбран экспериментальным путем, при значениях менее 0,2 мСм/см происходило неравномерное образование ионов меди, при значениях более 1,2 мСм/см происходили короткие замыкания в реакторе, мешающие исследовательской работе. Кривая №1 (рисунок 5.3 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 итоговую зависимость выхода ионов меди в зависимости от проводимости обрабатываемой жидкости, линия полого убывает, что означает уменьшение образования Cu^{2+} и снижение эффективности обеззараживания воды с уменьшением сопротивления воды. На рисунке 5.3 б показан результат образования ионов серебра в модельном растворе, полученный таким же путем, как и в экспериментах с ионами меди. В отличие от ионизации исследуемой жидкости ионами Cu^{2+} , ионы Ag^+ не были обнаружены в дистиллированной воде и в кристаллах поваренной соли. Поэтому, на рисунке 5.3 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 (рисунок 4.3), доказывают необходимость применения средств для уменьшения проводимости воды с целью увеличения эффективности ее обеззараживания.

5.4 Влияние водородного показателя модельного раствора на образование ионов меди и серебра

Эффективность процесса обеззараживания воды также значительно зависит от водородного показателя обрабатываемых жидкостей [37,149], поэтому одной из задач исследования являлось установить характеры образования ионов Cu^{2+} и Ag^+ при разных значений Ph обрабатываемой жидкости ДЭР в реакторе с горизонтальным протоком воды (через нижнюю камеру) относительно диафрагменной мембраны во время питания от ВИИП. Определение этих зависимостей происходило практически в идентичных условиях, как и при исследовании выхода ионов металлов от величины амплитуды импульсов, только в данном случае их значение было неизменным 2150 В, а Ph изменялся в пределах от 2,5 до 9,5 с помощью жидких кондиционеров для аквариумов TetraAqua PH Minus и PH Plus (рисунок 5.4). Модельный раствор для экспериментов наводился

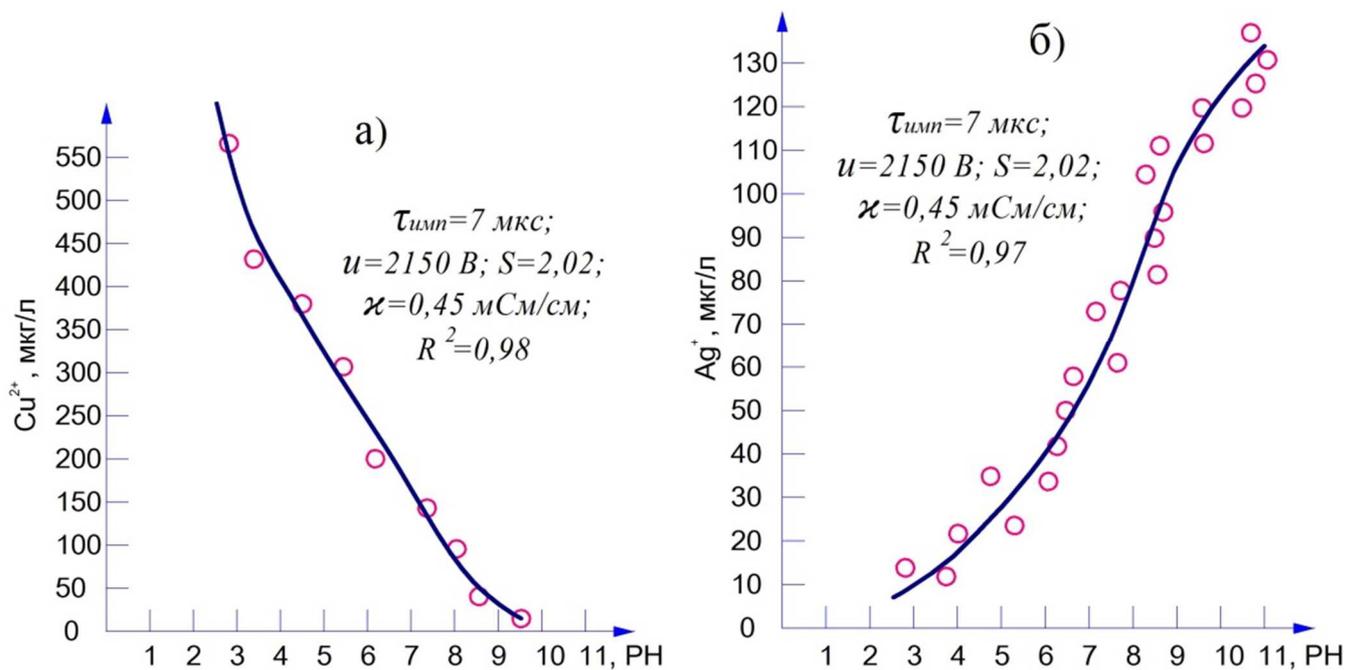


Рисунок 5.4 - Образование Cu^{2+} (а) и Ag^+ (б) от Ph модельного раствора

из дистиллированной воды, жидких кондиционеров и хлорида натрия для поддержания проводимости на уровне 0,45 мСм/см. Для всех значений концентрации ионов меди после обработки ДЭР вычиталось исходное их значение до обработки.

Для комбинированного применения серебряных и медных электродов сложно однозначно определить, какая среда жидкости лучше: кислотная, щелочная или нейтральная. В случае использования только медных электродов, образование ионов меди Cu^{2+} увеличивается с ростом кислотности среды (рисунок 5.4 а), если же использовать только серебряные электроды, то наоборот, генерация ионов серебра Ag^+ возрастает при увеличении щелочности среды (рисунок 5.4 б).

6 ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ ДЭР

6.1 Зависимости выхода бактерицидных агентов от расхода электроэнергии

В ходе лабораторных исследований были установлены зависимости выхода ионов меди, серебра и перекиси водорода от энергетического вклада в разряд. Все условия экспериментов были 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. Все зависимости имеют линейный характер нарастания, угол нарастания содержания каждого бактерицидного агента зависит от амплитуды импульсов, которые были взяты в диапазоне от 1900 до 2300 В, изображены на рисунке 6.1 а, б, в для выхода ионов меди, серебра, молекул перекиси водорода соответственно. На каждую точку графиков было затрачено по 7 литров модельного раствора. Зависимости представляют общее количество

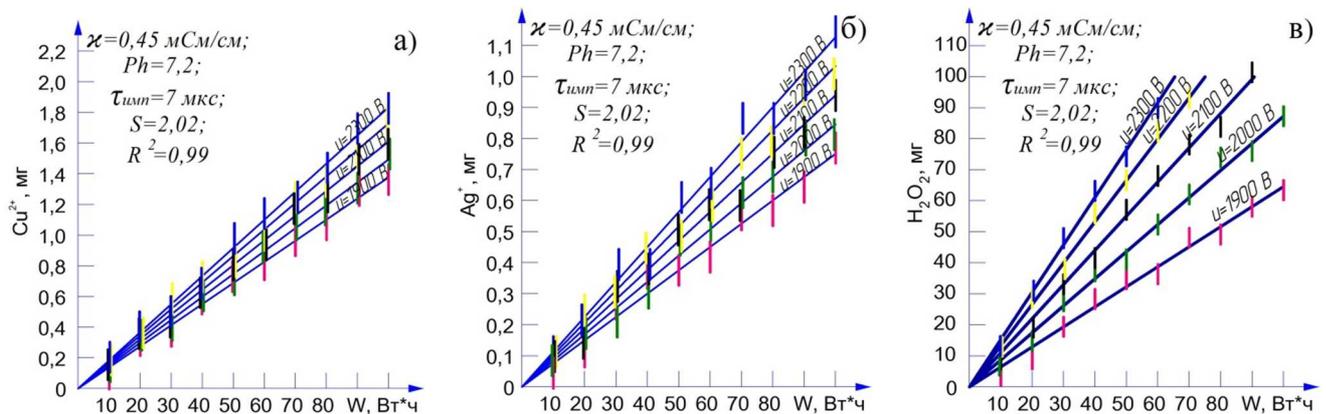


Рисунок 6.1 - Зависимости выхода ионов меди (а), серебра (б) и молекул перекиси водорода (с) от энерговклада в разряд

ионов металлов и молекул H_2O_2 во всем модельном растворе, потому что их итоговая масса образования не зависит от количества обработанной жидкости. Характеристики выхода бактерицидных агентов могут быть описаны формулами:

$$C_{Cu^{2+}} = (0,0118 \cdot U - 8,69) \cdot W/V; \quad (6.1)$$

$$C_{Ag^+} = (0,00946 \cdot U - 10,446) \cdot W/V; \quad (6.2)$$

$$C_{H_2O_2} = (0,1649 \cdot U - 267,35) \cdot W/V; \quad (6.3)$$

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

U - амплитуда импульсов напряжения (в диапазоне от 1700 до 2300), В;

W - количество затраченной электроэнергии, Вт·ч;

V - количество обработанной воды, литр;

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

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

Например, если амплитуда импульсов питающего напряжения составляет 2100 В, количество затраченной энергии 2 кВт·ч, а количество обработанной воды ДЭР 1000 литров, то концентрация ионов меди после обработки с вычетом ее начального значения в исходной жидкости составит $C_{Cu^{2+}} = (0,0118 \cdot 2100 - 8,69) \cdot 2000 / 1000 = 32,18$ мкг/л. Формулы применимы в случае использования модельного раствора из дистиллированной воды и хлорида натрия с проводимостью около 0,45 мСм/см и Ph близкому к нейтральному. Представленные зависимости на водопроводной воде будут другие углы наклона, но, вероятнее всего, они также будут прямолинейны.

Экспериментально установленные вышеприведенные зависимости позволили разработать алгоритм системы автоматического управления обеззараживания воды импульсным ДЭР. Например, для плавательного бассейна, алгоритм будет использовать информацию о величине воздействующего напряжения, затраченной электроэнергии и количества обработанной воды. Концентрации ионов меди и серебра и молекул перекиси водорода можно определить расчетным путем. Для необходимого качества стерилизации воды возможно задать требуемый объем одного из компонентов обеззараживания (остальные определяться автоматически) и система будет работать до тех пор, пока не достигнет полного обеззараживания воды.

6.2 Влияние расхода модельного раствора на образование бактерицидных агентов

Необходимым исследованием эффективности технологии ДЭР являлось установление зависимостей образования Cu^{2+} (Ag^+) и H_2O_2 от расхода обработанной воды через реактор. Было установлено, что в используемом

реакторе ДЭР [150] общий выход бактерицидных агентов не зависит от скорости протока воды через реактор, меняется лишь их концентрация в зависимости от обработанного объема жидкости, что подтверждают данные таблицы 2. Условия

Таблица 2 – Образование бактерицидных агентов

№	Количество обработанной воды, л.	Скорость протока воды, л/мин.	Концентрация перекиси водорода, мг/л.	Концентрация ионов меди, мг/л.	Количество перекиси, водорода, мг.	Количество ионов меди, мг.
1	12	2,4	12,8	0,201	153	2,412
2	10	2,0	16,5	0,237	165	2,373
3	8	1,6	19,9	0,309	159	2,478
4	6	1,2	28,5	0,401	171	2,409
5	4	0,8	40,5	0,588	162	2,355
6	2	0,4	84,0	1,226	168	2,451

экспериментов аналогичны условиям, описанным выше в главе 6.1, только неизменным был расход электрической энергии (150 Вт·ч) на каждую контрольную точку, а амплитуда импульсов ВИИП была неизменна 2100 В. В реакторе были установлены медные электроды.

Итоговые массы ионов меди и молекул перекиси водорода в каждом эксперименте одинаковые, отличаются только на величины погрешностей методик их определения. На основании табличных данных можно сделать вывод, что в исследуемом реакторе, с горизонтальным протоком воды относительно диафрагменной мембраны, выход обеззараживающих компонентов не зависит от скорости протекания воды в исследуемом диапазоне 0,4 до 2,4 л/с, что позволяет уменьшить габариты реактора при одинаковых показателях дезинфекции воды. Эти факты являются дополнительными преимуществами данного реактора в сравнении с реактором, у которого проток воды проходит через отверстия в диафрагменной мембране. Возможно, при более высоких скоростях обработки воды эффективность исследуемого реактора ДЭР изменится, потому что изменится давление в нем, но зависимость образования бактерицидных агентов от давления в реакторе не рассматривалась в настоящей работе.

6.3 Зависимости отмираний бактерий от концентраций ионов металлов при обработке модельного раствора ДЭР

Итоговые зависимости отмираний бактерий при обработке ДЭР были исследованы на модельном растворе из водопроводной воды (химический состав приведен в приложении №1) проводимостью 0,45 мСм/см, Ph 7,4 и культуры кишечной палочки *E. coli*. Отдельно были рассмотрены кинетики отмираний микроорганизмов при использовании в реакторе ДЭР медных и серебряных электродов. Условия проведения экспериментов были аналогичны условиям исследования зависимостей образования ионов меди и серебра от амплитуды напряжения (глава 5.1), только она была неизменной 2,3 кВ, а модельный раствор был изготовлен из водопроводной воды и культуры кишечной палочки. Обработанная водопроводная вода в реакторе ДЭР смешивалась в определенной пропорции с модельным раствором и отстаивалась 60 минут. Исходное содержание кишечной палочки в модельном растворе было наведено более чем 10^6 *E. coli*/л. После завершения экспериментов исследуемая жидкость незамедлительно подвергалась бактериологическому анализу. На рисунке 6.3 а и б представлены зависимости отмираний *E. coli* от концентраций ионов меди и серебра в воде.

Концентрация ионов металлов менялась в зависимости от пропорции разбавления обработанной воды и модельного раствора и устанавливалась с помощью ААС после завершения бактериологических экспериментов. Вместе с

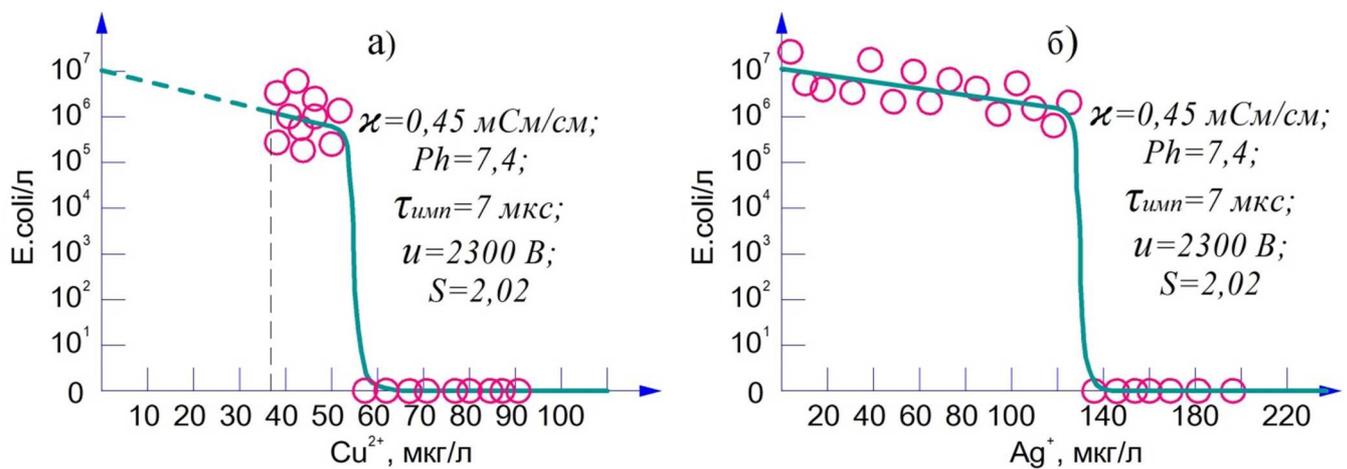


Рисунок 6.3 - Зависимости отмирания *E. coli* от концентрации Cu^{2+} (а) и Ag^{+} (б)

ними изменялась и концентрация перекиси водорода. Образование H_2O_2 в водопроводной воде значительно ниже, чем в модельном растворе из дистиллированной воды и хлорида натрия, и время разложения ее меньше. Содержание перекиси водорода в воде определялось сразу после обработки водопроводной воды ДЭР, до ее смешивания с модельным раствором. В этот момент насыщенность воды молекулами H_2O_2 составляла 23,4 мкг/л на каждый микрограмм ионов серебра (в эксперименте с использованием серебряных электродов) и 10 мкг/л на каждый микрограмм ионов меди, в случае использования электродов из меди. После смешивания обработанной воды с модельным раствором и отстаивания смеси 60 минут перекись водорода не была обнаружена. Концентрация Cu^{2+} в водопроводной воде и модельном растворе во всех экспериментах до обработки ДЭР была на уровне 37 мкг/л.

Источник ионов меди в водопроводной воде не всегда известен, также не известен характер образования ионов. Вероятнее всего, вклад исходного содержания Cu^{2+} в растворах в общее обеззараживание в проводимых экспериментах был мал. Кульский Л.А. в своих исследованиях отметил, что ионы металлов, полученные с помощью электрического тока, имеют в несколько раз сильнее бактерицидный эффект, в отличие от ионов, полученных каким либо другим путем [37]. Автор не объясняет механизм этого свойства дезинфицирующих ионов. Маловероятно, что в водопроводной воде ионы меди были получены электрическим путем, а скорее всего, образованы за счет контакта воды с медной рудой в грунте, даже в случае ее малого содержания. По этому, исходная концентрация Cu^{2+} , вероятнее всего, приняла малое участие в дезинфекции модельного раствора. Методика определения ионов меди в воде не имеет возможности определения характера образования ионов, все они регистрировались в общем количестве. В случае использования основы модельного раствора из деионизированной воды и особо химически чистых солей для восстановления проводимости до значения питьевых вод, итоговая зависимость отмирания бактерий, возможно, имела бы другой характер. В связи с большой трудоемкостью и стоимостью таких исследований они не проводились.

Зависимость отмирания кишечной палочки от концентрации ионов меди (рисунок 6.3, а) имеет линейный участок снижения количества бактерий при содержании Cu^{2+} от 0 до 55 мкг/л. Вероятно, что если в исходных растворах ионы меди бы отсутствовали, возможно, этот линейный участок был бы короче. Свыше 55 мкг/л наблюдается пороговая концентрация ионов исследуемого металла и полное отмирание бактерий. ПДК суммарной меди в питьевой воде составляет 1 мг/л [197], пороговое значение для воды, обработанной ДЭР 0,055 мг/л, т.е. более чем в 18 раз ниже ПДК, что дает данному металлу большой запас возможной используемой бактерицидной способности. В случае использования электродов реактора ДЭР из серебра, линейный участок спада наблюдается при концентрациях от 0 до 130 мкг/л, свыше этих значений происходит полное уничтожение бактерий. ПДК суммарного серебра в питьевой воде составляет 50 мкг/л [197], пороговое значение стерилизующей концентрации для обработанной ДЭР воды выше ПДК в 2,6 раз, что делает невозможным использование только серебряных электродов для обеззараживания различных вод. Но применения небольшой части серебряных электродов совместно с медными увеличивает в несколько раз бактерицидный эффект способа дезинфекций [37]. Исследования Кульского Л.А. доказали, что их пропорция должна находиться в соотношении 1:10, например для 55 мкг/л Cu^{2+} достаточно 5,5 мкг/л Ag^+ . Применение в реакторе ДЭР дополнительно серебряных электродов должно снизить пороговую летальную концентрацию ионов меди для микроорганизмов, но подробные исследования не проводились.

6.4 Разработка алгоритма управления системой обеззараживания воды плавательных бассейнов

На основании всех приведенных выше зависимостей был разработан алгоритм для управления системой обеззараживания воды. Алгоритм разработан для стерилизации воды плавательных бассейнов, которые имеют малое суточное потребление (рисунок 6.4). Контролируемыми величинами являются электропроводность, водородный показатель воды, расход электроэнергии и воды. Уменьшение электропроводности обрабатываемой воды до значения 0,17

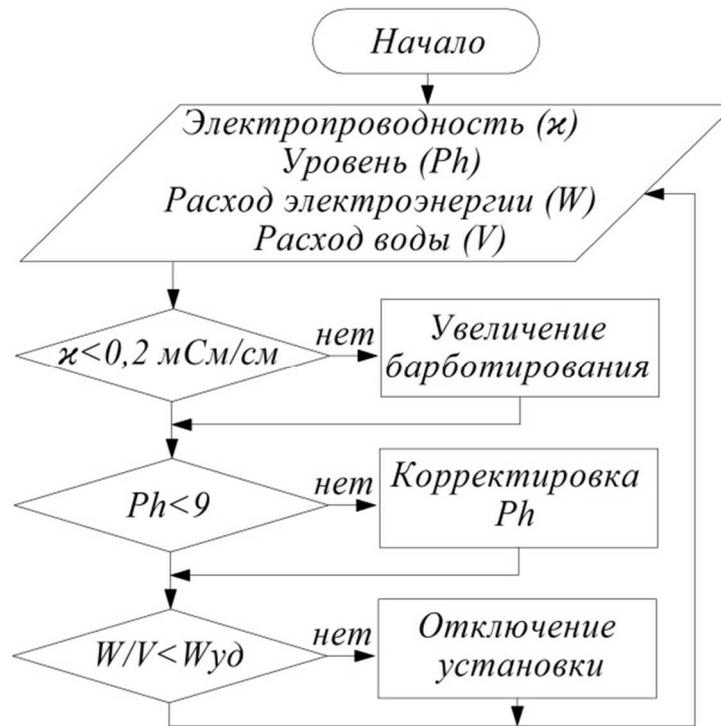


Рисунок 6.4 - Алгоритм управления системой дезинфекции воды

мСм/см повысит эффективность образования перекиси водорода, ионов меди и серебра (рисунок 4.3 и 5.3), что возможно получить путем применения барботирования жидкости. Однако этот процесс является не полностью стабильным и возможно уменьшение сопротивления ниже 0,17 мСм/см, что приведет к резкому снижению интенсивности образования ДЭР и, следовательно, качества обеззараживания воды. По этому, рациональным является отстройка увеличения мощности барботирования от величины электропроводности чуть большей, чем 0,17 мСм/см, например 0,2 мСм/см.

Согласно [197] значение водородного показателя может находиться в пределах от 6 до 9 (требования распространяются и на плавательные бассейны). Эксплуатация плавательных бассейнов приводит к увеличению Ph воды, в результате чего его необходимо уменьшать. Для этих целей необходимо применить в системе дезинфекции воды дозатор жидкого кондиционера снижения Ph, управление которым должно осуществляться на основании алгоритма, приведенного на рисунке 6.4. Уменьшение уровня водородного показателя приведет также к более интенсивному образованию ионов Cu^{2+} , которые являются наиболее бактерицидными агентами, чем ионы Ag^+ , выход которых уменьшится

со снижением Ph.

Ионы меди и серебра в больших концентрациях являются токсичными для организма человека и их ПДК также регламентирована в [197]. Оборудование для определения содержания Cu^{2+} и Ag^+ весьма дорогостоящее и его использование в плавательных бассейнах является не экономичным. Поэтому, контроль за ионами меди и серебра возможно осуществлять на основании расхода электроэнергии и воды с последующим определением их концентрации расчетным путем. Определение количества бактерицидных агентов приведено на рисунке 6.1 и описано формулами (6.1 - 6.3). В системе стерилизации воды ДЭР происходит многократное разбавление обработанной жидкости из реактора с дезинфицируемой водой, от 10 до 100 раз в зависимости от степени зараженности воды. Время разложения перекиси водорода в воде составляет несколько минут и превышение ее ПДК (с учетом разбавления обработанной жидкости из реактора с остальной водой) выше 0,1 мг/л маловероятно. Поэтому, не требуется осуществлять контроль над концентрацией H_2O_2 . Концентрации ионов меди и серебра в воде остается постоянными длительное время, в результате чего необходимо осуществлять контроль над ними. Согласно формулам (6.1) и (6.2), в случае использования максимального интенсивного напряжения импульсов ВИИП 2300 В, их содержание ионов будет составлять $C_{\text{Cu}^{2+}}=18,45 \cdot W/V$ мкг/л и $C_{\text{Ag}^+}=11,312 W/V$ мкг/л соответственно. Согласно исследованиям [37], для наиболее эффективного обеззараживания воды необходимо использовать в 10 раз меньше ионов серебра, чем меди. Используя площадь серебряных электродов в 10 раз меньшею, чем у медных, получим образование Ag^+ по зависимости $C_{\text{Ag}^+}=1,1312 W/V$ мкг/л. Учитывая, что ПДК содержания суммарной меди (1 мг/л) в 20 раз выше ПДК содержания суммарного серебра в воде (0,05 мг/л), то при одном и том же расходе электроэнергии и обработанной воды, ПДК ионов серебра будет достигнута раньше, чем ПДК меди. В результате чего, контроль над концентрациями ионов металлов будет осуществляться через контроль над концентрацией Ag^+ , и в случае достижения последней до ПДК, концентрация Cu^{2+} (также как и H_2O_2) будет ниже предельных значений.

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 использования 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 из-за значительного увеличения тепловых потерь. 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 ионов меди и серебра, а также перекиси водорода 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 в сравнении с реактором с протоком воды через отверстия в диафрагменной мембране с медными электродами, питающегося от источника переменного синусоидального напряжения.
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 используют в учебном процессе ТПУ и ЗабГУ при преподавании дисциплин «Теория автоматического управления», «Промышленная электроника», «Управление техническими системами», «Электротехнологические установки».

Перспективами дальнейшей разработки темы являются исследование обеззараживающих способностей ДЭР в диапазоне длительностей импульсов больше 16 мкс и меньше 1 мкс. Также перспективным направлением исследований является 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ААС - атомно-абсорбционная спектрофотометрия

ВАХ - вольт-амперная характеристика

ВИИП - высоковольтный импульсный источник питания

ДНК - дезоксирибонуклеиновая кислота

ДЭР - диафрагменный электрический разряд

ООН - организация объединённых наций

ПДК - предельно допустимая концентрация

РНК - рибонуклеиновая кислота

УИ - ультрафиолетовое излучение

ШИМ - широтно-импульсная модуляция

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Utilization of ultraviolet radiation of cold hollow cathode glow discharge plasma for water disinfection / I.A. Soloshenko [et al.] // Plasma Physics Reports. 2000. № 26. P. 792-800.
- 2) Fridman A. Plasma Biology and Plasma Medicine. Plasma Chemistry. New York: Cambridge University Press, 2008. P. 848-914.
- 3) Laroussi M. Sterilization of contaminated matter with an atmospheric pressure plasma // IEEE Transactions on Plasma Science. 1996. № 24. P. 1188-1191.
- 4) Laroussi M. Nonthermal decontamination of biological media by atmospheric pressure plasmas: Review, analysis, and prospects // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. № 30. P. 1409-1415.
- 5) Laroussi M., Leipold F. Evaluation of the roles of reactive species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure // International Journal of Mass Spectrometry. 2004. № 233. P. 81-86.
- 6) Laroussi M. Low temperature plasma-based sterilization: Overview and state-of the art // Plasma Processes and Polymers. 2005. № 2. P. 391-400.
- 7) Room temperature sterilization of surfaces and fabrics with a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma / K. Kelly-Wintenberg [et al.] // Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology. 1998. № 20. P. 69-74.
- 8) Decontamination of chemical and biological warfare, (CBW) agents using an atmospheric pressure plasma jet (APPJ) / H.W. Herrmann [et al.] // Physics of Plasmas. 1999. № 6. P. 2284-2289.
- 9) Birmingham J.G. Mechanisms of bacterial spore deactivation using ambient pressure nonthermal discharges // IEEE Transactions on Plasma Science. 2004. № 32. P. 1526-1531.
- 10) Синтез пероксида водорода в растворе электролита под действием разрядов атмосферного давления / Ю.В. Титова [и др.] // Материалы III Международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии. Т. 1. Иваново, 2002. С. 103-105.

- 11) Kuz'michyova L.A., Titova Y.V., Maksimov A.I. Yields of hydroxyl radicals and hydrogen peroxide in a glow discharge system with a liquid cathode surface // *Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011. Т. 47, № 6. P. 517-519.
- 12) Кузьмичева Л.А., Титова Ю.В., Максимов А.И. Образование пероксида водорода под действием тлеющего разряда атмосферного давления на водные растворы электролитов // *Электронная обработка материалов*. 2004. №4. С. 57-61.
- 13) Кузьмичева Л.А. Образование пероксида водорода в растворе электролита под действием тлеющего разряда атмосферного давления в воздухе и в аргоне // *Молодая наука в классическом университете: тезисы докладов научных конференций фестиваля студентов, аспирантов и молодых ученых*. Иваново, 2002. С. 14.
- 14) Air plasma chemistry in non-equilibrium air plasma at atmospheric pressure / K.H. Becker [et al.]. Eds. Bristol, U.K.: IOP. 2004. Ch. 4. P. 124–182.
- 15) Negative air ionisation and the production of hydrogen peroxide / G. Richardson [et al.] // *Atmos. Environ.* 2003. V. 37(26). P. 3701–3706.
- 16) Goldstein N.I., Goldstein R.N., Merzlyak M.N. Negative air ions as a source of superoxide // *Int. J. Biometeorol.* 1992. V. 36(2). P. 118-122.
- 17) Negative air ionisation and the generation of hydrogen peroxide / O. Challenger [et al.] // *Sci. Total. Environ.* 1996. V. 177(1). P. 215–219.
- 18) Kieft I.E., Van der Laan E.P., Stoffels E. Electrical and optical characterization of the plasma needle // *New J. Phys.* 2004. V. 6(1). P. 149.
- 19) Radicals of plasma needle detected with fluorescent probe / I.E. Kieft [et al.] // *Plasma Processes and Polymers*; R. d'Agostino [et al.]. Eds. Weinheim, Germany: Wiley VCH. 2005. P. 295–308.
- 20) Plasma treatment of dental cavities: A feasibility study / R.E.J. Sladek [et al.] // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2004. V. 32(4). P. 1540–1543.
- 21) Killing of *S. mutans* bacteria using a plasma needle at atmospheric pressure / J. Goree [et al.] // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2006. № 34. P. 1317.
- 22) Воздействием тлеющего разряда атмосферного давления на воду / А.А.

Иванников [и др.] // Химия высоких энергий. 2003. Т. 37, № 2. С. 148.

23) Kogoma M., Okazaki S. Raising of ozone formation efficiency in a homogeneous glow discharge plasma at atmospheric pressure // J. Phys. D. Appl. Phys. 1994. V. 27(9). P. 1985–1987.

24) The atmospheric-pressure plasma jet: A review and comparison to other plasma sources / A. Schütze [et al.] // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26(6). P. 1685–1694.

25) Kieft I.E. Plasma needle: exploring biomedical applications of non-thermal plasmas: Thesis dissertation. Eindhoven University of Technology, 2005.

26) Deng X.T., Shi J.J., Kong M.G. Protein destruction by a helium atmospheric pressure glow discharge: Capability and mechanisms // Journal of Applied Physics. 2007. № 7. P. 101.

27) Protein destruction by atmospheric pressure glow discharges / X.T. Deng [et al.] // Applied Physics Letters. 2007. № 1. P. 90.

28) Bactericidal action of the reactive species produced by gas-discharge nonthermal plasma at atmospheric pressure: a review / Lindsey F. [et al.] // IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. V. 34(4). P. 1257-1269.

29) Probing bactericidal mechanisms induced by cold atmospheric plasmas with Escherichia coli mutants / S. Perni [et al.] // Applied Physics Letters. 2007. № 90(7).

30) Walsh J.L., Kong M.G. Sharp bursts of high-flux reactive species in submicrosecond atmospheric pressure glow discharges // Applied Physics Letters. 2006. № 89(23).

31) Walsh J.L., Shi J.J., Kong M.G. Contrasting characteristics of pulsed and sinusoidal cold atmospheric plasma jets // Applied Physics Letters. 2006. № 88. P. 171-501.

32) Mendis D.A., Rosenberg M., Azam F. A note on the possible electrostatic disruption of bacteria // IEEE Transactions on Plasma Science. 2000. № 28. P. 1304-1306.

33) Use of a one atmosphere uniform glow discharge plasma to kill a broad spectrum of microorganisms / Kelly-Wintenberg K. [et al.] // Journal of Vacuum Science &

Technology A-Vacuum Surfaces and Films. 1999. № 17. P. 1539-1544.

34) Plasma for bio-decontamination, medicine and food security (NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology) / Eds. by Z. Machala, K. Hensel, Yu. Akishev. Bratislava, 2011. 144 p.

35) Sterilization and plasma processing of room temperature surfaces with a one atmosphere uniform glow discharge plasma (OAUGDP) / B.R. Gadri [et al.] // Surf. Coat. Technol. 2000. V. 131(1-3). P. 528-542.

36) Montie T.C., Kelly-Wintenberg K., Roth J.R. An overview of research using the one atmosphere uniform glow discharge plasma (OAUGDP) for sterilisation of surfaces and materials // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. V. 28(1). P. 41-50.

37) Кульский Л.А. Серебряная вода. Киев: Наукова Думка, 1968. 104 с.

38) Neumann E., Sowers A.E., Jordan C.A. Electroporation and electrofusion in cell biology. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2001.

39) Тлеющий разряд с водным катодом [Электронный ресурс]. URL: <http://www.youtube.com/watch?v=xi85HnVICI> (дата обращения: 15.05.2016)

40) Farr S.B., Kogoma T. Oxidative stress responses in *Escherichia coli* and *Salmonella typhimurium* // Microbiol. Rev. 1991. V. 55(4). P. 561-585.

41) Hydrogen peroxide as a potent bacteriostatic antibiotic: Implications for host defense / P.A. Hyslop [et al.] // Free Radic. Biol. Med. 1995. V. 19. P. 31-37.

42) Imlay J.A. Pathways of oxidative damage // Ann. Rev. Microbiol. 2003. V. 57. P. 395-418.

43) Halliwell B., Gutteridge J.M.C., Cross C.E. Free radicals, antioxidants and human disease – Where are we now // J. Lab. Clin. Med. 1992. V. 19(6). P. 598-620.

44) Cabisco E., Tamarit J., Ros J. Oxidative stress in bacteria and protein damage by reactive oxygen species // Int. Microbiol. 2000. V. 3(1). P. 3-8.

45) Demple B., Harrison L. Repair of oxidative damage to DNA: Enzymology and biology // Annu. Rev. Biochem. 1994. V. 63. P. 915-948.

46) Optical and rf electrical characteristics of atmospheric pressure open-air hollow slot microplasmas and application to bacterial inactivation / A. Rahul [et al.] // J. Phys.

D: Appl. Phys. 2005. № 38. P. 1750–1759.

47) Stoffels E. Tissue processing with atmospheric plasmas // Contributions to Plasma Physics. 2007. № 47. P. 40-48.

48) The resistive barrier discharge / M. Laroussi [et al.] // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. № 30. P. 158.

49) Синтез пероксида водорода в растворе электролита под действием разрядов атмосферного давления / Ю.В. Титова [и др.] // Материалы III Международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии. Т.1. –Иваново, 2002. - С. 103-105.

50) Kogelschatz U. Dielectric-barrier Discharges: their history, discharge physics, and industrial applications // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2003. V. 23(1) P. 1-46.

51) Корнев Я.И. Обработка воды импульсными разрядами в водо-воздушном потоке: дисс... канд. техн. наук : 05.14.12. Томск: ТПУ, 2005. 162 с.

52) Babaeva N.Y., Naidis G.V. Modelling of streamer propagation // Electrical Discharges for Environmental Purposes, E.M. van Veldhuizen, Ed. Commack. New York: Nova, 2000. P. 21–48.

53) Babaeva N.Y., Naidis G.V. Two-dimensional modelling of positive streamer dynamics in non-uniform electric fields in air // J. Phys. D, Appl. Phys. 1996. V. 29. P. 2423–2431.

54) Benilov M.S., Naidis G.V. Modelling of low-current discharges in atmospheric-pressure air taking account of non-equilibrium effects // J. Phys. D, Appl. Phys. 2003. V. 36 (15), P. 1834–1841.

55) Georghiou G.E., Morrow R., Metaxas A.C. The two-dimensional simulation of streamers using the FE-FCT method // J. Phys. D, Appl. Phys. 2000. V. 33(3). P. L27–L32.

56) Numerical modelling of atmospheric pressure gas discharges leading to plasma production / G.E. Georghiou [et al.] // J. Phys. D, Appl. Phys. 2005. V. 38(20). P. R303– R328.

- 57) Investigation of pulsed barrier discharge in water-air gap / V.S. Taran [et al.] // Problems of atomic science and technology. 2013. V. 1(83). P. 249-251.
- 58) Applied Plasma Medicine / G. Fridman [et al.] // Plasma Process Polym. 2008. № 5. P. 503–533.
- 59) Fridman A. Plasma Chemistry: Cambridge University Press, 2008.
- 60) Fridman A., Friedman G. Plasma Medicine. Hoboken, NJ: Wiley, 2013.
- 61) Eliasson B., Hirth M., Kogelschatz U. Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges // J. Phys.D: Appl. Phys. 1987. V.20. P.1421-1437.
- 62) Ozonized water generator based on coaxial dielectric-barrier-discharge in air / M.M. Kuraica [et al.] // Vacuum. 2004. V. 73(3-4). P. 705–708.
- 63) Treatment of water by dielectric barrier discharge / D.P. Subedi [et al.] // Journal of Science and Technology in the Tropics. 2009. V. 5(2). P. 117–123.
- 64) Tyata R.B., Subedi D.P., Wong C.S. Comparison of dielectric barrier discharge in air, nitrogen and argon at atmospheric pressure // Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology. 2010. V. 6(2). P. 6–12.
- 65) New type of coaxial dielectric-barrier-discharge used as ozonized water generator / M.M. Kuraica [et al.] // Advances in Applied Plasma Science. 2003. № 4. P. 415-418.
- 66) Ozonized water generator based on coaxial dielectric 'barrier' discharge in air / M. Kuraica [et al.] // Vacuum. 2004. № 73. P. 705 – 708.
- 67) Sterilization using dielectric barrier discharge at atmospheric pressure / T. Masazaku [et al.]. IEEE, 2006. P. 784-788.
- 68) Biological responses of *Bacillus stratosphericus* to floating electrode-dielectric barrier discharge plasma treatment / M. Cooper [et al.] // Journal of Applied Microbiology. 2010. № 109. P. 2039.
- 69) Laroussi M., Mendis D.A., Rosenberg M., Plasma interaction with microbes // New Journ. Phys. 2003. V. 5. P. 41.1–41.10.
- 70) Effects of Non-Thermal Plasma on Mammalian Cells / S. Kalghatgi [et al.] // PLoS One. 2011. V. 6 (1). P. e16270.
- 71) Non-thermal dielectric barrier discharge plasma induces angiogenesis through

- reactive oxygen species / K.P. Arjunan [et al.] // J. R. Soc. Interface, 2011.
- 72) Storch D.G., Kushner M.J. Destruction mechanisms for formaldehyde in atmospheric pressure low temperature plasmas // Journal of Applied Physics. 1993. V. 73. P. 51-55.
- 73) Xu X.P., Kushner M.J. Ion composition of expanding microdischarges in dielectric barrier discharges // J. Appl. Phys. 1998. V. 83. P. 7522-7532.
- 74) DBD plasma source operated in single-filamentary mode for therapeutic use in dermatology / P. Rajasekaran [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. P. 225201(10pp).
- 75) Filamentary and homogeneous modes of dielectric barrier discharge (DBD) in air: Investigation through plasma characterization and simulation of surface irradiation / P. Rajasekaran [et al.] // Plasma Proc. Polymer. 2010. Vol. 7. P. 665-675.
- 76) Basics and biomedical applications of dielectric barrier discharge (DBD) / N. Bibinov [et al.]. Biomedical engineering, trends in materials science, 2011. P. 123 -150.
- 77) Rajasekaran P. Atmospheric-pressure Dielectric barrier discharge (DBD) in air : Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Bochum, India, 2011. 132 p.
- 78) Broadwater W.T. Sensitivity of three selected bacterial species to ozone // Applied and Environmental Microbiology. 1973. № 26. P. 391.
- 79) Ozone decomposition in ultrapure water and continuous ozone sterilization for a semiconductor ultrapure water system / T. Ohmi [et al.] // Journal of the Electrochemical Society. 1992. № 139. P. 3336.
- 80) Non-thermal plasma applications in air sterilization / M. Gallagher [et al.] // International Conference on Plasma Science. Baltimore, Maryland, 2004.
- 81) Plasma for air and water sterilization / A. Gutsol [et al.] // NATO Advanced Study Institute (ASI). Plasma Assisted decontamination of biological and chemical agents; Turkey, 2007.
- 82) Bettleheim F.A., March J. Introduction to General, Organic and Biochemistry. 4th edn, Saunders College Pub. Orlando, FL, 1995.

- 83) 17-th International Symposium on Plasma Chemistry ISPC-17 / M. Gallagher [et al.]. Toronto, Canada, 2005. P. 1056.
- 84) Rapid inactivation of airborne bacteria using atmospheric pressure dielectric barrier grating discharge / M. Gallagher [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. 2007. № 35. P. 1501.
- 85) Imlay J., Chin S., Linn S. Toxic DNA damage by hydrogen peroxide through the Fenton reaction in vivo and in vitro // Science. 1988. V. 240(4852). P. 640–642.
- 86) Henle E.S., Linn S. Formation, prevention, and repair of dna damage by iron/hydrogen peroxide // Journal of Biological Chemistry. 1997. V. 272(31). P. 19095–19098.
- 87) Minayeva O., Laroussi M. Molecular absorption spectroscopy of the atmospheric pressure air DBD // The 31st IEEE International Conference on Plasma Science, 2004. Baltimore, MD, USA: ICOPS 2004. Print ISBN: 0-7803-8334-6. P. 122.
- 88) Photobleaching of astaxanthin and canthaxanthin / A.G. Christophersen [et al.] // Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung. 1991. V. 192. P. 433.
- 89) Moisan M. Plasma sterilization. methods and mechanisms // Pure and Applied Chemistry. 2002. V. 74(3). P. 349.
- 90) Bacterial spore inactivation by atmospheric-pressure plasmas in the presence or absence of UV photons as obtained with the same gas mixture / M.K. Boudam [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. 2006. V. 39(16). P. 3494.
- 91) Plasma Medicine / A. Fridman [et al.] // J. Propul. Power, issue ed. S. Macheret. 2007. V. 22. P. 486.
- 92) Analysis of sterilization effect by pulsed dielectric barrier discharge / J.H. Choi [et al.] // Journal of Electrostatics. 2006. V. 64. P. 17-22.
- 93) Reduction of Bacillus Subtilis and Aspergillus Niger spores using nonthermal atmospheric gas discharges / F.J. Trompeter [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. V. 30. P. 1416-1423.
- 94) Sterilization of polymer foils with dielectric barrier discharges at atmospheric pressure / M. Heise [et al.] // Plasmas and Polymers. 2004. № 9. P. 23-33.

- 95) Beckman J.S., Koppenol W.H. Nitric oxide, superoxide, and peroxynitrite: the good, the bad, and ugly. *American Journal of Physiology - Cell Physiology*. 1996. V. 271. P. 1424.
- 96) Mass spectrometric detection of short-living radicals produced by a plasma needle / E. Stoffels [et al.] // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2007. V. 16. P. 549-556.
- 97) Ozone correlates with antibacterial effects from indirect air dielectric barrier discharge treatment of water / M.J. Pavlovich [et al.] // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2013. V. 46(14). P. 145202.
- 98) Babaeva N.Y., Kushner M.J. Reactive fluxes delivered by dielectric barrier discharge filaments to slightly wounded skin // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2013. V. 46(2). P. 025401.
- 99) Tsyganov D., Pancheshnyi S. Simulation of N-atom production in dielectric-barrier discharge in nitrogen at atmospheric pressure // *Plasma Sources Science and Technology*. 2012. V. 21(6). P. 65010-65017.
- 100) Non-thermal dielectric barrier discharge plasma induces angiogenesis through reactive oxygen species / K.P. Arjunan [et al.] // *Journal of the Royal Society Interface*. 2012. V. 9(66). P. 147-157. doi: 10.1098/rsif.
- 101) Mechanisms of direct dielectric barrier discharge plasma inactivation of *E. coli* / D. Dobrynin [et al.] // *Plasma Science-Abstracts*. ICOPS 2009: IEEE International Conference, 2009. P. 1.
- 102) Heating effect of dielectric barrier discharges for direct medical treatment / H. Ayan [et al.] // *Plasma Science, IEEE Transactions on*. 2009. V. 37(1). P. 113-120.
- 103) Heating effect of dielectric barrier discharges in sterilization / H. Ayan [et al.] // *Plasma Science*. ICOPS 2007: IEEE 34th International Conference on. 2007. P. 504-504.
- 104) Fridman A. *Plasma Biology and Plasma Medicine*. Plasma Chemistry. New York: Cambridge University Press, 2008.
- 105) Comparison of direct and indirect effects of nonthermal atmospheric-pressure plasma on bacteria / G. Fridman [et al.] // *Plasma Processes and Polymers*. 2007. № 4.

P. 370-375.

106) Bacterial decontamination with nanosecond pulsed electric fields / S. Katsuki [et al.] // IEEE Journal. 2002. V. 8. P. 648.

107) IEEE Trans / S. Katsuki [et al.]. Dielectrics and Electrical Insulation. 2002. № 9. P. 498.

108) Fridman A., Gutsol A., Cho Y.I. Non-thermal atmospheric pressure plasma // Advances in Heat Transfer. 2007. V. 40. P. 1-142.

109) Токарев А.В. Коронный разряд и его применение. Бишкек: КРСУ, 2009. 138 с.

110) Некоторые особенности коронного разряда в воздухе / С. Б. Афанасьев [и др.] // Журнал технической физики. 2008. Т.78, Вып. 7. С. 35 -39.

111) Маринин С.А., Осокин Г.Е., Корнев Я.И. Электрические характеристики импульсного коронного разряда в водо-воздушном потоке // Сборник научных трудов «Высокие технологии в современной науке и технике». Томск, 2013. С. 93-98.

112) Yang Y., Fridman A., Cho Y.I. Plasma discharge in water // Advanced Heat Transfer. 2010. V. 42. P. 179–292

113) ГОСТ 20074-83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. Москва: Изд-во стандартов, 1983.

114) Gupta S.B. Investigation of a physical disinfection process based on pulsed underwater corona discharges: diss. Forschungszentrum Karlsruhe, 2007.

115) Машкин А.Г., Овешников Ю.М., Суворов И.Ф. Обеззараживание сточных вод частичными разрядами на переменном напряжении // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2000. № 9. С. 116-117.

116) Baumung W.An.K., Bluhm H. Underwater streamer propagation analyzed from detailed measurements of pressure release // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. P. 053302-1-10.

117) Šunka P. Pulse electrical discharges in water and their applications // Phys.

Plasmas. 2001. № 8. P. 2587-2594.

118) Sato M., Ohgiyama T., Clements J. S. Formation of chemical species and their effects on microorganisms using a pulsed high-voltage discharge in water // IEEE Trans. Ind. Appl. 1996. V. 32. P. 106-112.

119) Formation of hydroxyl radicals, hydrogen peroxide and aqueous electrons by pulsed streamer corona discharge in aqueous solution / A. A. Joshi [et al.] // J. Hazard. Mater. 1005. V. 41. P. 3-30.

120) Lukeš P., Appelton A.T., Locke B.R. Hydrogen peroxide and ozone formation in hybrid gas–liquid electrical discharge reactors // IEEE Trans. on Ind. Appl. 2004. V. 40. P. 60-67.

121) Hoeben W.F.L.M. Pulsed corona-induced degradation of organic materials in water : Ph. D. Thesis. Technical University Eindhoven, The Netherlands, 2000.

122) Sun B., Sato M., Clements J.S. Optical study of active species produced by a pulsed streamer corona discharge in water // J. Electrostatics. 1997. V. 39. P. 189-202.

123) Generation of chemically active species by electrical discharges in water / P. Šunka [et al.] // Plasma Sources Sci. Technol. 1999. № 8. P. 258–265.

124) Sahni M. Analysis of chemical reactions in pulsed streamer discharges: an experimental study : PhD thesis. Florida state university, 2006.

125) Kirkpatrick M.J., Locke B.R. Hydrogen, oxygen, and hydrogen peroxide formation in aqueous phase pulsed corona electrical discharge // Ind. Eng. Chem. Res. 2005. V. 44. P. 4243-4248.

126) Gupta S.B., Bluhm H. Pulsed underwater corona discharges as a source of strong oxidants: OH and H₂O₂ // Water Science and Technology. 2007. V. 55. P. 7-12.

127) Sugiarto A.T., Ohshima T., Sato M. Advanced oxidation processes using pulsed streamer corona discharge in water // Thin Solid Films. 2002. V. 407. P. 174-178.

128) Formation of hydroxyl radicals, hydrogen peroxide and aqueous electrons by pulsed streamer corona discharge in aqueous solution / A.A. Joshi [et al.] // J. Hazard. Mater. 1996. V. 41(1). P. 3-30.

129) Sato M., Ohgiyama T., Clements J.S. Formation of chemical species and their

effects on microorganisms using a pulsed high-voltage discharge in water // IEEE Trans. Ind. Appl. 1996. V. 32 (1). P. 106-112.

130) A pulseless corona-discharge process for the oxidation of organic compounds in water / W.-T. Shin [et al.] // Ind. Eng. Chem. Res. 2000. V. 39(11). P. 4408-4414.

131) Formation and measurement of ozone and nitric acid in a high voltage DC negative metallic point-to-aqueous-plane continuous corona reactor / A.K. Sharma [et al.] // J. Adv. Oxid. Technol. 1997. V. 2(1). P. 239-247.

132) Lukeš P. Water treatment by pulsed streamer corona discharge : Ph. D. Thesis. Institute of chemical technology, Institute of plasma physics, Prague, 2002.

133) A fast pulsed power source applied to treatment of conducting liquids and air / E.J.M. Heesch [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. 2000. V. 28. P. 137.

134) High-pressure hollow cathode discharges / K.H. Schoenbach [et al.] // Plasma Sources Science and Technology. 1997. № 6. P. 468.

135) Bacterial decontamination of water by means of pulsed-corona discharges / A. Abou-Ghazala [et al.] // IEEE Transactions Plasma Science. 2002. V. 30. P. 1449.

136) Simulations of electroporation dynamics and shape deformations in biological cells subjected to high voltage pulses / R.P. Joshi [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. V. 30. P. 1536.

137) Joshi R.P., Qian J., Schoenbach K.H. Electrical network-based time-dependent model of electrical breakdown in water // Journal of Applied Physics. 2002. V. 92. P. 6245.

138) Bacterial decontamination with nanosecond pulsed electric fields / S. Katsuki [et al.] // IEEE Journal. 2002. № 8. P. 648.

139) Application of ozone/UV process for reclamation of sewage treatment plant effluent / B.S. Oh [et al.] // Journal of water and environmental technology. 2003. № 1. P. 141-153.

140) Implementation of UV/H₂O₂ treatment for inactivation of microorganisms and pesticide control / J.C. Kruithof [et al.] // 2nd international congress on ultraviolet technologies. Vienna, Austria, 2003.

- 141) Потапченко Н.Г., Илляшенко В.В., Савлук О.С. Обеззараживание воды при совместном воздействии пероксида водорода и ионов меди // Химия и технология воды. 1995. Т. 17, № 1. С. 78–84.
- 142) Microbial and disinfection byproducts rules simultaneous compliance guidance manual // United state environmental protection agency (USEPA). Report № EPA- 815-R-99-015, 1999.
- 143) Trihalomethanes in drinking water and spontaneous abortion / K. Waller [et al.] // Am J. Epidemiol. 1998. V. 9. P. 134-140.
- 144) Drinking water source and chlorination byproducts I. risk of bladder cancer / K.P. Cantor [et al.] // Am J. Epidemiol. 1998. V. 9. P. 21-28.
- 145) A prospective study of spontaneous abortion: relation to amount and source of drinking water consumed in early pregnancy / S.H. Swan [et al.] // Am J. Epidemiol. 1009. V. 9. P. 126-133.
- 146) Exposer of drinking water disinfection by products and pregnancy loss / D.A. Savitz [et al.] // Am J. Epidemiol. 2006. V. 164. P. 1043-1051.
- 147) Алексеев Л.С. Контроль качества воды: учебник. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: ИНФРА-М, 2004. 154 с.
- 148) Медные трубы [Электронный ресурс] / Справочно-информационный ресурс о трубах и ценах. Московский трубный двор: [сайт]. URL: <http://truba.msk.ru/copper-pipes> (дата обращения: 15.05.2016).
- 149) Юдин А.С. Разработка реактора и системы автоматического управления процессом обеззараживания сточных вод диафрагменным электрическим разрядом: дисс... канд. техн. наук. Иркутск: ИрГТУ, 2010. 121 с.
- 150) Пат. 137284 Российская Федерация, МПК C02F1/467. Устройство для обеззараживания и очистки воды / С.В. Какаулов [и др.]. № 2013128091/05, заявл. 19.06.2013, опубл. 10.02.2014.
- 151) Пат. 151949 Российская Федерация, МПК H02H5/00. Импульсный источник питания / С.В. Какаулов [и др.]. № 2013151953/08, заявл. 21.11.2013, опубл. 20.04.2015.

- 152) Божко И.В., Фальковский Н.И. Феноменологическое исследование диафрагменного разряда в воде // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. 2006. № 2 (14). С. 179-182.
- 153) Электрические разряды с жидкими электродами / С.В. Какауров [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 23. С. 199-201.
- 154) Electrical discharges with liquid electrodes used in water decontamination / S.V. Kakaurov [et al.] // High Temperature. 2014. V. 52(4). P. 490–496.
- 155) Диафрагменный электрический разряд (diaphragm (pin hole) electric discharge). URL: <http://www.youtube.com/watch?v=twV9wThcdX4> (дата обращения: 15.05.2016).
- 156) Krčma F., Kozáková Z., Procházková J. Diaphragm Discharge in Liquids: Fundamentals and Applications // Plasma for Environmental Issues. Sofia: Artgraf, 2009. P. 16-25.
- 157) Фальковский Н.И., Божко И.В. Плазменные факелы и электрофизические параметры диафрагменного разряда в воде // ЖТФ. 2008. Т. 78., Вып.7. С. 127–131.
- 158) Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Карташов А.М. Генерация автоколебательных процессов при диафрагменном разряде в электролите // Письма в Журнал технической физики. 2001. Т. 27, Вып. 20. С. 83-85.
- 159) Фальковский Н.И. Феноменологические особенности диафрагменного разряда // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. № 1.
- 160) Фальковский Н.И., Божко И.В. Плазменные факелы и электрофизические параметры диафрагменного разряда в воде // ЖТФ. 2008. Т. 78, Вып.7. С. 127–131.
- 161) Стройкова И.К., Максимов А.И. Процессы стерилизации растворов под действием тлеющего и низковольтного диафрагменного разрядов // Сб. мат. 3-его Международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии Иваново, 2002. С. 342-345.
- 162) Лапшакова К.А. Обеззараживание бытовых сточных вод малых населенных

пунктов диафрагменным электрическим разрядом: дис. канд. техн. наук. Иркутск: ИрГТУ, 2009. 115 с.

163) Kozáková Z. Electric discharges in water solutions habilitation : Ph.D. thesis. Brno University of Technology, Faculty of Chemistry, 2011.

164) Никифоров А.Ю., Максимов А.И. Влияние геометрии разрядного промежутка подводного диафрагменного разряда переменного тока на его физические и химические свойства // Прикладная физика. 2007. №6. С. 92-99.

165) Krčma F., Kozáková Z., Procházková J. Diaphragm discharge in liquids: fundamentals and applications // Plasma for Environmental Issues. Sofia: Artgraf, 2009. P. 16-25.

166) Stará Z, Krčma F. The study of H₂O₂ generation by DC diaphragm discharge in liquids Czech // J. Phys. 2004. V. 54. P. C1050-C1055

167) Influence of solution composition and properties on organic dye removal in DC diaphragm discharge in water / Z. Stará [et al.] // J. Adv. Oxid. Technol. 2008. V. 11. P. 155-162.

168) Stará Z. Study of chemical processes in electrical discharges in liquids : Ph.D. Thesis. Brno: Brno University of Technology, 2006.

169) Organic dye decomposition by DC diaphragm discharge in water: Effect of solution properties on dye removal / Z. Stará [et al.] // Desalination. 2009. V. 239(1-3). P. 283-294.

170) Stará Z., Krčma F., Olexová B. Comparison of organic dyes decomposition by DC diaphragm discharge, electrolysis and UV radiation effects // 18th International Symposium on Plasma Chemistry. ISPC 18. Kyoto Japan (August 26-31), 2007. Citation № 1. Paper 27P-153, CD-ROM

171) Stará Z., Krčma F. Organic compounds degradation in the diaphragm discharge // 2nd International workshop on cold atmospheric pressure plasma sources and applications CAPPSSA. Bruges Belgium (August 30- September 2), 2005. Citation № 3, SCOPUS. P. 238-241.

172) Stará Z., Krčma F. Treatment of humic acids solutions by DC diaphragm

discharge // Czech. J. Phys. 2006. V. 56. P. B1351-B1356, citation № 10 SCI.

173) DC diaphragm discharge in liquids: properties and application / Z. Stará [et al.] // 17th Symposium on Physics of Switching Arc. Nové Město na Moravě Czech Republic (September 8-13). 2007. P. 201-204.

174) Generation of dc pin-hole discharges in liquids: comparison of discharge breakdown in diaphragm and capillary configuration / Z. Kozáková [et al.] // Eur. Phys. J. D. 2015. V. 69. P. 100, citation № 3 INDEX.

175) Procházková J., Stará Z., Krčma F. Breakdown of the DC diaphragm discharge in liquids // 3rd International Symposium on Non-equilibrium Processes, Plasma, Combustion and Atmospheric Phenomena. Sochi, 2007. P. 85.

176) Stará Z., Krčma F. Influence of OH radicals on organic dyes in DC diaphragm discharge in water solutions // 27th International Conference on Phenomena in Ionized Gases XXVII ICPIG. Eindhoven Netherlands (July 18-22). CD-ROM (2005), citation № 3.

177) Organic dye decomposition by DC diaphragm discharge: Comparison of UV, electrolytic and ozone effect / Z. Kozáková [et al.] // 19th International Symposium on Plasma Chemistry ISPC 19. Bochum Germany (July 26-31), 2009. CD-ROM, citation № 2.

178) Кузьмичева Л.А., Титова Ю.В., Максимов А.И. Генерация химически активных окислительных частиц в растворах электролитов под действием тлеющего и диафрагменного разрядов // ЭОМ . 2007. №2. С. 20-23.

179) Стройкова И.К., Максимов А.И. Обеззараживание растворов тлеющим и диафрагменным разрядами атмосферного давления // Электронная обработка материалов. 2002. № 6. С. 43–49.

180) Стройкова И.К. Химическая активация водных растворов электролитов тлеющим и диафрагменным газовыми разрядами : дисс... канд. техн. наук. Иваново, 2001. 153 с.

181) Вторушина К.А., Юдин А.С., Железнова А.Е. Бактерицидные свойства растворов, обработанных электрическим разрядом // Вест, междунар. акад. наук

экологии и безопасности жизнедеятельности. 2008. Т. 13, № 3 (приложение). С. 200-203.

182) Применение низкотемпературной плазмы для обеззараживания вод / С.В. Какаулов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57, № 3. С. 156-159.

183) Эффективность применения электретных пленок в диафрагменном электрическом разряде для обеззараживания водных растворов / С.В. Какаулов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57, № 3. С. 229-233.

184) Оптимизация электропотребления установкой обеззараживания вод диафрагменным электрическим разрядом / С.В. Какаулов [и др.] // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2014. № 4. С. 158-164.

185) Какаулов С.В., Лисохмар Н.С., Бекасова В.Н. Очистка сточных вод от фенола с помощью диафрагменного электрического разряда // Общество, наука, инновации: сб. тр. Всерос. ежегодная науч.-практ. конф. Москва, 2013. С. 1669-1670.

186) Какаулов С.В., Меньщикова А.Н., Бекасова В.Н. Исследование влияния диафрагменного электрического разряда на степень очистки воды от формальдегида // Общество, наука, инновации: сб. тр. Всерос. ежегодная научно-практ. конф. . 2013. С. 1671-1672.

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

188) Bubbles formation in diaphragm discharge configuration supplied by DC non-pulsing voltage / F. Krčma [et al.] // Proceedings of ICPIG XXX. Belfast, 2011. P. 10-164.

189) Pin-Hole discharge creation in Na_2SO_4 water solutions / L. Hlavatá [et al.] // Symposium on plasma physics and technology. Praha, 2012. P. 42-42.

190) Никифоров А.Ю., Максимов А.И. Влияние геометрии разрядного промежутка подводного диафрагменного разряда переменного тока на его

- физические и химические свойства // Прикладная физика. 2007. №6. С. 92-99.
- 191) Negligible particle-specific antibacterial activity of silver nanoparticles / Z. Xiu [et al.] // Nano Letters. 2012. V. 12(8). P. 4271–4275.
- 192) Кузнецов В.В. Разработка математической модели радиационно-плазмодинамических процессов в факеле капиллярного разряда // Физико-химическая кинетика в газовом разряде. 2011. Т. 11, № 1. С. 1-6.
- 193) Пат. 92002 Российская Федерация, МПК C02F1/46 . Устройство для обеззараживания воды диафрагменным электрическим разрядом / А.С. Юдин [и др.]. № 2009136882/22 (052137), заявл. 05.10.2009, опубл. 10.03.2010.
- 194) Пат. 2243546 Российская Федерация, МПК G01N27/62. Способ получения локального электрического разряда в жидкости и устройство для его осуществления (варианты) / М.А. Соколов М.А. № 2001124261/28, заявл. 08.23.2001, опубл. 27.12.2004.
- 195) Пат. 2368895 Российская Федерация, МПК G01N27/62. Способ эмиссионного анализа для определения элементного состава с использованием разряда в жидкости / М.А. Соколов. № 2008120713/28, заявл. 20.05.2008, опубл. 27.09.2009. Бюл. № 27.
- 196) Пат. 2195961 Российская Федерация, МПК A61L2/14. Способ стерилизации / И.К. Стройкова [и др.]. № 2000130091/13, заявл. 30.11.2000, опубл. 10.01.2003.
- 197) СанПиН 2.1.4.1074-01 Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Москва: Минздрав России, 2002. 99 с.
- 198) Escherichia coli disinfection by electrohydraulic discharges / W.K. Ching [et al.] // Environmental & Science Technology. 2001. V. 35. P. 4139.
- 199) Ching W.K., Colussi A.J., Hoffmann M.R. Soluble sunscreens fully protect E. coli from disinfection by electrohydraulic discharges // Environmental Science & Technology. 2003. V. 37. P. 4901.
- 200) Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment / B.R

- Locke [et al.] // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2006. V. 45(3). P. 882-905.
- 201) Water treatment using plasma technology / C.A. Campbell [et al.] // *SD Report*, Drexel University, Philadelphia, 2006.
- 202) Locke B.R., Thagard S.M. Analysis and review of chemical reactions and transport processes in pulsed electrical discharge plasma formed directly in liquid water // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2012. V. 32.5. P. 875-917.
- 203) Formation of ROS and RNS in Water Electro Sprayed through Transient Spark Discharge in Air and their Bactericidal Effects / M. Zdenko [et al.] // *Plasma Processes and Polymers*. 2013. V. 10.7. P. 649-659.
- 204) Ravindra J.P., Thagard S.M. Streamer-like electrical discharges in water: part II. Environmental applications // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2013. V. 33.1. P. 17-49.
- 205) The analysis of active products of spark discharge plasma radiation determining biological effects in tissues / I.P. Ivanova [et al.] // *Sovremennye tehnologii v medicine*. 2012. № 2. P. 20–30.
- 206) Пискарев И.М., Иванова И.П., Трофимова С.В. Химические эффекты самостоятельного искрового разряда. Моделирование процессов в жидкости // *Химия высоких энергий*. 2013. Т.47(2). С. 152–156.
- 207) Пискарев И.М., Иванова И.П., Трофимова С.В. Сравнение химических эффектов УФ-излучения искрового разряда на воздухе и ртутной лампы низкого давления // *Химия высоких энергий*. 2013. Т. 47(2). С. 376–380.
- 208) Пискарев И. М., Иванова И. П., Трофимова С. В. Источник излучения плазмы на основе искрового разряда на воздухе для биомедицинских исследований // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2014. № 10. С.12-16.
- 209) Иванова И.П., Пискарев И.М., Трофимова С.В. Механизм воздействия УФ-излучения искрового разряда и ртутной лампы низкого давления на биологические объекты // *Медицинский альманах* . 2013. №3 (27). С.52-53.

- 210) The study of biocidal mechanisms of spark discharge plasma radiation / I. Ivanova [et al.] // *Sovremennye tehnologii v medicine (Modern Technologies in Medicine)*. 2012. № 3. P. 12–18.
- 211) Образование активных частиц при искровом электрическом разряде и их возможное использование / И.М. Пискарев [и др.] // *Химия высоких энергий*. 2012. Т. 46(5). С. 406–411.
- 212) Пискарев И.М., Рылова А.Е., Севастьянов А.И. Образование озона и перекиси водорода в электрическом разряде в системе раствор-газ // *Электрохимия*. 1996. № 32(7). С. 895–897.
- 213) Образование пероксинитрита под действием излучения плазмы искрового разряда / И.М. Пискарев [и др.] // *Химия высоких энергий*. 2014. № 48(3). С. 252–256.
- 214) Ivanova I.P., Piskarev I.M., Trofimova S.V. Comparison of biocidal and sporicidal effects of spark discharge plasma and mercury-vapor low pressure lamp radiations // *IOSR Journal of Pharmacy*. 2013. № 3(4). P. 51–53.
- 215) Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1986. 253 с.
- 216) Обеззараживающее действие мощного импульсного электрического разряда в воде II. Экспериментальные результаты / К.В. Вилков [и др.] // *Письма в ЖТФ*. – 2004. Т. 30, Вып. 7. С. 48–53.
- 217) Вторушина К.А., Юдин А.С., Суворов И.Ф. Экспериментальное обоснование применения диафрагменного электрического разряда в технологии обеззараживания сточных вод // *Вестник гражданских инженеров*. 2008. № 4 (17). С. 84–86.
- 218) Бактерицидные свойства воды, обработанной диафрагменным электрическим разрядом / К.А. Вторушина [и др.] // *Сотрудничество для решения проблемы отходов: матер. V Междунар. конф. Харьков, 2008*. С. 268–269.
- 219) Вторушина К.А., Юдин А.С., Железнова Е.А. Бактерицидные свойства растворов, обработанных электрическим разрядом // *Вест. междунар. акад. наук*

экологии и безопасности жизнедеятельности. 2008. Т. 13, № 3 (приложение). С. 200–203.

220) Применение электроразрядной технологии для обеззараживания сточных вод / К.А. Вторушина [и др.] // Вестник Рос. ВМедА. 2008. № 3 (23). Приложение 2 (Ч. I). С. 466.

221) Лапшакова К.А., Юдин А.С., Суворов И.Ф. Применение диафрагменного разряда для обеззараживания воды в плавательных бассейнах // Вода и экология: Проблемы и решения. 2009. № 2. С. 40–44.

222) Обеззараживание сточных вод с применением диафрагменного электрического разряда / К.А. Лапшакова [и др.] // 1-я региональная Восточно-Европейская конференция молодых ученых и специалистов водного сектора: сборник научных трудов. Минск: БНТУ, 2009. С. 150–155.

223) Новый электрофизический способ очистки и обеззараживания сточных вод / И.Ф. Суворов [и др.] // Экономика природопользования и природоохраны: сб. статей. Пенза, 2005. С. 200–202.

224) Опыт эксплуатации первой промышленно-экспериментальной установки по обеззараживанию сточных вод на основе использования диафрагменного электрического разряда / И.Ф. Суворов [и др.] // Вестник Междунар. акад. наук экологии и безопасности жизнедеятельности. 2008. Т. 13, № 3 (приложение). С. 275–277.

225) Юдин А.С., Суворов И.Ф. Обеспечение безопасности на производстве при обеззараживании сточных вод диафрагменным электрическим разрядом // Безопасность жизнедеятельности в 3-м тысячелетии: сборник материалов IV Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. Челябинск: ЮУрГУ, 2009. Т. 1. С. 377–378.

226) Юдин А.С., Суворов И.Ф. Методы контроля и поддержания параметров диафрагменного разряда в технологии обеззараживания сточных вод // Вестник Междунар. акад. наук экологии и безопасности жизнедеятельности. 2008. Т. 13, № 3 (приложение). С. 296.

227) Юдин А.С., Суворов И.Ф. Оптимальный выбор параметров диафрагмы

разрядной камеры для обработки жидкости диафрагменным электрическим разрядом // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: сб. тр. Междунар. научно-техн. конф. Тольятти: ТГУ, 2009. Ч. 1. С. 162–165.

228) Экологические аспекты обеззараживания сточных вод диафрагменным электрическим разрядом / А.С. Юдин [и др.] // Безопасность жизнедеятельности в 3-м тысячелетии: сб. матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. В 2-х т. – Челябинск: ЮУрГУ, 2009. Т. 2. С. 234–235.

ПРИЛОЖЕНИЕ №1

АНАЛИЗ ВОДЫ: ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПО 30 ПАРАМЕТРАМ

(ТЕСТ № 1160СЭКВ)
РЕЗУЛЬТАТ ИССЛЕДОВАНИЯ

№ 87 от 24.10.2015 г.

Дата начала исследования 18.10.2015 г.

Дата окончания исследования 24.10.2015 г.

Регистрационный номер образца ИНЗ: 216332855

Какауров Сергей Владимирович

Испытуемый образец: Образец воды из сети питьевого водоснабжения

Место отбора пробы: г. Чита, ул. Баргузинская 49.

№ п/п	Номенклатура показателей, единицы измерения	Значение показателя	ПДК (предельно- допустимая концентрация)	Метод испытаний (ссылка на НД)
1	Алюминий, мг/дм ³	0,08	0,5*	МВИ 01.1:1.2.3.4.11-05
2	Железо общее, мг/дм³	1,3	0,3*	ФР.1.31.2005.01433 МУ 08-47/165
3	Марганец, мг/дм ³	0,096	0,5*	МУК 4.1.1516-03
4	Кадмий, мг/дм ³	< 0,0002	0,001*	МУК 4.1.1504-03
5	Медь, мг/дм ³	0,037	1,0*	МУК 4.1.1504-03
6	Мышьяк, мг/дм ³	0,010	0,05*	МУК 4.1.1510-03
7	Ртуть, мг/дм ³	0,00017	0,0005*	МУК 4.1.1512-03
8	Свинец, мг/дм ³	0,0022	0,03*	МУК 4.1.1504-03
9	Кальций, мг/дм ³	69,0	25 – 130,0*	РД 52.24.403-2007
10	Магний, мг/дм ³	18,0	5 – 65,0**	ГОСТ 23268.5-78
11	Натрий, мг/дм ³	32,0	200,0*	ФР.1.31.2005.01774
12	Калий, мг/дм ³	5,0	20,0*	ФР.1.31.2005.01774
13	Нитраты, мг/дм ³	0,93	45,0*	ФР.1.31.2005.01774
14	Нитриты, мг/дм ³	0,005	3,0*	ПНДФ 14.1:2.3-95
15	Щелочность, ммоль/дм ³	6,0	0,5 – 6,5**	РД 52.24.493-2006
16	Гидрокарбонаты, мг/дм ³	259,0	30 – 400,0**	РД 52.24.493-2006
17	Жесткость общая, ОЖ	3,8	10,0*	ГОСТ Р 52407-2005
18	Водородный показатель (рН), ед	7,7	6,0 – 9,0*	ПНДФ 14.1:2:3.4.121-97
19	Нефтепродукты, мг/дм ³	0,04	0,1*	МУК 4.1.1262-03
20	Мутность, ЕМФ/дм³	2,8	2,6*	ГОСТ 3351-74
21	Цветность, град.	7,6	20*	ГОСТ Р 52769-2007
22	Привкус, баллы	2	2*	ГОСТ 3351-74
23	Запах, баллы	1	2*	ГОСТ 3351-74
24	Перманганатная окисляемость, мг/дм ³	1,25	5,0*	ПНДФ 14.1:2:4.154-99
25	Аммиак (по азоту), мг/дм ³	0,35	2,0*	ПНДФ 14.1:2.1-95
26	Сульфаты, мг/дм ³	50,0	500,0*	ПНДФ 14.1:2.159-2000
27	Хлориды, мг/дм ³	84,0	350,0*	ГОСТ 4245-72
28	Фториды, мг/дм ³	0,35	1,5*	ФР.1.31.2005.01774
29	Сульфиды (сероводород), мг/дм ³	0,001	0,003*	ПНДФ 14.1:2:4.178-02
30	Общая минерализация, мг/дм ³	810	1000,0*	ПНДФ 14.1:2.114-97

* Нормативы, введенные СанПиН* 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества».

** Нормативы физиологической полноценности питьевой воды, введенные СанПиН 2.1.4.1116-02.

«Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, расфасованной в емкости. Контроль качества».

Врач
Независимой лаборатории
ИНВИТРО
Макарова Т.А.




Оставить отзыв:

