

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
"Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова"

На правах рукописи

МАТЮНИН Алексей Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦИИ ОЗОНА В БАРЬЕРНОМ
РАЗРЯДЕ С ВЫСОКООМНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Пичугин Юрий Петрович

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ	9
1.1 Области применения систем генерации озона в барьерном разряде	9
1.2 Основные положения теории барьерного разряда	20
1.3 Влияние температуры в разрядной озонаторной камере на синтез озона в барьерном разряде	28
2 ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКООМНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦИИ ОЗОНА В БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ	37
2.1 Количество электричества, переносимого микроразрядом	37
2.2 Влияние активного сопротивления на процесс заряда электроемкости	43
3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В СИСТЕМАХ ГЕНЕРАЦИИ ОЗОНА С ВЫСОКООМНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ...50	
3.1 Постановка задачи	50
3.2 Математическая модель с распределенными параметрами в плоскосимметричной системе координат	54
3.3 Математическая модель с распределенными параметрами в цилиндрических координатах	70
3.4 Математическая модель с сосредоточенными параметрами	76
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦИИ ОЗОНА В БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ С ВЫСОКООМНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ	81
4.1 Действующие макеты для физического моделирования и исследования процессов электросинтеза озона	81
4.2 Осциллографическое исследование барьерного разряда в системах генерации озона с высокоомными электродами	86
4.3 Экспериментальное исследование и сравнение электрических параметров, производительности и нагрева систем генерации озона с высокопроводящими и высокоомными электродами различных конструкций	94

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	121
Приложение А. Акты о внедрении результатов диссертации в практическую деятельность	137
Приложение Б. Фотографии опытных образцов озонаторных установок с разрядными камерами с высокоомными электродами	140

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Барьерный электрический разряд является одним из экономически эффективных процессов синтеза озона из кислородосодержащих газов: воздуха или концентрированного кислорода. Согласно современным представлениям о барьерном разряде, его пространственно-временная структура состоит из отдельных микроударов. Регулирование параметров микроударов и барьерного разряда в целом может улучшить электроэнергетические и эксплуатационные характеристики систем генерации озона в барьерном разряде.

Системы генерации озона в барьерном разряде находят применение в экологически малоопасных методах дезинфекции воды и воздуха, при их очистке от техногенных загрязнений. Такие системы широко используются при отбеливании целлюлозы и имеют ряд других промышленных применений.

Системы генерации озона в барьерном разряде, представляющие собой схемотехническое сочетание системы электропитания высокого напряжения, разрядных озонаторных камер и пневматической системы подачи воздуха или кислорода, являются базовым компонентом озонаторного оборудования. Кроме того, в состав озонаторного оборудования входит система управления процессом электросинтеза озона, защиты и контроля, а также система охлаждения. В современных озонаторах система электропитания основывается на синусоидальном или импульсном источнике высокого напряжения, как правило, повышенной частоты порядка 1 кГц. Система охлаждения разрядных озонаторных камер принудительная воздушная или водяная. В состав системы управления и защиты входят предохранители, автоматические выключатели, регулирующие устройства. Контролировать параметры процесса электросинтеза озона помогают электроизмерительные приборы, расходомеры, измерители концентрации кислорода.

В диссертации решается принципиальная проблема увеличения производительности систем генерации озона в барьерном разряде при

сокращении выделяющейся в разряде теплоты. Успешное решение этой проблемы позволит достигнуть следующих результатов:

- повысить энергоэффективность процесса синтеза озона;
- снизить вероятность электротеплового пробоя диэлектрического барьера;
- упростить устройство системы охлаждения разрядных озонаторных камер.

Степень разработанности темы. Изучению систем генерации озона в барьерном разряде посвящены работы таких современных российских авторов, как И.С. Ткаченко, К.В. Козлов, В.И. Гибалов, В.Г. Самойлович, М.В. Соколова, Ю.П. Пичугин, В.В. Андреев. Заметными в области исследования систем генерации озона в барьерном разряде зарубежными учёными являются G.J. Pietsch, U. Kogelschatz, M.R. Ghazanchaei.

Заслуживает внимания разработка С.В. Шапиро и коллектива авторов, заключающаяся в использовании эффекта Джоуля-Томсона для охлаждения газа в озонаторе. Однако, такого способа уменьшения тепловыделения в разрядной озонаторной камере, как использование электродов с повышенным активным сопротивлением, литературный обзор не выявляет.

Целью диссертационной работы является поиск путей повышения энергоэффективности систем генерации озона в барьерном разряде.

Для достижения этой цели в диссертации решаются следующие задачи:

1. Разработка математических моделей и исследование электроразрядных процессов в системах генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами.

2. Экспериментальное исследование путей повышения энергоэффективности систем генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами.

3. Определение параметров высокоомных электродов, обеспечивающих максимальную энергоэффективность систем генерации озона в барьерном разряде.

Научная новизна.

1. Впервые предложен, разработан и реализован новый метод повышения энергоэффективности систем генерации озона в барьерном разряде за счёт использования высокоомных электродов разрядных камер, эти разработки защищены патентами РФ.

2. Определены параметры импульса тока барьерного микрозаряда при наличии высокоомных электродов, такие как: максимальная длина микрозаряда, время развития, максимальный ток, - рассчитанные значения хорошо согласуются с полученными в диссертации экспериментальными данными.

3. Установлено, что с увеличением активного сопротивления в цепи микрозаряда увеличивается длительность импульса микрозаряда, при этом длина микрозаряда от активного сопротивления цепи микрозаряда не зависит.

4. Рассчитаны значения приэлектродных и джоулевых потерь энергии при протекании барьерного поверхностного микрозаряда с высокоомными электродами, определены предельные режимы работы систем генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами.

Теоретическая и практическая значимость работы. Установлены новые математические закономерности эволюции тока барьерного разряда при условии наличия высокоомных электродов.

Отработаны элементы технологии создания высокоомных электродов, позволившие изготовить действующие образцы озонаторных установок, обладающие повышенной до 20 % производительностью при заданном напряжении.

Результаты диссертации внедрены на действующие предприятия, что подтверждается актами внедрения: ООО «Компас» г. Пермь, ООО "Завод "Заряд" г. Гай Оренбургской обл., ООО «ЭКОФОН» г. Чебоксары

Методология и методы исследования. Проводились сравнительные экспериментальные исследования осциллограмм, а также электроэнергетических параметров, производительности и температуры разработанных физических

моделей. Математическое моделирование осуществлялось с применением теории электрических цепей с сосредоточенными и распределёнными параметрами.

Конструктивным схемотехническим объектом диссертационного исследования является система генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами, обладающими вносимым в барьерный микроразряд активным сопротивлением порядка $10^3 - 10^4$ Ом.

Положения, выносимые на защиту.

1. Новый метод повышения эффективности систем генерации озона в барьерном разряде в результате повышения однородности протекания микроразрядов барьерного разряда и снижения амплитуды импульсов тока микроразрядов за счёт использования высокоомных электродов разрядных камер.

2. Математические модели систем генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами.

3. Действующие макеты систем генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами, позволяющие осуществлять осциллографические исследования, измерение и сравнение электроэнергетических параметров и производительности при различном активном сопротивлении электродов.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов повышения производительности и энергоэффективности систем генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается сопоставлением и удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальных данных. Точность математических моделей ограничена принятыми аналогиями и допущениями. Точность результатов экспериментов ограничена точностью измерительных приборов, а также колебанием параметров системы питания и системы подачи воздуха.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- I Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электроники и энергоэффективности» (Чебоксары, 2017 г.);

- IX Республиканском конкурсе научно-исследовательских работ студентов, молодых учёных и специалистов «Наука XXI века» (Чебоксары, 2013 г.);

- 32-ом Всероссийском научно-прикладном семинаре «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии» (Москва, химический факультет МГУ, 20 июня 2012 г.);

- VII Республиканском конкурсе инновационных проектов по программе У.М.Н.И.К. (Чебоксары, 2012 г.);

- XIII межрегиональной конференции-фестивале научного творчества учащейся молодёжи «Юность Большой Волги» (Чебоксары, 14 мая 2011 г.);

- Республиканском молодёжном форуме «Инициатива молодых – будущее Чувашии» (Чебоксары, 2009 г.);

- Международной молодёжной научной конференции «XVII Туполевские чтения» (Казань, 26-28 мая 2009 г.).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационного исследования отражены в 23 печатных работах, в том числе, в 7 статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных для опубликования ВАК РФ. Получено два патента на изобретение и патент на полезную модель.

Личный вклад автора. Исследование математической модели с распределёнными параметрами систем генерации озона с высокоомными электродами в цилиндрической системе координат. Изготовление физических моделей систем генерации озона с высокоомными электродами различных конструкций. Проведение сравнительных экспериментов электроэнергетических параметров и производительности систем генерации озона при различных значениях активного сопротивления высокоомных электродов.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 основных глав, заключения, 2 приложений, выполнена на 140 страницах, содержит 53 иллюстрации, 25 таблиц, перечень литературы из 134 наименований.

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1.1 Области применения систем генерации озона в барьерном разряде

Получение озона в барьерном электрическом разряде, а также в коронном разряде и электрохимическим методом являются экономически наиболее выгодными по сравнению с другими способами получения озона. Также существуют изобретения по безбарьерным короноразрядным озонаторам. В этих изобретениях описываются конструкции озонаторов, не содержащие диэлектрического барьера в разрядном промежутке, а также особенности электрического питания таких конструкций [10, 31, 101, 105]. Электрохимический способ получения озона позволяет очень точно регулировать количество образующегося озона, т.к. в озонаторах такого типа есть определённая зависимость между количеством получаемого озона и током, прошедшим через электрохимическую ячейку озонатора, что основано на законе Фарадея [44, 82].

Барьерный разряд непосредственно применяется при очистке газов, прежде всего, от таких соединений как сероводород, аммиак, летучих органических соединений – плазменная обработка газовых выбросов; при окислении оксида азота (NO), содержащегося в выхлопных газах. Широкое применение барьерный разряд нашел в обработке поверхности материалов в целях улучшения адгезии, а также улучшения травления или осаждения тонких покрытий. Интересным является применение барьерного разряда для создания безртутных люминесцентных и эксимерных ультрафиолетовых ламп. Достигли массового применения газоразрядные экраны, или плазменные дисплейные панели (PDPs), отдельные ячейки которых представляют собой миниатюрные люминесцентные лампы, имеющие слой красного, зелёного или синего люминофора, периодически подсвечиваемого излучением барьерного разряда.

В таблице 1 представлены основные характеристики одних из лучших отечественных и иностранных озонаторов барьерного разряда [1, 26, 40, 44, 82, 90, 127].

Таблица 1 – Основные характеристики некоторых озонаторов барьерного разряда.

Название озонатора / производитель	Энергопотребление	Синтез из воздуха или кислорода	Другие параметры
Л7П / «Курганхиммаш»	14 кВт·ч/кг при конц. 20 г/м ³	воздух	0-160 г/ч О ₃ , масса 240 кг
ПЗ1 / «Курганхиммаш», Россия	17 кВА·ч/кг при конц. 20 г/м ³	воздух*	760 г/ч О ₃ , удел. произв. 1,3 г/ч·дм ² , 400-800 Гц, масса 360 кг
«БИКОЗ-25» / ФГУП "ГНЦ РФ ТРИНИТИ"	6 кВт·ч/кг при конц. 150 г/м ³	кислород	25 г/ч О ₃ , масса 1,3 кг
«БИКОЗ-1000» / ФГУП "ГНЦ РФ ТРИНИТИ"	5 кВт·ч/кг при конц. 70 г/м ³	кислород	1000 г/ч О ₃ , масса 10 кг
50К / НПО «Позитрон-Квинта», Россия	10 кВт·ч/кг при конц. 100 г/м ³	кислород	50 г/ч О ₃ , масса 60 кг
ОБП-3 / ЗАО «Московские озонаторы», Россия	8,33 кВт·ч/кг при конц. 100 г/м ³	кислород*	3000 г/ч О ₃ , масса 220 кг
LAB 2B / Ozonia - Degremont - Suez Environnement - GDF-Suez, Швеция	13 кВА·ч/кг при конц. 50 г/м ³	кислород*	8 г/ч О ₃ , масса 6 кг
OZAT CFS-7 / Ozonia, Швеция	9 кВА·ч/кг при конц. 120 г/м ³	кислород*	500 г/ч О ₃ , масса 200 кг
CFV-05 / Ozonia, Швеция	7,7 кВА·ч/кг при конц. 120 г/м ³	кислород*	5000 г/ч О ₃ , удел. произв. 2,4 г/ч·дм ² , масса 2000 кг
CFY-24 / ICAN, КНР	13,3 кВт·ч/кг при конц. 60 г/м ³	кислород	24 г/ч О ₃ , масса 40 кг
CFY-200 / ICAN, КНР	12,5 кВт·ч/кг при конц. 60 г/м ³	кислород	200 г/ч О ₃ , масса 280 кг
GSO-60 / WEDECO - Xylem, Германия - США	7,5 кВт·ч/кг при конц. 100 г/м ³	кислород	1000 г/ч О ₃ , масса 360 кг
SMO-550 / WEDECO - Xylem, Германия - США	6,5 кВт·ч/кг при конц. 102 г/м ³	кислород	8000 г/ч О ₃ , масса 3250 кг
SMA-500 / WEDECO - Xylem, Германия - США	5,0 кВт·ч/кг при конц. 30 г/м ³	воздух	9700 г/ч О ₃ , масса 2850 кг

Примечание: возможно изготовление некоторых озонаторов (*) как на кислороде, так и на воздухе, но отличающихся по характеристикам.

Особенностью применения озона и систем его генерации является то, что озон является средством, производимым на месте использования. При этом отсутствуют затраты на транспортировку, тем более что при концентрации выше 20% озон может превращаться в кислород взрывным образом [45]. Поэтому передача озона по трубопроводу под давлением либо закачивание в баллоны являются опасными.

Озон применяется достаточно широко благодаря своим отличным окислительным и дезинфицирующим способностям. Первые опыты по обеззараживанию воды озоном были проведены в конце XIX века во Франции. В начале XX века установки для озонирования воды были построены в некоторых городах Германии и Франции, а также в Петербурге [35].

Кроме водоподготовки, озон также применяется в таких областях, как:

- отбелка целлюлозы [7, 99, 130];
- очистка сточных вод (от фенола и его производных, компонент нефти, ПАВ, красителей, от цианидов и др. [43]);
- очистка газовых выбросов (выбросов тепловых электростанций, газов производств, дурно пахнущих газов и др. [42]);
- применение озона в гидрометаллургии для извлечения металлов из руд и растворов является перспективным направлением [43];
- в медицине, в сельском хозяйстве и некоторых других областях.

Для определённой области применения требуется и определённая доза озона, а именно количество озона в миллиграммах, приходящееся на 1 л обрабатываемого вещества (например, воды), необходимое для окисления или дезинфекции этого объёма [42]. Так для дезинфекции воды при многоступенчатой схеме водоподготовки вполне достаточной является доза озона 5-6 мг/л (для воды, нуждающейся в значительной дезинфекции). При сравнительно невысокой цветности воды (до 50 град) требуется концентрация озона не более 5 мг/л, для устранения высокой цветности воды (> 200 град) требуется концентрация озона порядка 30 мг/л. Поэтому для очистки вод с повышенной цветностью целесообразно применять реагентный метод [29]. При этом в процессе

озонирования необходимо учитывать, что остаточная концентрация озона в воде в несколько раз и даже на порядок меньше его концентрации в воздействующем на воду озонированном газе [35, 42].

Для уничтожения бактерий и микроорганизмов в воздухе требуется доза озона порядка 0,05 мг/л. При обработке тары для уничтожения микрофлоры требуется доза озона порядка 0,5 мг/л. В обоих случаях время обработки озоном с такой концентрацией в воздухе составляет порядка получаса [42].

Большие дозы озона (30 – 100 мг/л) могут требоваться для очистки сточных вод от различных сильных загрязнителей [43].

При любом применении озона, где возможен контакт человека с ним, необходимо соблюдать меры предосторожности, не допускать вдыхания человеком воздуха с концентрацией озона выше уровня ПДК. Предельно допустимая концентрация озона в воздухе составляет 0,1 мг/м³ или 5·10⁻⁶ % об. [35, 45] и хорошо ощутима по запаху для человека. Согласно определению, концентрация озона во вдыхаемом воздухе ниже уровня ПДК (< 0,1 мг/м³) «при ежедневной (кроме выходных дней) работе в течение 8 ч или при другой продолжительности, но не более 41 ч в неделю, в течение всего рабочего стажа не может вызвать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений» [28].

При превышении ПДК озона в процессе работы человека сразу обнаруживаются следующие симптомы отклонений в здоровье [117]:

- 0,1 – 0,2 мг/м³: раздражение горла и носа, сухость слизистой дыхательных путей;

- 0,4 – 1 мг/м³: изменение некоторых параметров зрения;

- 2 – 15 мг/м³: раздражение дыхательных путей, кашель, ожог горла, головокружение, головная боль, рвота, сильная усталость, возможен резкий упадок сердечной деятельности;

- 15 – 20 мг/м³: развивается отёк лёгких.

Контакт человека с недопустимыми для организма концентрациями озона повышает вероятность в перспективе, в отдалённые сроки жизни появления заболеваний или отклонений в состоянии здоровья. Озон может поражать центральную нервную систему [35], вызывать нарушение сердечно-сосудистой и кроветворной систем [117].

Высокие концентрации озона во вдыхаемом воздухе воздействуют на холестерин в крови человека с образованием нерастворимых форм, приводящим к атеросклерозу, воздействуют на органы размножения [34].

Оценить объёмы применения озона в наиболее значимых областях можно по таблице 2, в которой представлены данные о поставках озонаторных установок на рынок евро-азиатской группы EA₃G в период 1964-2004 г.г.

Таблица 2 – Обзор рынка EA₃G в период 1964-2004 г.г. [95].

Область применения	Число контрактов	Мощность озонаторов (в условных единицах)
Питьевая вода	650	14 351
Промышленная сточная вода	71	1124
Муниципальная сточная вода	9	751
Индустрия	71	1697
Отбеливание целлюлозы	24	3040
Охлаждение градирен	57	86
Сельское хозяйство	6	6
Другие применения	4	160
Суммарно	894	21246

По данным таблицы 2 применение озона наиболее востребовано при подготовке питьевой воды, в отбеливании целлюлозы, при очистке промышленных и городских сточных вод, для различных применений в индустрии.

Необходимо подробнее остановиться на применении озона при отбелке целлюлозы, потому что такой способ исключает появление очень опасных для здоровья диоксинов и других хлорированных органических соединений, образующихся в процессе хлорной отбелки целлюлозы [7]. Также озонирование

целлюлозы позволяет полностью разрушить структуры лигнинных соединений, от которых целлюлоза должна быть очищена [99]. В настоящее время существуют две технологии отбеливания целлюлозы, исключая образование диоксинов: технология ECF (Elemental chlorine free) без использования элементарного хлора, с заменой его на диоксид хлора и технология TCF (Total chlorine free) полностью безхлорной отбеливания, при которой используются кислород, озон, пероксид водорода и др. Обе технологии позволяют максимально снизить содержание хлорорганических соединений как в готовой продукции, так и в сточных водах целлюлозно-бумажного комбината. Применение озонной отбеливания по технологии TCF возможно на сегодняшний день, если будет иметь экономическое преимущество по сравнению с технологией отбеливания ECF [7].

Самой значимой сферой применения озона и систем его генерации является обработка воды. При этом озон не единственное средство, применяемое при обработке воды, и вопрос использования озона при обработке воды или его сочетания с другими окислителями или дезинфицирующими средствами можно считать открытым и важным.

Подготовка питьевой воды состоит из нескольких стадий. Одна из первых и основных стадий – это коагулирование с последующим хлопьеобразованием содержащихся в воде примесей с помощью специальных реагентов-коагулянтов. В качестве коагулянтов обычно используют сернокислый алюминий $Al_2(SO_4)_3$, сернокислое железо $Fe_2(SO_4)_3$, железный купорос $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, хлорное железо $FeCl_3$. Затем происходит осветление и фильтрование воды с целью осаждения взвешенных частиц и задержания бактерий. После этого происходит обеззараживание воды с помощью дезинфицирующих средств, таких как озон, до полного уничтожения бактерий и вирусов. И в случае наличия в воде сильных запахов и привкусов производят аммонизацию – добавление аммиака [7].

Очистка сточных вод также состоит из нескольких этапов: механическая очистка для задержания и удаления примесей позволяет устранить до 60% нерастворимых загрязнений, биологическая очистка с помощью живых микроорганизмов для минерализации органических соединений, дезинфекция для

уничтожения патогенных микроорганизмов, содержащихся в сточных водах. Также при очистке сточных вод применяются физико-химические методы: флотация (адсорбционно-пузырьковое разделение), коагулирование, сорбция (очистка с помощью твердых сорбентов) и озонирование [99].

Озонирование находит применение не только в качестве дезинфицирующего средства при обеззараживании питьевой воды и сточных вод, но и в качестве средства устранения запахов, а также участвует в деструкции трудноокисляемых органических соединений.

Окислительные и дезинфицирующие свойства средств-реагентов тесно связаны, и сильные вещества-окислители обладают также и сильными дезинфицирующими свойствами. Окислительные свойства реагентов, применяемых для очистки и дезинфекции воды, можно оценить по значениям их окислительных потенциалов (таблица 3).

Таблица 3 – Окислительные потенциалы веществ, применяемых или имеющих перспективу применения при очистке воды [43, 118].

Химическое вещество	Окислительный потенциал (кислая среда), В
Фтор (F ₂)	3,06
Гидроксил-радикал (ОН [·])	2,8
Атомный кислород (O)	2,42
Озон (O ₃)	2,07
Перекись водорода (H ₂ O ₂)	1,77
Перманганат калия (KMnO ₄)	1,7
Пероксидный радикал (RO ₂ [·])	1,7
Хлорноватистая кислота (HClO)	1,49
Хлор (Cl ₂)	1,35
Диоксид хлора (ClO ₂)	1,25
Кислород (O ₂)	1,2

Из веществ, перечисленных в таблице 3, озон и диоксид хлора относятся к 1 классу опасности, хлор, фтор, перманганат калия, хлорноватистая кислота и перекись водорода – ко второму классу опасности, гидроксил-радикал также

считается опасным для организма человека, т.к. обладает повышенной реакционной способностью. Атомарный кислород, по некоторым сведениям, является даже полезным для организма [5], а по некоторым – вредным и опасным для человека наряду с озоном [34, 108]. В любом случае, такие сильные окислители, как вещества, перечисленные в таблице 3, требуют строгого соблюдения правил техники безопасности при их использовании.

Самыми сильными окислительными свойствами обладает фтор, поэтому фторирование воды может быть очень эффективным благодаря чрезвычайно высокому значению окислительного потенциала фтора. Однако этот метод не получил распространения, т.к. фторирование воды в конечном итоге приводит к загрязнению воды анионами фтора, что может оказать губительные последствия для флоры и фауны [2]. Другими недостатками применения фтора являются высокие значения токсичности и стоимости реагентов.

На сегодняшний день самыми распространенными при дезинфекции воды являются хлорсодержащие реагенты, т.к. хлорсодержащим реагентам свойственен эффект последействия, когда дезинфицирующие свойства реагента сохраняются и активно действуют в течение длительного времени после ввода в обрабатываемую среду. К хлорсодержащим дезинфицирующим веществам, прежде всего, относятся: газообразный хлор (Cl_2), гипохлорит натрия (NaOCl) и диоксид хлора (ClO_2). Критический анализ свойств гипохлорита натрия и его сравнение с хлором (Cl_2) [27] приводит к выводу, что выбор между гипохлоритом и хлором – это выбор «из двух зол». Оба этих вещества представляют большую опасность при их производстве, транспортировке и применении. Поэтому актуальным является вопрос применения при подготовке питьевой воды такого дезинфицирующего вещества, которое бы длительно сохранялось в системе водоснабжения и было бы более безопасным, чем хлорсодержащие реагенты. При использовании диоксида хлора (ClO_2) необходимо учитывать, что это высокотоксичное вещество, производство которого дорого и осуществляется на месте применения, т.к. диоксид хлора не подлежит транспортировке.

При обработке воды хлорсодержащими реагентами образуются побочные галогеносодержащие соединения. В хлорированной воде можно обнаружить более тридцати летучих галогеноорганических соединений, некоторые из которых обладают мутагенным или канцерогенным действием [42]. При хлорировании воды могут образовываться следующие опасные побочные продукты [24, 25, 27, 46]:

- хлороформ, он же трихлорметан (ПДК в питьевой воде 0,06 мг/л, канцероген [25]);

- дихлорбромметан, он же бромдихлорметан (ПДК в питьевой воде 0,03 мг/л, канцероген [25]);

- дибромхлорметан (ПДК в питьевой воде 0,03 мг/л, 2 класс опасности [25]);

- четыреххлористый углерод, он же тетрахлорметан (ПДК в питьевой воде 0,002 мг/л, канцероген [25]).

Альтернативным методом не только дезинфекции, но и химической и физической (устранение запаха, улучшение вкуса, уменьшение цветности) обработки воды является озонирование. Озон применяется для очистки воды от некоторых химических соединений, с которыми он справляется лучше, чем другие окислители. Так, например, озон хорошо справляется с очисткой воды от фенола, являющегося загрязнителем поверхностных вод. При этом озон проявляет себя лучше, чем такие вещества как диоксид хлора, перманганат калия и хлор (рисунок 1).

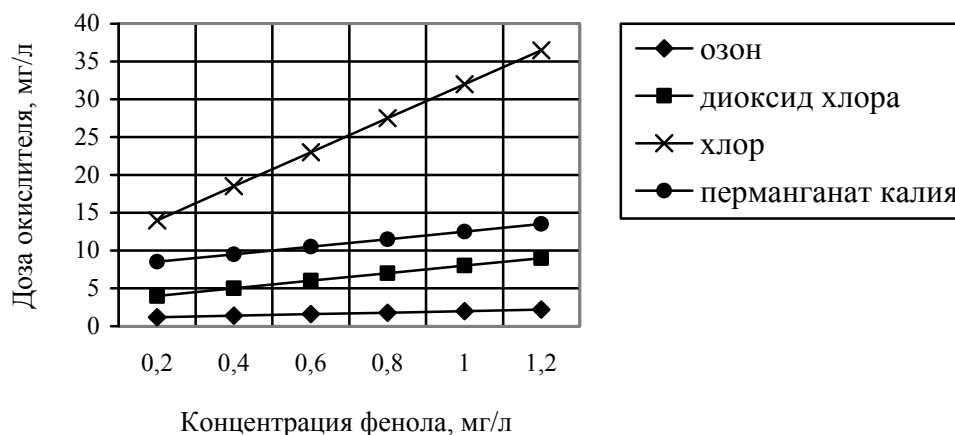


Рисунок 1 – Зависимость дозы окислителя, необходимой для полного окисления фенола, от его концентрации в обрабатываемой воде [Цит. по 42].

Хорошим вариантом при очистке воды от фенолов также является совместное применение озона и сорбентов, например, активированного угля [42]. Окисление фенола озоном желательно проводить в щелочной среде [43].

При очистке сточных вод сочетание биологической очистки с озонированием позволяет практически полностью удалить канцерогенные вещества, при этом только биологическая очистка удаляет их примерно на 70% [43].

Озон при дезинфекции воды проявляет себя гораздо лучше, чем хлорсодержащие вещества, полностью уничтожая все возможные виды бактерий и вирусов. Озон уничтожает энтеровирусы и цисты лямблий [42], колиформы и вирусы, устойчивые к действию хлорсодержащих веществ [43]. Споры кишечной палочки уничтожаются в воде озоном в 3000 раз быстрее, чем хлором (таблица 4).

Таблица 4 – Время, требующееся для уничтожения бактерий при обеззараживании воды озоном и хлором [35].

Показатель	Средство обеззараживания воды	
	озон	хлор
Минимальная доза для обеззараживания воды в мг/л	0,1	0,1
Время в сек., необходимое для уничтожения бактерий при содержании в воде: 60000 кишечных палочек в 1 л	5	15000

Данные, представленные в таблице 4, являются одним из многочисленных примеров использования на практике отличных дезинфицирующих свойств озона.

Хлорирование можно полностью заменить на озонирование только там, где не требуется дальнейшая транспортировка чистой продезинфицированной воды к потребителю, т.к. озон в отличие от хлорсодержащих веществ не обладает длительным действием после введения в воду. Озон разлагается и перестает действовать с течением времени: время полураспада озона в воде при температуре 20 °С составляет 10-20 минут [43].

При использовании озона при обработке воды необходимо помнить, что озон относится к 1 классу опасности, а также необходимо контролировать образование побочных продуктов озонирования на допустимом уровне. При озонировании воды обычно образуются следующие побочные продукты [24, 25, 37, 46]:

- формальдегид (ПДК в питьевой воде 0,05 мг/л, 2 класс опасности [24]);
- ацетальдегид (ПДК в питьевой воде 0,2 мг/л, 4 класс опасности [24]);
- бромат-ионы BrO_3^- (ПДК в питьевой воде 0,01 мг/л, канцерогены [25]).

Поэтому в тех случаях, когда применение таких доз озона, которые необходимы для дезинфекции воды, приводит к образованию недопустимого количества побочных продуктов, целесообразно сочетать озон с другими дезинфицирующими средствами. В первую очередь, в таких технологических схемах применяются вещества, образующие гидроксил-радикалы OH^\cdot , усиливающие окислительные реакции и гибель микроорганизмов.

Технологические процессы усиленного окисления с помощью гидроксил-радикалов OH^\cdot имеют название «передовые окислительные процессы» (Advanced Oxidation Processes – AOP's). Гидроксил-радикалы обладают высоким окислительным потенциалом 2,8 В (см. табл. 3), а к средствам, способных их образовывать, в первую очередь, относятся озон, ультрафиолетовое облучение, перекись водорода. Совместное применение озона и УФ-облучения в технологии AOP's приводит к большему уменьшению цветности воды и увеличению окисляемости; совместное применение озона и перекиси водорода приводит к значительному уменьшению содержания в воде пестицидов по сравнению с обработкой воды только одним озоном [118].

1.2 Основные положения теории барьерного разряда

Диэлектрический барьерный разряд (dielectric barrier discharge) — это импульсный или импульсно-периодический газовый разряд в устройствах, где электроды изолированы от плазмы диэлектриками [94]. В барьерном разряде электроны обладают высокой средней энергией (4-5 эВ), при этом температура газа в разряде близка к температуре электродов [96]. Первые экспериментальные исследования барьерного разряда были сделаны В. Сименсом в конце XIX века, эти исследования были связаны с применением барьерного разряда в системах генерации озона. Сименс предложил название «тихий разряд» для разряда в озонаторе [125]. В начале XX века исследования «тихого разряда» (silent discharge) были продолжены Е. Варбургом. В 1932 году К. Басом было обнаружено, что электрический разряд в воздушном зазоре между изолированными электродами состоит из отдельных небольших каналов [131].

В середине XX века японские исследователи К. Хонда, М. Сузуки провели значительные исследования высокочастотных импульсов тока, возникающих при разряде, имеющем диэлектрический барьер. Японские ученые получили первые изображения и осциллограммы (рисунок 2) тока и напряжения отдельных микрозарядов, из которых состоит «тихий разряд» [128].

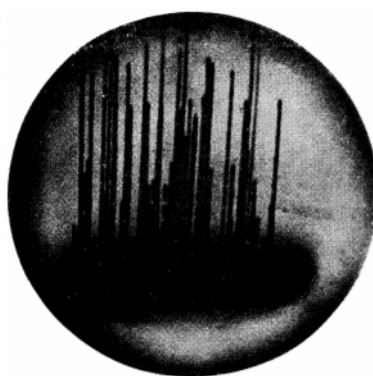


Рисунок 2 – «Волосы» на осциллографической картине при длине разрядного промежутка $d = 0,9$ мм и напряжении $V = 10,5$ кВ [128].

В 60-х годах XX века Е.Н. Ереминым было предложено называть газовый разряд между изолированными электродами «барьерным разрядом» [96]. Такое

название является в настоящее время общепринятым. Также общепринятым является рассмотрение барьерного разряда как разряда, состоящего из отдельных микрозарядов, периодически возникающих в различных точках поверхности разрядных электродов и в промежутках между ними.

В лаборатории Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова с помощью специально созданной установки с вращающимся барьером [120] были получены стационарно располагающиеся в пространстве и стабильные во времени плазменные каналы барьерного разряда, удобные для исследования (рисунок 3).

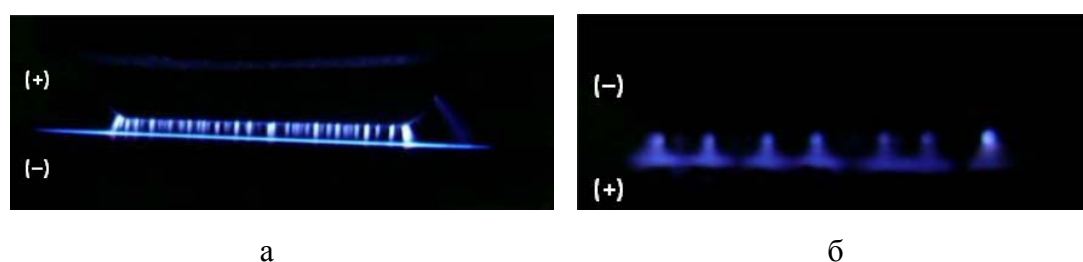


Рисунок 3 – Фотографии стационарного барьерного разряда: а – катодом является металлический электрод; б – катодом является диэлектрический электрод (барьер) [89].

Разрядный промежуток, в котором наблюдался барьерный разряд (рис. 3), образован одной парой электродов. Число пар электродов в установке с вращающимся барьером четное, а к электродам приложено постоянное напряжение чередующейся полярности. Вследствие вращения диэлектрического барьера происходит перезарядка поверхности барьера, благодаря этому, а также благодаря остаточным следам на барьере наблюдается непрерывное горение барьерного разряда. Когда к диэлектрическому барьеру приложен положительный потенциал, то барьерный разряд вблизи барьера образует расширенную плазменную область (рис. 3, а): расстояние между электродами на рис. 3, а равно 3 мм, диаметр «пятна», прилегающего к барьеру, равен 6 мм, высота около 1 мм. При отрицательно заряженном диэлектрическом электроде расширенная часть разряда не образуется (рис. 3, б). Эти результаты наглядно подтверждают результаты численного моделирования развития микрозаряда для диэлектрического анода и проводящего катода (рисунок 4), полученные в 1994

году В.И. Гибаловым и Г. Питчем [Цит. по 45]. На рисунке 4 видно, что время развития микрозаряда порядка десятков наносекунд.

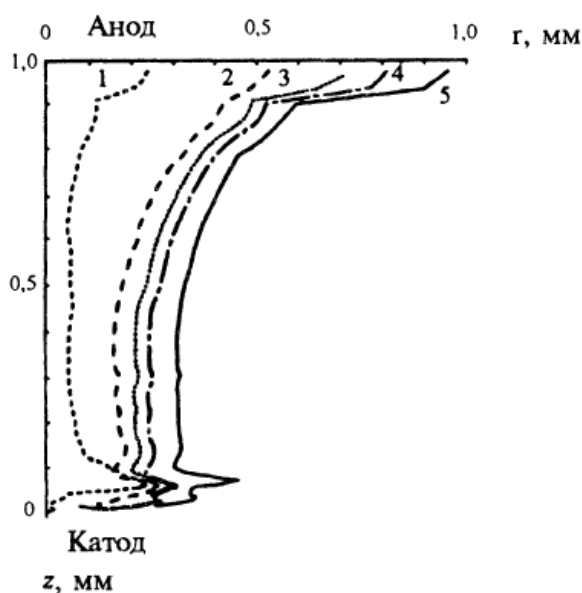


Рисунок 4 – Эффективный радиус канала микрозаряда при $\varepsilon = 5$ в различные моменты времени: 1 - 10,7 нс; 2 - 13,9 нс; 3 - 15,5 нс; 4 - 17,9 нс; 5 - 32,3 нс [45].

Кроме того, фотографии барьерного разряда (рисунок 5) были получены с помощью ICCD-камеры [Цит. по 37].

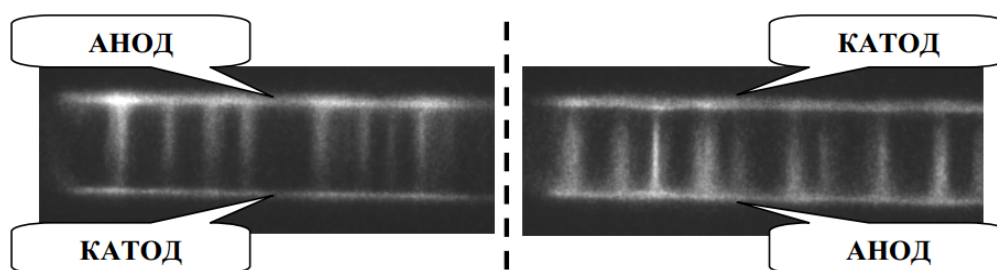


Рисунок 5 – Фрагменты фотографий серий микрозарядов в плоскопараллельной разрядной ячейке в воздухе [37].

Из рис. 5 видно, что в момент, когда разряд есть, барьерный разряд состоит из некоторого количества микрозарядов, распределенных вдоль разрядного промежутка, – это серия микрозарядов. Частота зажигания отдельных серий микрозарядов пропорциональна напряжению, приложенному к разрядному промежутку [96].

Система электродов барьерного разряда может иметь три основные разновидности конфигураций барьерного разряда:

- конфигурации объемного барьерного разряда (рисунок 6, а₁-а₃);
- конфигурации поверхностного барьерного разряда (рисунок 6, б₁-б₂);
- конфигурация копланарного барьерного разряда (рисунок 6, в).

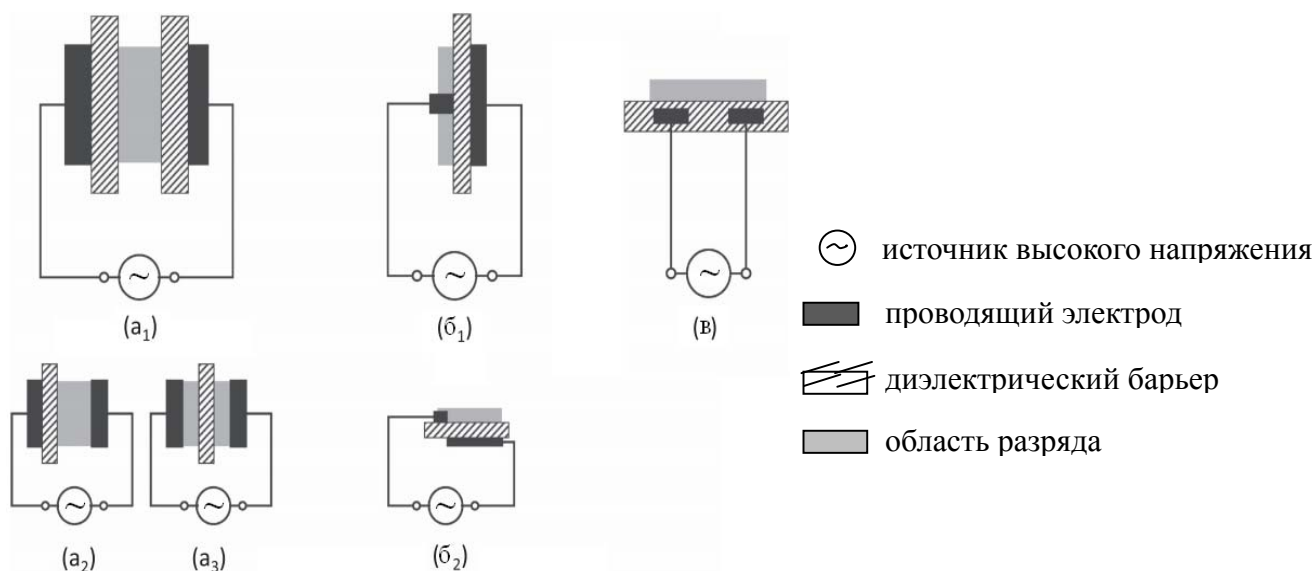


Рисунок 6 – Основные плоскопараллельные конфигурации барьерного разряда: а – объемный барьерный разряд (1 – симметричный, 2 – асимметричный, 3 – «плавающий» диэлектрик); б – поверхностный барьерный разряд (1 – симметричный, 2 – асимметричный); в – копланарный барьерный разряд [129].

Появившаяся на заре исследований тогда ещё «тихого разряда» теория барьерного разряда была представлена как макроскопическая теория. Она не рассматривала структуру барьерного разряда, состоящую из периодически возникающих микроразрядов, а описывала процессы, происходящие в барьерном разряде в целом. Схематической моделью барьерного разряда при макроскопическом рассмотрении является схема замещения, состоящая из последовательно соединенных электрических емкостей диэлектрического барьера и разрядного промежутка, при этом емкость разрядного промежутка при разряде заменяется источником постоянного напряжения горения барьерного разряда [45], либо шунтируется нелинейным сопротивлением плазмы барьерного разряда [129, 132]. Основной характеристикой барьерного разряда при таком рассмотрении является его вольт-амперная характеристика – зависимость тока, протекающего в разрядной камере, от напряжения, приложенного к электродам (рисунок 7) [45].

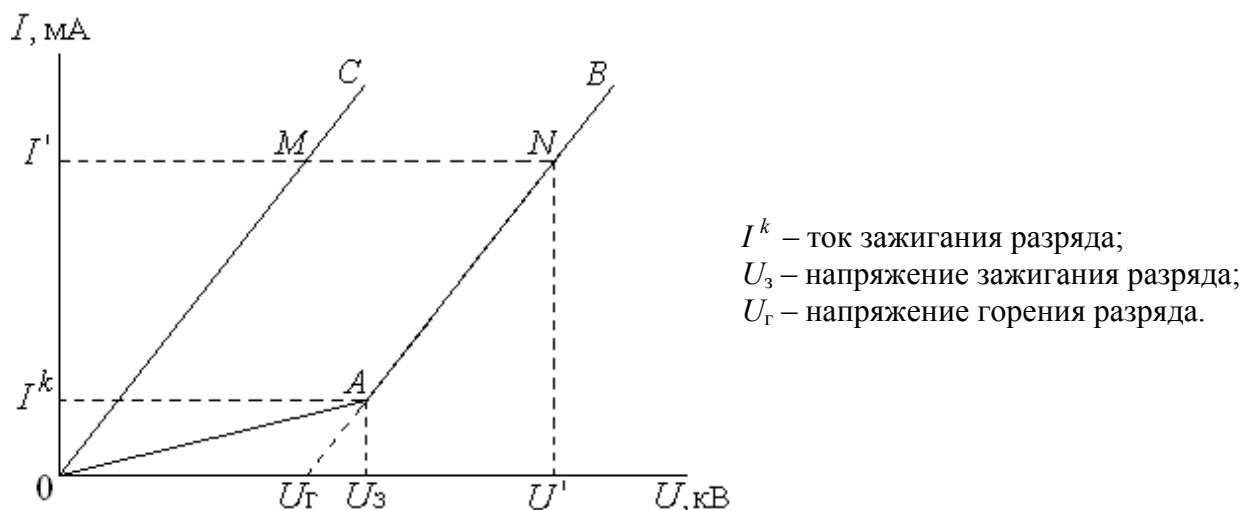


Рисунок 7 – Вольт-амперная характеристика барьерного разряда [45].

На рис. 7 в виде кривой OAB изображена зависимость среднего тока от эффективного напряжения в камере барьерного разряда. В реальности область перехода в точке A имеет более плавный изогнутый вид. Участок OA соответствует отсутствию барьерного разряда, область около перехода в точке A – зажиганию барьерного разряда, участок AB – горению разряда. Длина отрезка MN равна напряжению горения $U_г$ барьерного разряда – падению напряжения на барьерном разряде в разрядном промежутке. Формулы для определения напряжения горения, напряжения и тока зажигания барьерного разряда, а также для определения других основных электрических характеристик барьерного разряда можно найти в литературе [45, 96].

В настоящее время теория барьерного разряда рассматривает барьерный разряд как совокупность микроразрядов и является развитием макроскопического рассмотрения барьерного разряда, которое стало возможным в результате исследований микроразрядных процессов в барьерном разряде. Известны время существования отдельных микроразрядов, их размеры, переносимый заряд и другие параметры (таблица 5).

Таблица 5 – Основные параметры барьерных микроразрядов [45].

Время существования канала	10-15 нс
Переносимый заряд	$(2-10) \cdot 10^{-10}$ Кл
Диаметр канала	0,3-1,0 мм
Плотность тока	~ 100 А/см ²
Максимальная концентрация электронов в канале	10^{14} см ⁻³
Максимальная концентрация атомарного кислорода в канале	10^{16} см ⁻³
Энергия, выделяющаяся в канале	5-10 мкДж
Приведённая напряжённость электрического поля	100-150 Тд
Количество атомов кислорода, образующихся в микроразряде	10^{13}
Средняя энергия электронов	3-5 эВ

Примечание: данные получены при давлении кислорода 1 атм., температуре электродов 300 К, разрядном промежутке 1 мм и относительной диэлектрической проницаемости барьера $\epsilon = 5$.

Благодаря расчетам численного моделирования [107, 126, 132] и экспериментальным исследованиям [47, 107, 134] микроразрядных процессов в барьерном разряде в настоящее время известно, что отдельный микроразряд состоит из двух стадий:

- 1) формирование и распространение микроразряда за время порядка 10-20 нс;
- 2) дозарядка области поверхностного микроразряда на диэлектрике за время порядка 100 нс.

Вместе с тем при исследовании поверхностного барьерного разряда было как теоретически, так и экспериментально установлено [107], что ток микроразряда на порядок меньше при положительной полярности диэлектрического (изолированного) электрода, чем при отрицательной (рисунок 8).

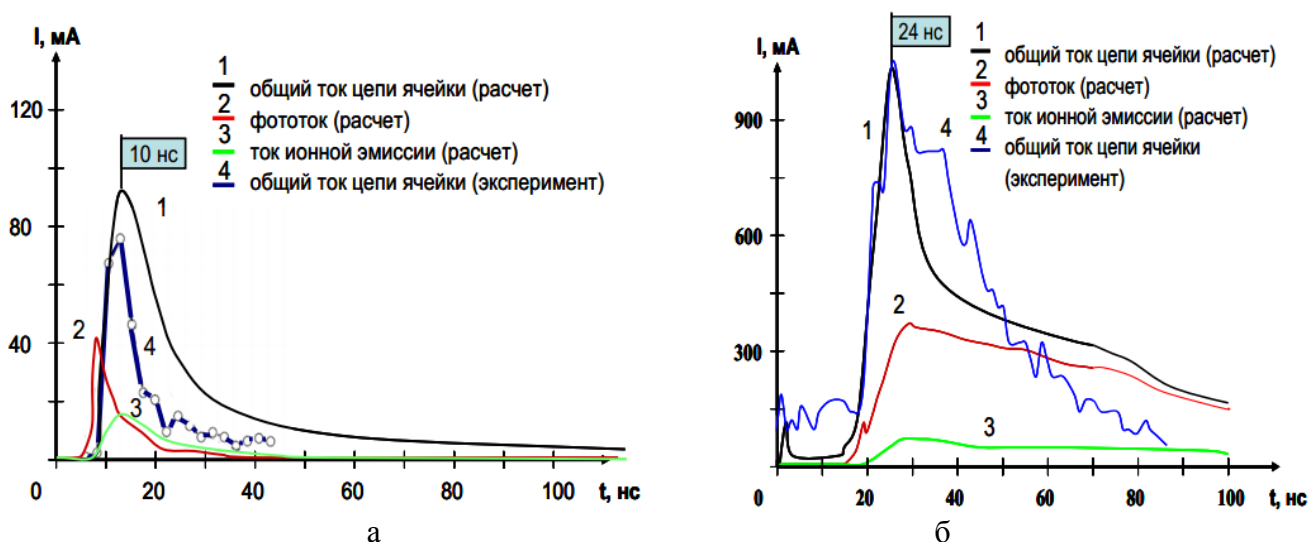


Рисунок 8 – Токи в разрядной ячейке барьерного разряда: а – при отрицательной полярности проводящего электрода, б – при положительной полярности проводящего электрода [107].

Развитие барьерных микрозарядов по поверхности диэлектрика происходит в виде ветвящихся каналов (рисунок 9), называемых фигурами Лихтенберга по фамилии немецкого ученого Г.К. Лихтенберга, в конце XVIII века наблюдавшего подобные фигуры на поверхности диэлектрика.

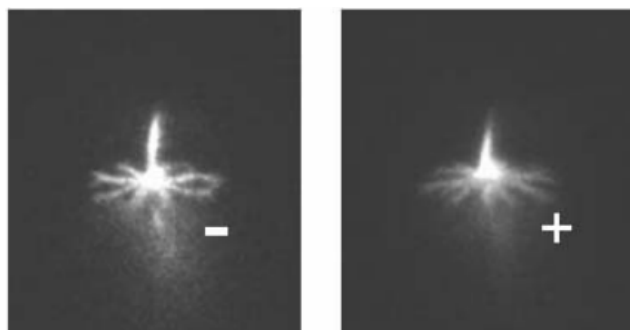


Рисунок 9 – Фотографии отдельных микрозарядов (ICCD) [37].

Время протекания отдельных микрозарядов составляет десятки наносекунд, при этом на разных участках разрядной площади протекает несколько микрозарядов, время между которыми соизмеримо с длительностью микрозаряда. Такая совокупность практически одновременно протекающих в разрядной камере микрозарядов называется серией микрозарядов. Длительность серии микрозарядов порядка десятых долей микросекунды [45].

Системы генерации озона в барьерном разряде состоят из двух электродов либо плоскопараллельных, либо концентрических, разделённых разрядным

промежутком, по которому перемещается озonoобразующий газ. При этом плоскопараллельные электроды могут быть как сплошными, так и секционированными, в том числе секционированные электроды в системах генерации озона в поверхностном барьерном разряде [64, 65, 77].

Генераторы озона с концентрическими электродами изначально были более распространены. Внутренний электрод образуется металлической трубкой (система Сименса), или проволокой, непосредственно соприкасающейся с озonoобразующим газом (система Гузо), или стеклянной трубкой с электропроводящей жидкостью (система Бертелло). Внешний электрод состоит из стеклянной трубки, покрытой проводящим слоем (система Отто), или погружённой в проводящую жидкость (системы Тенара, Бертелло) [32, 44]. Также существуют изобретения озонаторов с концентрическими электродами, один из которых вращается [20, 69, 73, 74, 76, 92, 114].

Озонаторы с плоскопараллельными электродами можно подразделить на статические, в которых пары электродов при разряде не двигаются относительно друг друга [59-61], и озонаторы, в которых один из электродов вращается [22, 72, 76, 91, 102, 109, 113, 116, 120]. При этом в начале XX века уже были распространены озонаторы с плоскопараллельными электродами разнообразных конструкций – статические и вращающиеся озонаторы Отто [44].

Системы барьеров и электродов систем генерации озона в барьерном разряде постоянно совершенствуются, а изобретения в этой области направлены на достижение двух основных целей: повышение надежности и повышение энергоэффективности систем генерации озона. Кроме очевидной выгоды от улучшения охлаждения систем генерации озона, существуют технические решения, позволяющие достигать повышения энергоэффективности электросинтеза озона другими способами, такими как:

- повышение равномерности генерации озона в межэлектродном пространстве, что приводит к повышению энергоэффективности синтеза озона [13, 15, 16, 71, 111, 115];

- оптимизация параметров и соотношения параметров диэлектрических барьеров с целью повышения энергоэффективности синтеза озона [11, 21, 48, 66, 75, 81];

- оптимизация параметров электрической цепи систем генерации озона с целью повышения энергоэффективности синтеза озона [12, 68, 78].

Целью данной диссертации является повышение энергоэффективности синтеза озона в барьерном разряде. В качестве способа достижения данной цели рассматривается изменение сопротивления электрической цепи системы генерации озона в барьерном разряде, а именно изменение сопротивления электрической цепи барьерных микрозарядов путем применения электродов с повышенным активным сопротивлением — высокоомных электродов. Предпосылки осуществления данного способа повышения энергоэффективности систем генерации озона рассматриваются во второй главе диссертации.

1.3 Влияние температуры в разрядной озонаторной камере на синтез озона в барьерном разряде

Первые исследования процесса синтеза озона сначала при электрохимическом, а позднее при электрическом способе получения озона начали проводиться в середине XIX века – это исследования Де Ла Рива и Мариньяка, В. Сименса, Л. Бабо и других учёных. Со временем стали появляться и данные о влиянии температуры на процесс синтез озона. Экспериментальные исследования в конце XIX века выявили снижение равновесной концентрации озона при повышении температуры внутри озонаторной камеры и рост концентрации озона при снижении температуры [117].

В начале XX века применение охлаждения озонаторов для лучшего выхода озона являлось необходимым условием [32]. Озонаторы с диэлектриком (озонаторы Сименса и Гальске, озонаторы системы Фриза и др.), применявшиеся в то время в промышленности, имели водяное охлаждение.

В середине XX века Ю.В. Филипповым и Н.И. Кобозевым было экспериментально получено семейство зависимостей концентрации озона от отношения объема реакционной зоны (F) к объемной скорости потока озонируемого газа (v) при различных температурах [117]. Для более наглядного представления зависимости концентрации озона перестроены и даны на рисунке 10 в зависимости от температуры, а в качестве фиксируемого параметра использовано соотношение F/v , представленное в условных единицах. Кривые на рисунке 10 показывают падение концентрации озона с увеличением температуры озонируемого газа. Основная ценность такого рода экспериментальных данных заключается в возможности их использования для проектирования и эксплуатации систем генерации озона заданной производительности.

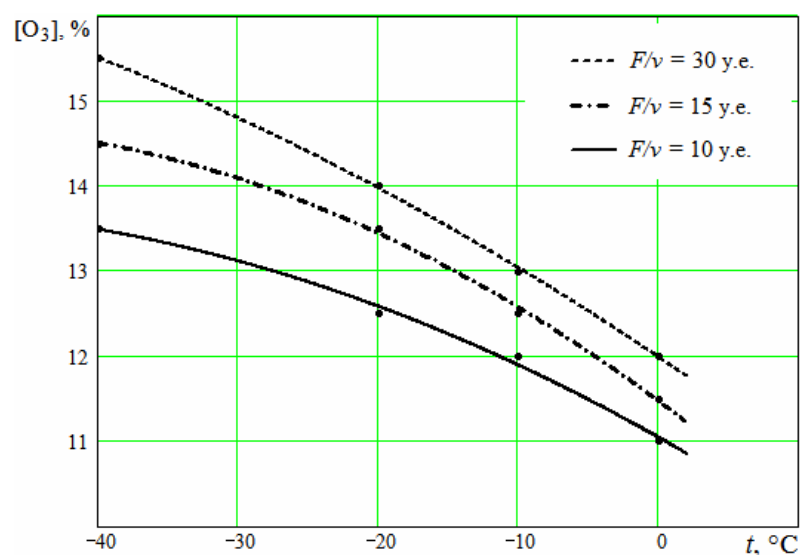


Рисунок 10 – Зависимость концентрации озона от температуры электродов озонатора при различных значениях отношения объема реакционной зоны озонатора к объемной скорости потока газа [117].

Также Ю.В. Филипповым и Н.И. Кобозевым было проведено сравнение средних значений кинетических констант образования и разложения озона в электрическом разряде при разных температурах охлаждения электродов, показавшее влияние температуры только на константу разложения озона: при увеличении температуры растёт значение константы разложения озона (рисунок 11).

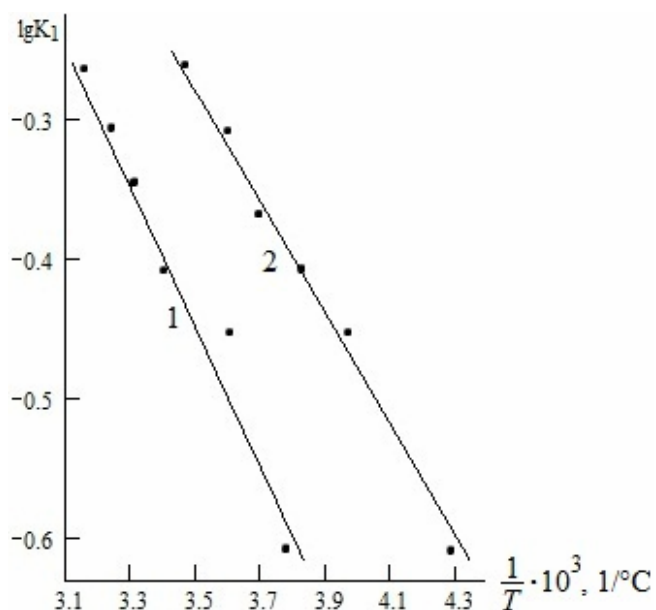


Рисунок 11 – Зависимость логарифма константы разложения озона от обратной величины температуры: 1 – по температурам электродов озонатора; 2 – по температурам газа в разрядном промежутке [117].

С ростом температуры окружающей среды или при ухудшении охлаждения увеличивается скорость химических реакций, в результате которых озон разлагается. При этом Ю.В. Филипповым и Н.И. Кобозевым была рассчитана энергия активации реакций разложения озона. Она составила примерно 2 ккал/моль. Такое малое значение энергии активации характерно, например, для реакций озона с участием радикалов и свободных атомов [117].

Константы химических реакций образования озона k_0 и разложения озона k_1 связаны с активной мощностью разряда и объемной скоростью потока озonoобразующего газа кинетическим уравнением образования озона в барьерном разряде [45]:

$$x_{\text{O}_3} = \frac{k_0[x_{\text{O}_2}]_0}{k'_0 + k'_1} \left(1 - \exp \left[- \frac{(k'_0 + k'_1)P}{v} \right] \right) = \frac{k_0[x_{\text{O}_2}]_0}{k_1} \left(1 - \exp \left[- \frac{k_1 P}{v} \right] \right), \quad \text{г/л}, \quad (1)$$

где k_0 – энергетическая константа, характеризующая процесс образования озона, л/Вт·ч,

k'_0 – константа, учитывающая расходование потока кислорода, не идущего на образование озона, л/Вт·ч,

k'_1 – константа, характеризующая процесс разложения озона, л/Вт·ч,

k_1 – энергетическая константа разложения озона, л/Вт·ч,

$[x_{O_2}]_0 = 0,2836$ г/л – начальная концентрация кислорода в воздухе на входе разрядной озонаторной камеры,

$k_0[x_{O_2}]_0/k_1 = x_p$ – равновесная концентрация озона, г/л,

P – активная мощность разряда, Вт,

v – объёмная скорость потока озonoобразующего газа, л/ч.

Величина P/v , Вт·ч/л, называется удельной энергией [45].

Из уравнения (1) видно, что отношение $k_0[x_{O_2}]_0/k_1 = x_p$ представляет собой максимально возможное значение концентрации озона, образующегося в барьерном разряде при определенном значении начальной концентрации кислорода.

Характерная зависимость концентрации озона x_{O_3} от значения удельной энергии P/v представлена на рисунке 12.

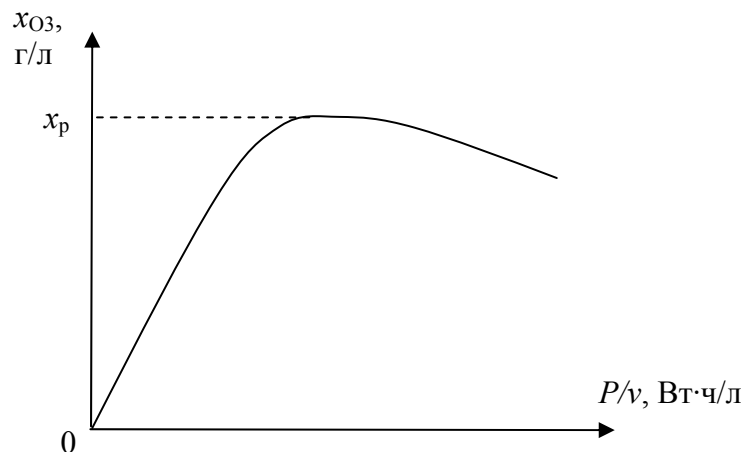


Рисунок 12 – Зависимость концентрации озона от удельной энергии (P/v) барьерного разряда.

На начальном участке зависимости (рис. 12), когда значение фактора удельной энергии P/v меньше значения, соответствующего равновесной концентрации озона x_p , справедливо соотношение $k_1 < v/P$, и наблюдается рост концентрации озона x_{O_3} с ростом удельной энергии P/v .

В реальных условиях для каждой определенной скорости потока газа существует некоторая предельная мощность, значение которой несколько больше мощности, соответствующей равновесной концентрации озона. После этой предельной мощности начинается уменьшение концентрации озона x_{O_3} при

дальнейшем росте удельной мощности P/v . Это объясняется ростом значения энергетической константы разложения озона k_1 вследствие повышения температуры внутри разрядной озонаторной камеры. Повышение значения константы k_1 в соответствии с уравнением (1) ведет к уменьшению значения равновесной концентрации озона.

Уменьшение температуры внутри разрядной озонаторной камеры приводит к повышению энергоэффективности синтеза озона, поэтому разработчики систем генерации озона применяют различные способы уменьшения температуры в озонаторе. Существуют изобретения, целью которых является регулирование концентрации озона, осуществляемое непосредственным влиянием охлаждающего озонатор теплоносителя на процесс синтеза озона. Так предложен способ регулирования концентрации озона в озонаторе с водяным охлаждением путём использования термостатированной охлаждаемой жидкости [103]. Также предложено регулировать концентрацию озона изменением расхода жидкости, охлаждающей озонатор [104]. В то же время запатентовано американское изобретение системы управления коронным разрядом в озонаторе, принцип действия которого заключается в отключении высокого напряжения, подводимого к электродам озонатора, когда температура озонированного газа достигает уровня температуры, при которой озон быстро диссоциирует [123].

В 1960 году была запатентована разработка лаборатории катализа и газовой электрохимии МГУ – цельностеклянный трубчатый озонатор, охлаждаемый водой [14]. В дальнейшем такие охлаждаемые озонаторы, конструктивно подобные озонаторам Сименса, получили широкое распространение в отечественной практике и значительно совершенствовались, стали применяться металлические электроды, покрытые диэлектрическим слоем [17, 19, 70].

Имеется ряд изобретений, направленных на улучшение использования охлаждающего теплоносителя в целях повышения концентрации озона на выходе из озонатора. Например, предложены озонаторы, конструктивно подобные озонаторам Мармье и Абрагама, с полыми электродами в виде дисков, отличающиеся тем, что озонаторы имеют гофрированные электроды, благодаря

волнистой форме которых улучшается отвод тепла от электродов [19, 88, 112, 119].

Одним из основных направлений повышения эффективности синтеза озона в барьерном разряде является повышение частоты питающего озонатор напряжения. При этом активная мощность барьерного разряда пропорциональна частоте напряжения [44, 45, 96]. Следовательно, с ростом частоты напряжения растёт и активная мощность тепловых потерь, рассеиваемая в зоне разряда – это приводит к увеличению нагрева озonoобразующего газа и электродов разрядной камеры озонатора.

В связи с большим выделением тепла в зоне разряда современные высокочастотные озонаторы имеют водяное охлаждение. Основной проблемой при этом является охлаждение высоковольтного электрода. Поэтому разрабатываются специальные системы для осуществления охлаждения [44]:

- подвод охлаждающей воды через изолирующие спирали (водяные дроссели);
- применение жидкого диэлектрика для охлаждения, например, деионизированной воды;
- охлаждение с помощью легкокипящей жидкости, например, фреона.

Разрабатываются новые системы для уменьшения температуры озонатора. Так учёными «Уфимского государственного института сервиса» предложено охлаждать озonoобразующий газ, поступающий в разрядную зону высокочастотного озонатора, путём адиабатического расширения этого газа [119].

При оценке температуры газа в разрядном промежутке можно выделить два подхода в определении подъёма температуры газа в объёме, в котором протекает разряд: по параметрам разряда в озонаторе в целом и по параметрам отдельных микрозарядов, из которых состоит барьерный разряд.

Первый подход заключается в определении температуры газа по такой характеристике озонатора, как «плотность мощности», то есть по отношению активной мощности, рассеиваемой в озонаторе, к разрядной площади

электродов [44]. При таком рассмотрении подъём температуры газа в объёме разряда определяется по формуле:

$$\Delta T = \frac{1}{n} \cdot \frac{P}{S} \cdot \frac{d_{\text{п}}}{\alpha}, \quad ^\circ\text{C}, \quad (2)$$

где P – активная мощность, рассеиваемая в озонаторе, Вт;

S – разрядная площадь электродов озонатора, м^2 ;

$d_{\text{п}}$ – высота разрядного промежутка, м;

α – коэффициент теплопроводности газа в разрядной зоне электродов, где определяется температура, $\text{Вт}/^\circ\text{C}\cdot\text{м}$;

n – численный коэффициент, зависящий от способа охлаждения: $n = 1$ при отсутствии принудительного охлаждения; $n = 3$ для случая одностороннего водяного охлаждения; $n = 12$ для случая двухстороннего водяного охлаждения.

Формула (2) содержит коэффициент теплопроводности (α) газа в разрядной зоне и позволяет оценить нагрев поверхностей электродов, которые непосредственно «соприкасаются» с разрядом. Значения подъёма температуры газа в объёме разряда, рассчитанные по формуле (2), согласуются с экспериментальными значениями нагрева электродов озонатора, полученными автором данной диссертации. Так при $S \approx 0,04 \text{ м}^2$, $d = 1,0 \text{ мм}$, значении активной мощности в озонаторе $P = 30 \text{ Вт}$, отсутствии принудительного охлаждения и синтезе озона из воздуха ($\alpha_{\text{возд}} = 0,043$) рост температуры по формуле (2):

$$\Delta T = \frac{1}{1} \cdot \frac{30}{0,04} \cdot \frac{1,0 \cdot 10^{-3}}{0,043} = 17,4 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для сравнения, для конструкции озонаторной камеры с плоскопараллельными электродами с разрядной площадью $S = 430 \text{ см}^2$ при отсутствии принудительного охлаждения значению активной мощности разряда $P = 35 \text{ Вт}$ соответствовало экспериментально измеренное значение температуры нагрева электродов разрядной камеры $\Delta T = 22 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Второй подход заключается в том, что на основании данных о параметрах микроразряда, а именно, зная значение энергии, выделяющейся в микроразряде, и

значение диаметра канала микроразряда, можно оценить рост температуры непосредственно в зоне микроразряда [44, 45] по формуле:

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{c \cdot \mu}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

где ΔQ – энергия, выделяющаяся в одном микроразряде, Дж;

c – теплоёмкость озonoобразующего газа, Дж/моль·°C;

$$\mu = \frac{\pi \cdot r_k^2 \cdot d_{\text{п}}}{22,4 \cdot 10^6 \text{ мм}^3/\text{моль}} - \text{число моль озonoобразующего газа в объёме}$$

микроразряда, где r_k – радиус канала микроразряда, мм.

Формула (3) не учитывает термического сопротивления в разрядной камере озонатора и позволяет оценить подъём температуры газа внутри камеры вследствие протекания микроразряда. Полагая теплоёмкость воздуха 21 Дж/моль·°C при давлении воздуха $p = 1$ атм по формуле (3) подъём температуры для средних значений параметров микроразряда (см. табл. 5) будет равен 6 °C.

При рассмотрении формул (2) и (3) видно, что между ними имеется противоречие по влиянию высоты разрядного промежутка на подъём температуры в разряде: по формуле (2) подъём температуры прямо пропорционален значению разрядного промежутка, по формуле (3) — обратно пропорционален.

В работе [87] произведена оценка температурного воздействия микроразряда на диэлектрический барьер. Получено аналитическое выражение для определения температурного воздействия одного микроразряда на поверхность диэлектрического барьера:

$$\theta = \frac{2W}{S \tau_{\text{разр.}}} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}}, \quad (4)$$

где W – энергия микроразряда, Дж,

S – приборная площадь микроразряда, м²,

$\tau_{\text{разр.}}$ - постоянная времени микроразряда, с,

α – коэффициент температуропроводности, м²/с,

t – время микроразряда, с.

Единственным геометрическим параметром в формуле (4) является прибарьерная площадь микроразряда. В работе [87] для полимерного материала при $\alpha = 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, для микроразряда с параметрами $W = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$, $\tau_{\text{разр.}} = 10^{-8} \text{ с}$, $t = 7,6 \cdot 10^{-9} \text{ с}$, $S = 16,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ по формуле (4) нагрев диэлектрического барьера в результате протекания одного микроразряда $\theta \approx 1 \text{ }^\circ\text{С}$.

Выводы по первой главе

Барьерный разряд используется во многих областях техники и технологии: люминесцентные лампы, обработка поверхностей, непосредственная очистка газов, применение в медицине. Востребованным и одним из наиболее экономичных вариантов остается применение барьерного разряда в системах генерации озона.

Теория барьерного разряда в настоящее время широко развита. Изучена пространственно-временная структура отдельных микроразрядов, из которых состоит барьерный разряд, а также оценены основные параметры микроразряда: геометрические размеры, длительность, переносимый заряд, напряженность электрического поля, энергия микроразряда. Имеются многочисленные результаты численного моделирования процесса барьерного микроразряда.

В энергоэффективных системах генерации озона недопустим сильный нагрев озонаторной камеры, т.к. с ростом температуры увеличивается скорость разложения озона. Традиционным способом уменьшения температуры озонатора является применение водяного охлаждения электродов. Системы водяного охлаждения усложняют и удорожают конструирование и эксплуатацию систем генерации озона, поэтому востребованы новые способы снижения температуры разрядных озонаторных камер.

2 ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКООМНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦИИ ОЗОНА В БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ

2.1 Количество электричества, переносимого микроразрядом

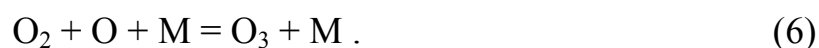
Переносимый заряд в барьерном разряде является одной из главных характеристик, и его значение определяет количество озона, синтезирующегося из молекул кислорода. Общий заряд складывается из зарядов, переносимых отдельными микроразрядами, и, соответственно, определяется их количеством. Количество переносимого одним микроразрядом заряда составляет порядка 10^{-9} Кл (см. табл. 5).

Основная реакция при электросинтезе озона в кислороде – это диссоциация молекул кислорода:



Данная реакция лимитирует образование озона [45].

Последующее образование озона является результатом тройного столкновения атомарного кислорода (O), молекул кислорода (O_2) и других частиц (M):



Чем больше атомов кислорода образуется, тем больше выход озона. В свою очередь, количество атомарного кислорода в соответствии с реакцией (5) определяется количеством свободных электронов, обладающих необходимой для диссоциации молекул кислорода энергией. Количество высокоэнергетических электронов определяется напряженностью электрического поля.

В итоге диссоциация кислорода зависит от напряженности поля и концентрации электронов [45]. От этих же параметров зависит ток и, соответственно, заряд микроразряда.

С другой стороны, распределение концентрации атомарного кислорода и озона примерно совпадает [96], что отражено на рисунке 13.

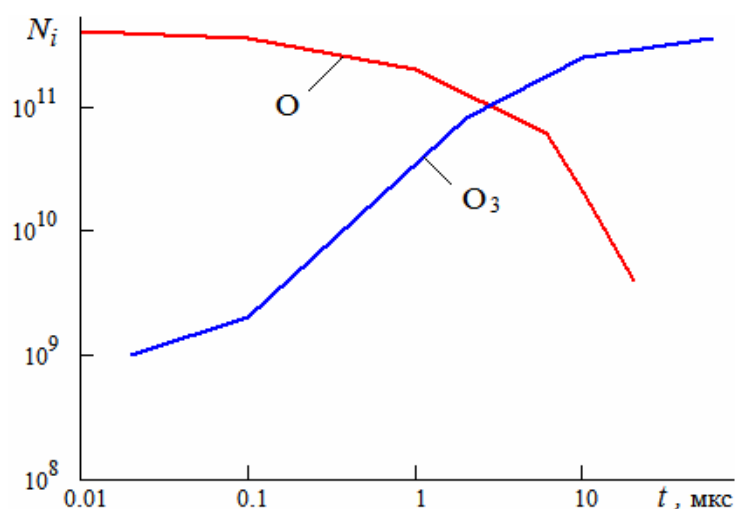
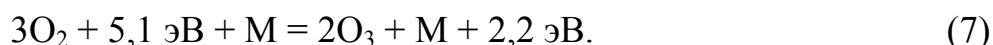


Рисунок 13 – Изменение во времени полного числа N_i атомов кислорода (O) и молекул озона (O_3) в канале микроразряда [Цит. по 96].

Обозначим энергии, необходимые для образования озона по механизму реакций (5) и (6), а также выделяющиеся при образования озона в результате тройного столкновения. Для этого запишем этот механизм в свернутом виде:



Теплота образования двух молекул озона составляет 2,96 эВ ($4,74 \cdot 10^{-19}$ Дж), при этом теоретическое значение необходимой энергии для осуществления механизма реакций (5) и (6) равно примерно 5,15 эВ [45]. Поэтому образуется избыточная энергия 2,2 эВ, которая выделяется в виде тепла. Таким образом, теоретическое значение к.п.д. механизма электросинтеза озона через диссоциацию молекул кислорода при разряде составляет 57,5%. Для процесса электросинтеза озона в целом такое значение к.п.д. является завышенным, т.к. при данном рассмотрении учтен только один фактор потерь энергии – образование избыточной энергии 2,2 эВ.

Выделяющаяся тепловая энергия, как было рассмотрено выше, на образование озона влияет отрицательно, воздействуя при этом на механизм разложения озона. Механизм разложения озона можно представить в виде двух возможных реакций [45]:



Реакции образования озона (5) и (6) от температуры не зависят, а именно не зависит от температуры константа образования озона [96]. Реакции разложения озона (8) и (9), так же как и значение константы разложения озона, имеют ярко выраженную зависимость от температуры. Поэтому с увеличением температуры выход озона уменьшается. В литературе [96] представлены экспериментальные результаты по выходу озона. Результаты сведены в график, представленный на рисунке 14.

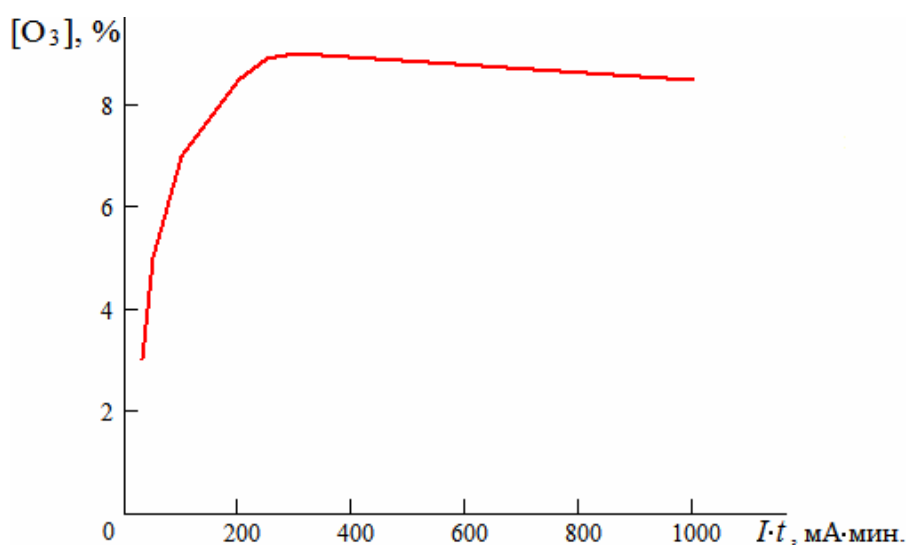


Рисунок 14 – Обобщенная кинетическая кривая синтеза озона в зависимости от произведения тока барьерного разряда на время пребывания газа в разрядной зоне [Цит. по 96].

На графике (рис. 14) можно выделить 3 участка:

- 1) начальный прямолинейный, здесь разложение озона незначительно и ясно видно, что синтез озона пропорционален количеству электричества $q = I \cdot t$;
- 2) средний участок, здесь процессы синтеза и разложения соизмеримы;
- 3) последний падающий участок, здесь значителен перегрев разрядной зоны озонатора и реакции разложения озона более интенсивны.

Таким образом, количество синтезируемого озона по реакции (5) определяется количеством электричества, прошедшего через газоразрядную область генератора озона. Если процесс работы генератора озона установившийся, то данный вывод справедлив и для среднего тока (I_{cp}): чем больше среднее значение тока, протекающего через разрядную озонаторную

камеру, тем больше молекул кислорода диссоциирует и тем больше образуется атомов кислорода, способных участвовать в реакции образования озона.

При этом согласно электрической теории озонаторов [45, 96] средний ток через разрядную озонаторную камеру можно определить по формуле:

$$I_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} U_0 \omega C_{\text{об}}, \quad (10)$$

где $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота напряжения на разрядной камере,

U_0 – амплитудное значение напряжения на разрядной камере,

$C_{\text{об}} = \frac{C_{\text{б}} C_{\text{п}}}{C_{\text{б}} + C_{\text{п}}}$ – общая емкость диэлектрических барьеров и разрядного промежутка при последовательном соединении,

$C_{\text{б}} = \frac{\epsilon_{\text{б}} \epsilon_0 S}{d_{\text{б}}}$ – емкость диэлектрических барьеров разрядной озонаторной камеры,

$C_{\text{п}} = \frac{\epsilon_0 S}{d_{\text{п}}}$ – емкость разрядного промежутка,

где S – разрядная площадь озонаторной камеры,

$\epsilon_{\text{б}}$ – расчетная относительная диэлектрическая проницаемость барьеров,

$d_{\text{б}}$ – расчетная толщина диэлектрических барьеров,

$d_{\text{п}}$ – высота разрядного промежутка.

Чтобы правильно определить математическую зависимость между значением среднего тока через разрядную озонаторную камеру и высотой разрядного промежутка, обратимся к известной формуле, устанавливающей взаимосвязь между напряжением на разрядном промежутке (напряжением горения) и напряжением питания, которое приложено к озонатору [45]. Среднее значение напряжения горения барьерного разряда можно определить по формуле:

$$U_{\text{г}} = \frac{2U_0 C_{\text{об}}}{\pi C_{\text{п}}} = \frac{2U_0}{\pi} \frac{C_{\text{б}}}{C_{\text{б}} + C_{\text{п}}}. \quad (11)$$

Значению напряжения на разрядном промежутке при конкретных параметрах разрядной камеры будет соответствовать напряжение источника питания озонатора:

$$U_0 = \frac{\pi U_r C_6 + C_n}{2 C_6}. \quad (12)$$

Также известна эмпирическая формула для эффективного значения напряжения на разрядном промежутке в зависимости от высоты разрядного промежутка [96]:

$$U_{r\text{эфф.}} = 0,7 + 1,9d_n, \quad \text{кВ.} \quad (13)$$

Выражение (13) может быть записано с уточнением для конкретного озонатора и условий его работы по вольтамперным характеристикам (см. рис. 7), полученным при различных значениях величины разрядного промежутка. Среднее значение напряжения на разрядном промежутке будет определяться по формуле:

$$U_{r\text{ ср.}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{r\text{эфф.}} = 0,63 + 1,71d_n, \quad \text{кВ.} \quad (14)$$

После подстановки формул (12) и (14) в формулу (10) получим выражение (15) для среднего тока в озонаторе, зависящего от частоты питающего напряжения и параметров разрядного промежутка:

$$I_{\text{ср}} = (0,63 + 1,71d_n) \cdot \omega \cdot \frac{\varepsilon_0 S}{d_n} = \varepsilon_0 \omega S \cdot \left(1,71 + \frac{0,63}{d_n} \right). \quad (15)$$

При высоте разрядного промежутка равной нулю средний ток через озонатор будет ограничен диэлектрическими барьерами и будет определяться в соответствии с выражением:

$$I_{\text{ср}}^{d_n=0} = \frac{2}{\pi} U_0 \omega C_6 = \varepsilon_0 \omega S \cdot \frac{2U_0 \varepsilon_6}{\pi d_6}. \quad (16)$$

Таким образом, средний ток через разрядную озонаторную камеру с ростом высоты разрядного промежутка будет уменьшаться до значения тока, определяемого по формуле (16). Максимальное значение тока при минимальных промежутках и при промежутке равном нулю ограничено ёмкостью диэлектрического барьера.

Полученные теоретические выводы имеют хорошее экспериментальное подтверждение. В литературе [96] представлены вольтамперные характеристики барьерного разряда, полученные при различных значениях высоты разрядного

промежутка. При рассмотрении этих характеристик для фиксированного уровня напряжения можно выявить следующую закономерность: при увеличении высоты разрядного промежутка с 0,5 мм до 3,5 мм происходит уменьшение среднего тока через озонатор, а при дальнейшем увеличении высоты разрядного промежутка уменьшение тока прекращается.

С другой стороны, известны результаты экспериментов по исследованию влияния высоты разрядного промежутка на микроскопические характеристики барьерного разряда – зависимость значения заряда, переносимого в отдельном микрозаряде, от высоты разрядного промежутка. По этим сведениям, при увеличении высоты разрядного промежутка количество заряда, переносимого отдельным микрозарядом, увеличивается. Также в результате других экспериментов установлено, что с увеличением высоты разрядного промежутка происходит увеличение диаметра канала микрозаряда у анода [96].

Чем же можно объяснить, что при увеличении высоты разрядного промежутка происходит уменьшение среднего тока через разрядную камеру и при этом происходит увеличение заряда, переносимого отдельными микрозарядами? Это явление объясняется тем, что с увеличением высоты разрядного промежутка, кроме явлений, описанных выше, происходит уменьшение частоты появления серий микрозарядов, что установлено экспериментально [96]. В результате, несмотря на увеличение переносимого микрозарядом заряда, происходит уменьшение суммарного тока, переносимого микрозарядами в разрядной камере.

Учитывая вклад электрического тока в механизм образования озона (см. (4) формулу), можно сделать вывод, что при увеличении высоты разрядного промежутка будет происходить уменьшение как тока через озонатор, так и количества синтезируемого озона. С этим выводом также связаны следующие результаты имеющихся экспериментальных исследований. В работах [4, 88] установлено, что процесс электросинтеза озона в большей мере происходит в расширенной части микрозаряда, прилегающей к диэлектрическому барьеру. В этой же работе говорится о том, что наиболее производительными системами генерации озона являются озонаторы с минимальной высотой разрядного

промежутка порядка 0,5 мм, соизмеримой с высотой расширенной части микроразряда.

В итоге, рассматривая роль количества электричества, переносимого микроразрядом, на синтез озона, можно сделать следующие выводы:

- с ростом тока барьерного разряда, равно как и тока отдельного микроразряда, растет количество атомов кислорода в результате диссоциации молекул кислорода в разрядном промежутке, что увеличивает потенциальную возможность для последующего образования озона;

- максимума значения тока барьерного разряда и максимума энергоэффективности синтеза озона можно добиться в минимальных разрядных промежутках в результате увеличения частоты следования серий микроразрядов;

- повышение энергоэффективности барьерного разряда за счет повышения количества переносимого электричества (тока) имеет ограничение, обусловленное с одной стороны, ёмкостью диэлектрика, а с другой – увеличением скорости разложения озона в результате избыточной энергии, выделяющейся в виде тепла при электросинтезе озона;

- количество озона, получающегося в результате реакции образования, пропорционально количеству электричества, переносимого барьерным разрядом.

2.2 Влияние активного сопротивления на процесс заряда электроемкости

В процессе развития отдельного барьерного микроразряда, состоящего из двух стадий (см. стр. 26), происходит электрическая разрядка межэлектродной ёмкости озонаторной камеры с последующим развитием и зарядом области поверхностного микроразряда на диэлектрике.

Рассмотрим влияние активного сопротивления на параметры переходного процесса заряда некоторой электрической емкости, являющейся частью rC -цепи, от источника постоянного напряжения (рисунок 15).

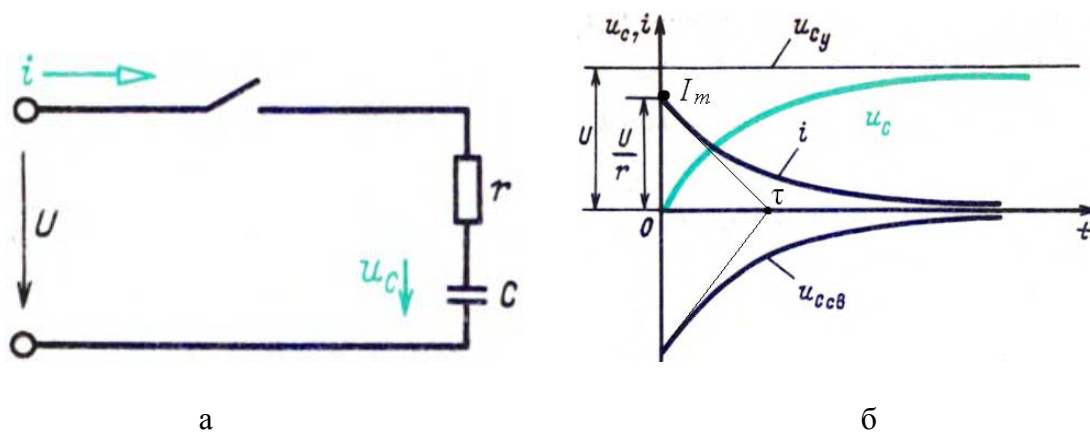


Рисунок 15 – Заряд емкости, являющейся частью rC -цепи, от источника постоянного напряжения:
а) схема переходного процесса, б) кривые изменения тока и напряжения [84].

Напряжение на конденсаторе в процессе заряда увеличивается по экспоненциальному закону в соответствии с выражением [84]:

$$u_C = u_{Cy} + u_{Cсв} = U - Ue^{-t/\tau} = U(1 - e^{-t/\tau}), \quad (17)$$

где $u_{Cy} = U$ - установившееся значение напряжения на конденсаторе, равное значению напряжения источника,

$u_{Cсв} = -Ue^{-t/\tau}$ - свободное напряжение на конденсаторе,

$\tau = rC$ - постоянная времени rC -цепи ($1/\tau$ – коэффициент затухания).

При графическом определении постоянной времени τ проводится касательная к кривой затухающего процесса в любой её точке. На рис. 15, б для определения τ проведены касательные к кривым напряжения u_C и тока i в точке $t = 0$.

Время переходного процесса экспоненциального затухания с практической точностью принимается равным 3τ [83].

Ток в процессе заряда (также как и при разрядке) конденсатора максимален в начале процесса и убывает затем по экспоненциальному закону в соответствии с формулой:

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{U}{r} e^{-t/\tau} = I_m e^{-t/\tau}, \quad (18)$$

где r - активное сопротивление цепи заряда конденсатора,

I_m - максимальное значение тока заряда конденсатора.

С энергетической точки зрения в процессе заряда конденсатора половина энергии переходит в тепло, а другая половина запасается на конденсаторе в соответствии с уравнениями (19)-(21):

$$\int_0^{\infty} U i dt = \int_0^{\infty} (u_r i + u_C i) dt = \int_0^{\infty} r i^2 dt + \int_0^U C u_C du_C, \quad (19)$$

$$U \int_0^{\infty} i dt = U \int_0^U C du_C = CU^2 = \int_0^{\infty} r i^2 dt + \frac{CU^2}{2}, \quad (20)$$

$$\int_0^{\infty} r i^2 dt = CU^2 - \frac{CU^2}{2} = \frac{CU^2}{2}. \quad (21)$$

Закономерность процесса заряда конденсатора, являющегося частью rC -цепи, от источника постоянного напряжения такова, что увеличение сопротивления цепи заряда приводит к пропорциональному увеличению времени процесса заряда и одновременно к пропорциональному уменьшению максимального значения тока заряда. При этом в соответствии с выражением (21) значение тепловых потерь в процессе заряда конденсатора не зависит от значения сопротивления rC -цепи.

Рассмотренный процесс заряда емкости отражает процесс заряда области поверхностного микроразряда на диэлектрике во время второй завершающей стадии микроразряда. При этом напряжение на разрядном промежутке, действительно, можно считать постоянным при условии, если скорость изменения напряжения питания не выше порядка 0,1-1 кВ/мкс.

В соответствии с выражениями (19)-(21) по причине джоулевых потерь к.п.д. процесса заряда равен 50%, что примерно соответствует теоретическому значению к.п.д. процесса электросинтеза озона (см. стр. 38), которое также объясняется потерями энергии в виде тепла.

Оценим заряд, переносимый током в процессе заряда конденсатора, по формуле:

$$q = \int_0^{\infty} I_m e^{-t/\tau} dt = I_m \int_0^{\infty} e^{-t/\tau} dt = I_m \tau = \frac{U}{r} rC = CU. \quad (22)$$

Окончательный вид выражения (22) для заряда конденсатора общеизвестен и отражает тот факт, что значение заряда, переносимого в процессе заряда или разрядки конденсатора, не зависит от сопротивления rC -цепи.

При рассмотрении процесса барьерного микрозаряда необходимо учитывать, что напряжение U_p , приложенное к каналу микрозаряда, меньше напряжения источника $U_{ист.}$ на уровень приэлектродного падения напряжения $U_{эл.}$, складывающегося из падения напряжения на аноде $U_{ан.}$ и на катоде $U_{кат.}$ в соответствии с выражениями:

$$U_p = U_{ист.} - U_{эл.}, \quad (23)$$

$$U_{эл.} = U_{кат.} + U_{ан.}. \quad (24)$$

Тогда выражение для максимального значения тока микрозаряда будет иметь вид:

$$I_m = \frac{U_{ист.} - U_{эл.}}{r_p}, \quad (25)$$

где r_p - активное сопротивление канала микрозаряда.

Выделяющееся во время завершающей стадии микрозаряда тепло можно оценить, учитывая наличие приэлектродного падения напряжения и используя выражения (19)-(22). Потери энергии в результате приэлектродного падения напряжения:

$$Q_{эл.} = \int_0^{\infty} U_{эл.} i_p dt = U_{эл.} \int_0^U C_p u_p du_p = U_{эл.} C_p U_p = U_{эл.} q_p = U_{эл.} I_m \tau_p, \text{ Дж.} \quad (26)$$

Потери энергии в результате протекания тока заряда поверхностного микрозаряда:

$$Q_p = \int_0^{\infty} r i_p^2 dt = \frac{C_p U_p^2}{2} = \frac{q_p U_p}{2} = \frac{I_m \tau_p U_p}{2} = \frac{C_p U_p^2}{2}, \text{ Дж,} \quad (27)$$

где C_p - электроемкость микрозаряда,

q_p - заряд, переносимый в процессе заряда поверхностного микрозаряда,

$\tau_p = r_p C_p$ - постоянная времени микрозаряда.

Из выражения (27) видно, что в процессе заряда поверхностного микрозаряда общие джоулевы потери не зависят от сопротивления цепи заряда.

Можно увеличить активное сопротивление цепи микроразряда, например, изготовив электроды разрядной камеры с повышенным сопротивлением r_d . Постоянная времени микроразряда увеличится до значения $\tau_{p2} = (r_p + r_d)C_p$. Потери энергии в результате протекания тока заряда будут состоять из двух частей: потерь в канале микроразряда $Q_{дж1}$ и потерь на сопротивлении электродов $Q_{дж2}$. В первом приближении без учета нелинейности параметров микроразряда эти потери будут определяться в соответствии с выражениями (28)-(30):

$$Q_p = Q_{дж1} + Q_{дж2} = \frac{C_p U_p^2}{2}, \quad (28)$$

$$Q_{дж1} = \int_0^{\infty} r_p i_p^2 dt = r_p I_m^2 \int_0^{\infty} e^{-2t/\tau_{p2}} dt = r_p I_m^2 \frac{\tau_{p2}}{2} = \frac{I_m^2}{2} r_p C_p (r_p + r_d), \quad (29)$$

$$Q_{дж2} = \int_0^{\infty} r_d i_p^2 dt = r_d I_m^2 \frac{\tau_{p2}}{2} = \frac{I_m^2}{2} r_d C_p (r_p + r_d), \quad (30)$$

где r_d – повышенное значение сопротивления электродов.

Так как суммарные джоулевы потери энергии не зависят от сопротивления цепи заряда, то увеличение активного сопротивления цепи микроразряда в результате добавления сопротивления в цепь должно привести к перераспределению джоулевых потерь между каналом микроразряда и добавочным сопротивлением. Для определения перераспределения джоулевых потерь энергии удобно использовать коэффициент k , характеризующий пропорциональные изменения параметров процесса заряда поверхностного микроразряда при включении в цепь микроразряда добавочного активного сопротивления:

$$k = \frac{r_p + r_d}{r_p}. \quad (31)$$

При добавлении в цепь микроразряда активного сопротивления r_d произойдет перераспределение выделяющегося тепла между каналом микроразряда и добавочным сопротивлением: потери тепла в канале микроразряда $Q_{дж1}$ уменьшатся в k раз, а в добавочном сопротивлении выделится количество теплоты $Q_{дж2} = Q_p - Q_{дж1}$. Вместе с этим амплитуда тока процесса

заряда поверхностного микрозаряда уменьшится в k раз, а постоянная времени процесса заряда в k раз увеличится.

Выводы по второй главе

Электросинтез озона в барьерном разряде представляет собой сложное явление, состоящее из взаимосвязанных электрических, химических и тепловых процессов. Количество образующегося озона пропорционально количеству электричества, переносимого в процессе барьерного разряда.

Основными химическими процессами, протекающими при электросинтезе озона, являются процессы диссоциации молекул кислорода, образования молекул озона и диссоциации молекул озона. В процессе диссоциации кислорода и образования озона происходит потеря в виде тепла около половины от электрической энергии, переносимой в разрядном промежутке.

В процессе протекания барьерного разряда в целом, а также в процессе протекания отдельных микрозарядов происходит потеря электрической энергии в результате рассеяния тепла в разрядном промежутке, а также в результате приэлектродного падения напряжения. Эти потери энергии пропорциональны переносимому электрическому заряду и не зависят от сопротивления цепи разряда и от сопротивления микрозарядов.

Изменение параметров цепи микрозаряда, например, активного сопротивления позволяет влиять на параметры импульсов отдельных микрозарядов. Так при увеличении активного сопротивления цепи микрозаряда происходит уменьшение максимума импульса тока при одновременном увеличении длительности импульса микрозаряда.

В физическом смысле при увеличении активного сопротивления цепи микрозаряда происходят два основных явления:

- перераспределение во времени переносимого микроразрядом заряда за счет увеличения времени процесса заряда поверхностного микроразряда при неизменности суммарного заряда;

- перераспределение тепловыделения между каналом микроразряда и добавочным сопротивлением, включенным в цепь микроразряда, в соответствии с законами теории электрических цепей.

Таким образом, регулирование параметров цепи микроразряда может привести к повышению энергоэффективности синтеза озона за счет снижения перегревов в разрядных промежутках микроразрядов в результате повышения однородности протекания микроразрядных процессов и барьерного разряда в целом.

3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В СИСТЕМАХ ГЕНЕРАЦИИ ОЗОНА С ВЫСОКООМНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

3.1 Постановка задачи

Системы генерации озона в барьерном разряде могут иметь как трубчатую, так и плоскопараллельную геометрию электродов, однако, разрядные процессы в них принципиально одинаковые, поэтому в диссертации приводится исследование только генераторов озона с плоскопараллельными электродами. Такие системы генерации озона можно подразделить на три основные группы, отличающиеся друг от друга конструкцией электродов:

- со сплошными плоскопараллельными электродами;
- секционированные электроды с объёмным разрядом;
- с поверхностным разрядом.

С точки зрения развития разрядных процессов различие групп друг от друга заключается в разном значении межэлектродной ёмкости C_3 . Наибольшей межэлектродной ёмкостью обладает первая группа: генераторы озона со сплошными электродами. Наименьшая C_3 характерна для генераторов озона с секционированным электродом. На рисунке 16 схематически показано устройство генераторов озона с плоскопараллельными электродами различных конструкций.

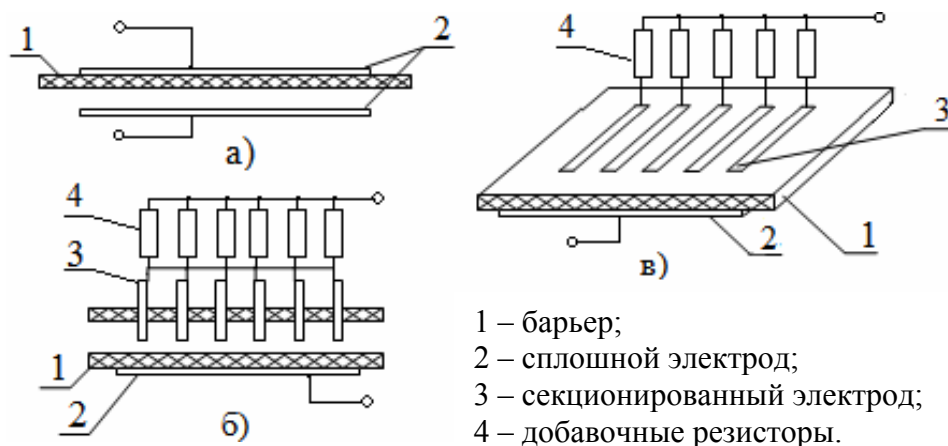


Рисунок 16 – Варианты конструкций систем генерации озона с плоскопараллельными электродами барьерного типа: а) со сплошными плоскопараллельными электродами; б) с секционированным электродом; в) с поверхностным разрядом.

Сплошные высокоомные электроды (рис. 16, а) изготавливаются из смеси на основе графита и сажи. Добавочные резисторы (рис. 16, б, в) имеют сопротивление порядка $10^3 - 10^4$ Ом.

При подключении электродов к источнику высокого напряжения между электродами возникает барьерный разряд, который состоит из серий микроразрядов. Микроразряды являются элементарной физической основой для создания математических моделей, описывающих процесс электросинтеза озона. Каждый микроразряд состоит из двух стадий развития (рисунок 17).

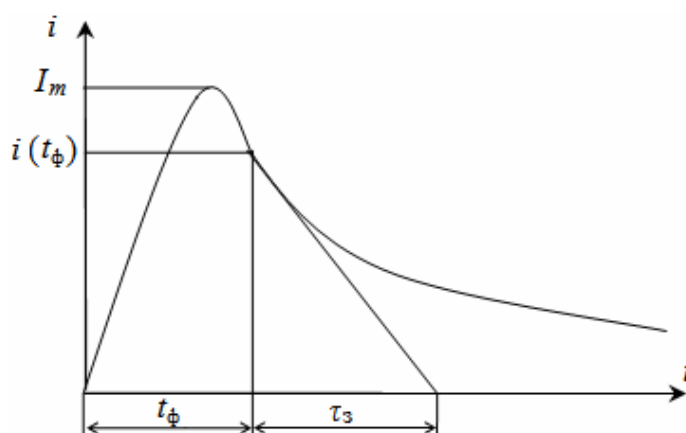
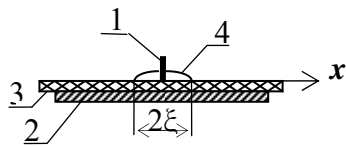


Рисунок 17 – Характерный вид тока микроразряда: t_ϕ – время формирования ионизированной области микроразряда; I_m – максимальный ток микроразряда; $i(t_\phi)$ – ток микроразряда в момент начала второй стадии; τ_3 – постоянная времени завершения второй стадии микроразряда.

Характерный вид тока барьерного микроразряда, изображенный на рис. 17, имеет известное теоретическое и экспериментальное подтверждение (см. рис. 8).

Первая стадия микроразряда характеризуется ростом тока и соответствует формированию ионизированной области микроразряда, рост тока можно объяснить разрастанием электронных лавин. Вторая стадия характеризуется достаточно медленным спадом тока микроразряда и имеет затухающий экспоненциальный характер.

Для описания первой стадии (формирования) барьерного микроразряда в системах генерации озона с высокоомными электродами использована математическая модель на основе электрической схемы замещения с распределёнными параметрами при рассмотрении в одномерном пространстве (рисунок 18) [38, 87].

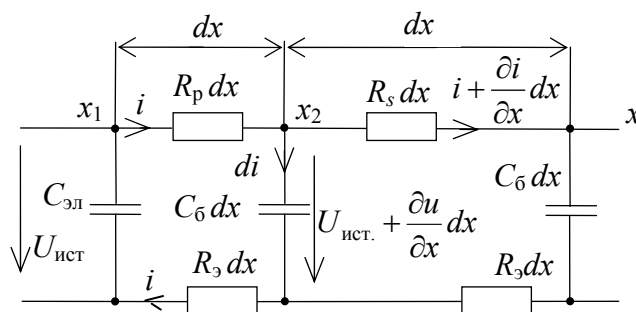


- 1 – электрод-лезвие 1;
- 2 – электрод 2;
- 3 – диэлектрический барьер;
- 4 – барьерный поверхностный микроразряд.

Рисунок 18 – Одномерное изображение барьерного поверхностного микроразряда.

Расстояние $x = 0$ соответствует соединению электрода 1 и барьерного поверхностного микроразряда. Развитие барьерного поверхностного микроразряда происходит в области $x \in [0, \xi]$. При таком рассмотрении распределение ионизированной области микроразряда симметрично и одинаково по поверхности барьера относительно электрода 1, поэтому моделирование произведём по одному из направлений развития поверхностного барьерного микроразряда на основе схемы замещения с распределёнными параметрами (рисунок 19).

Математическая модель, схематически представленная на рисунке 19, подобна математической модели с распределёнными параметрами барьерного разряда, которая ранее была рассмотрена в работах [38, 87]. Отличительной особенностью математической модели с распределёнными параметрами барьерного разряда, рассматриваемой в данной диссертации, является наличие высокоомного электрода, которое учитывается активным поверхностным сопротивлением электрода R_3 .



Рисунке 19 – Схема замещения с распределёнными параметрами барьерного микроразряда с высокоомными электродами: $U_{ист}$ – напряжение источника между электродами, В; $C_{эл}$ – межэлектродная ёмкость на единицу ширины, Ф/м; i – ток через единицу ширины барьерного поверхностного микроразряда, А/м; $C_б$ – ёмкость единицы площади диэлектрического барьера, Ф/м²; R_p – удельное поверхностное сопротивление микроразряда, Ом; R_s – удельное поверхностное сопротивление диэлектрического барьера, Ом; R_3 – удельное поверхностное сопротивление высокоомного электрода, Ом; x – координата, отсчитываемая в направлении разряда от границы электрода и поверхностного барьерного микроразряда, м.

Математическая модель, представленная в виде схемы замещения на рисунке 19, описывает развитие барьерного поверхностного микроразряда. За время $t, t + dt$ граница $x = \xi$ переместится от точки $\xi = x_1$ до точки $\xi = x_2 = x_1 + dx$ [106].

В диссертации также рассмотрена двухмерная система с цилиндрической симметрией, в которой возникает барьерный разряд (рисунок 20).

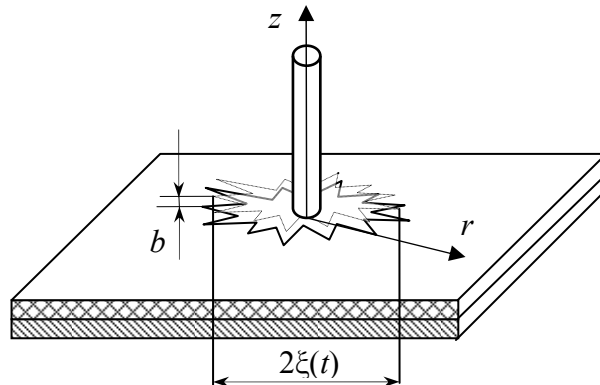


Рисунок 20 – Барьерный поверхностный разряд при двухмерном осесимметричном рассмотрении.

Тонкий цилиндрический электрод радиусом r_0 соприкасается с поверхностью диэлектрического барьера. После включения системы электродов под напряжение и достижения пороговой напряжённости электрического поля E_0 вокруг цилиндрического электрода область $r_0 < r < \xi$ становится сильно ионизированной. Развивается коронный приповерхностный разряд со средней толщиной ионизированной области b (рис. 20). В дополнение к ранее полученным результатам [3] при рассмотрении математической модели в диссертации описано наличие добавочного активного сопротивления в цепи цилиндрического электрода.

В диссертации также с помощью математической модели на основе электрической схемы замещения с сосредоточенными параметрами проведено описание второй (завершающей) стадии микроразряда (рисунок 21). Такая возможность обусловлена окончанием формирования прибарьерной зоны микроразряда, т.е. $C_{\text{МК}} = \text{const}$.

Ключ K на схеме рисунок 21 моделирует переход к основной завершающей стадии микроразряда. Напряжение $U_{\text{ист}}$ принимаем постоянным в процессе

отдельного микроразряда. При питании разряда от источника синусоидального или импульсного напряжения со скоростью изменения напряжения питания не выше порядка 0,1-1 кВ/мкс время существования микроразряда (десятки наносекунд) значительно меньше скорости изменения напряжения.

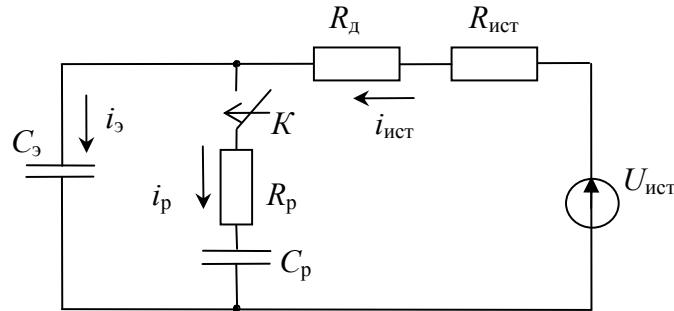


Рисунок 21 – Электрическая схема замещения завершающей стадии микроразряда: C_3 – межэлектродная ёмкость, Ф; $U_{ист}$ – источник постоянного напряжения, В; $R_{ист}$ – сопротивление источника, Ом; $R_д$ – добавочное сопротивление, Ом; R_p – активное сопротивление микроразряда, Ом; C_p – ёмкость микроразряда, Ф.

Объектом математического моделирования в данной диссертации является процесс микроразряда в системах генерации озона с высокоомными электродами барьерного типа, при этом упрощающими **допущениями** являются отсутствие индуктивных параметров, не учёт взаимного влияния микроразрядов друг на друга, пренебрежение нелинейностью удельного сопротивления микроразряда.

3.2 Математическая модель с распределенными параметрами в плоскосимметричной системе координат

В работах [38, 87] была рассмотрена математическая модель барьерного микроразряда на основе электрической схемы замещения с распределёнными параметрами, при этом рассматривались системы генерации озона в барьерном разряде с высокопроводящими электродами, сопротивление которых не учитывалось. В данной работе учитывается активное сопротивление электродов

систем генерации озона, и основные уравнения для схемы на рис. 19 будут иметь вид:

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + (R_p + R_s) \cdot i(x,t) = 0, \quad (32)$$

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - (R_p + R_s) C_6 \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = 0, \quad (33)$$

где $u(x,t)$ – распределение напряжения по барьеру для любого момента времени t .

Уравнения параболического типа (33) обычно рассматриваются при описании процессов теплопроводности и диффузии [106], передачи электричества [83, 84]. Для описания процесса лавинообразной ионизации при газовом разряде наиболее подходит постановка задачи о фазовом переходе [106], при котором происходит изменение физического состояния вещества: в нашем случае при разряде и ионизации газ переходит из слабоионизированного состояния в ионизированное состояние низкотемпературной плазмы.

В математической физике задача о фазовом переходе связана с изменением температуры вещества. При развитии электрического разряда условие фазового перехода из слабо ионизированного состояния в состояние плазмы определяется пороговым значением напряжённости электрического поля в области разряда E_0 , при котором значительно усиливается ионизация в области разряда.

При развитии поверхностного барьерного разряда можно выделить три степени интенсивности развития разряда [122]. При постепенном повышении напряжения сначала возникает в области наибольшей напряженности электрического поля коронный разряд, имеющий лавинный характер с дрейфовой скоростью электронов лавины v порядка 10^5 м/с. С ростом напряжения при значении $N/n_0 > 10^8$ лавинный механизм коронного разряда переходит в стримерный со скоростью удлинения стримера v порядка 10^6 м/с. Если на развитие разряда достаточно энергии источника, то при дальнейшем повышении напряжения возникают скользящие разряды, имеющие лидерный механизм развития со скоростью продвижения лидера порядка $10^4 - 10^5$ м/с [8, 122].

В данной математической модели рассматривается процесс постепенного перехода воздуха, находящегося в области развития поверхностного барьерного разряда, из слабоионизированного состояния в ионизированное состояние подобной плазме. Условием перехода является достижение уровня напряженности электрического поля, соответствующего пороговой напряжённости начала ионизации воздуха $E_0 = 24,5$ кВ/см [6].

В работах [38, 87] рассмотрено решение задачи о фазовом переходе применительно к развитию барьерного поверхностного разряда. При учёте сопротивления высокоомных электродов систем генерации озона решение данной задачи будет иметь вид:

$$u_1(x,t) = A_1 + B_1 \cdot \Phi\left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}}\right), \text{ кВ}, \quad (34)$$

где $u_1(x,t)$ – распределение напряжения по поверхности барьера в ионизированной области,

A_1 и B_1 – постоянные, определяемые из граничных условий [38, 87],

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi \text{ – интеграл ошибок}, \quad (35)$$

$$a_1 = \frac{1}{\sqrt{(R_p + R_3)C_0}}. \quad (36)$$

Условие на границе ионизации при $x = \xi$:

$$U_{\text{ист.}} + B_1 \cdot \Phi\left(\frac{\xi}{2a_1\sqrt{t}}\right) = u_1(\xi, t). \quad (37)$$

Формула (37) справедлива при движении границы микроразряда (ионизации) по известному закону:

$$\xi = \psi\sqrt{t}, \text{ м}, \quad (38)$$

где ψ – некоторая постоянная, м/с^{0,5},

t – время с момента возникновения поверхностного микроразряда, с.

Введём обозначение:

$$\psi / 2a_1 = \beta. \quad (39)$$

Распределение напряжения по поверхности барьера в области микроразряда определяется по формуле:

$$u_1(x,t) = U_{\text{ист.}} - \frac{U_{\text{ист.}}}{\Phi(\beta)} \cdot \Phi\left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}}\right), \quad x \leq \xi. \quad (40)$$

Продифференцировав формулу (40) по x , получим уравнение для напряженности электрического поля в области микроразряда:

$$E_1(x,t) = -\frac{U_{\text{ист.}}}{\sqrt{\pi} a_1 \sqrt{t} \Phi(\beta)} \exp\left[-\left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}}\right)^2\right], \quad \text{В/м.} \quad (41)$$

Значение напряженности электрического поля на границе ионизации при $x = \xi$ и $t = t_\phi$ можно определить по формуле:

$$|E_1(\xi, t_\phi)| = \frac{U_{\text{ист.}}}{\sqrt{\pi} a_1 \sqrt{t_\phi} \Phi(\beta)} \exp(-\beta^2) = E_0, \quad \text{В/м,} \quad (42)$$

где t_ϕ – время формирования микроразряда, с,

$E_0 = 2,45 \cdot 10^6$ В/м – пороговая напряжённость начала ионизации воздуха.

В работах [38, 87] было рассчитано $\beta(t_\phi) = 1/\sqrt{2}$. С учётом этого из формулы (42) с учётом (36) получим выражение для определения времени формирования микроразряда в зависимости от напряжения источника:

$$t_\phi = \frac{U_{\text{ист.}}^2}{E_0^2} \cdot \frac{\exp(-2\beta^2)}{\pi \Phi^2(\beta)} (R_p + R_3) C_6 = 0,25 \left(\frac{U_{\text{ист.}}}{E_p}\right)^2 (R_p + R_3) C_6, \quad \text{с.} \quad (43)$$

Принимая во внимание выражения (38) и (39), из уравнения (43) выведем формулу для определения положения границы ионизации:

$$\xi = \frac{U_{\text{ист.}}}{E_0} \cdot \frac{\exp(-\beta^2)}{\sqrt{\pi} \Phi(\beta)} \cdot 2\beta = \frac{U_{\text{ист.}}}{\sqrt{2} E_0}, \quad \text{м.} \quad (44)$$

Из формулы (44) видно, что в первом приближении геометрия микроразряда от сопротивления электродов не зависит, а время формирования микроразряда, согласно формуле (43), зависит от сопротивления высокоомных электродов R_3 .

Произведём качественную оценку тока микроразряда в зависимости от значения сопротивления высокоомного электрода и длины микроразряда. В работах [38, 87] подобные исследования не проводились.

Учитывая симметричность развития микрозаряда во всех направлениях от игольчатого электрода, полный ток поверхностного микрозаряда в приэлектродной области можно определить по приближенной формуле:

$$I(0,t) = 2i(0,t)b_p = -2 \frac{E_1(0,t)}{R_p + R_s} b_p, \quad \text{А.} \quad (45)$$

где b_p – ширина разрядной зоны, м,

$$E_1(0,t) = -\frac{U_{\text{ист.}}}{\sqrt{\pi} a_1 \sqrt{t} \Phi(\beta)} \quad \text{– напряженность электрического поля на} \quad (46)$$

границе электрода, В/м.

Коэффициент «2» в формуле (45) обусловлен тем, что в первом приближении реальный осесимметричный микрозаряд можно рассматривать как двухсторонний плоскосимметричный (см. рис. 18), и ширину такого микрозаряда можно принять равной для игольчатого электрода $b_p = 2\xi = 2\psi\sqrt{t}$.

Максимальное значение тока микрозаряда, когда длина микрозаряда достигнет значения $x = \xi$ ($\beta = 1/\sqrt{2}$), можно определить по формуле:

$$I_m = 3,3 U_{\text{ист.}} a_1 C_\beta \beta \cdot 2a_1 \approx 4,7 \frac{U_{\text{ист.}}}{R_p + R_s}. \quad (47)$$

Согласно (47), ток в процессе формирования микрозаряда остаётся неизменным. В реальных условиях ток в микрозаряде растёт от нуля до максимального значения. Это объясняется как наличием в цепи микрозаряда индуктивного импеданса, так и формированием поверхностного сопротивления в зоне разряда в пределах от значения удельного поверхностного сопротивления барьера $\rho_s = 10^9$ Ом до значения удельного поверхностного сопротивления микрозаряда $\rho_s = 10^4$ Ом.

Для проявления положительных эффектов от использования высокоомных электродов удельное сопротивление R_s должно быть соизмеримо с поверхностным сопротивлением микрозаряда $R_p \approx 10^4$ Ом.

В дальнейшем для оценочных расчётов принимаем:

$$R_s \approx R_p = 10^4 \text{ Ом.}$$

Тогда для высокоомных электродов при напряжении источника 10 кВ получим следующие результаты:

$$\text{- длина микроразряда } \xi = \frac{U_{\text{ист.}}}{\sqrt{2}E_0} = \frac{10^4}{\sqrt{2} \cdot 2,45 \cdot 10^6} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad (48)$$

$$\text{- значение параметра } \psi = 2a_1\beta = \frac{2\beta}{\sqrt{(R_p + R_3)C_6}}, \quad (49)$$

где $C_6 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{d}$ – удельная ёмкость диэлектрического барьера, Ф/м²,

d – толщина диэлектрического барьера, м.

Примем значения параметров диэлектрического барьера озонатора $\varepsilon = 3,5$, $d = 10^{-3}$ м, тогда $C_6 \approx 3 \cdot 10^{-8}$ Ф/м², $\psi \approx 50$;

- время формирования микроразряда из формулы (38):

$$t_{\text{ф}} = (\xi / \psi)^2 \approx 3,3 \cdot 10^{-9} \text{ с}. \quad (50)$$

Можно оценить эффективные значения сопротивления микроразряда и сопротивления, вносимого высокоомным электродом:

$$r_{\text{микр}} + r_{\text{внос}} = \frac{U_{\text{ист.}}}{I_m} = \frac{1}{4,7} (R_p + R_3), \quad (51)$$

где $r_{\text{микр}} = R_p / 4,7 = 2100$ Ом – эффективное сопротивление микроразряда,

$r_{\text{внос}} = R_3 / 4,7 = 2100$ Ом – эффективное сопротивление, вносимое высокоомным электродом.

Так как микроразряд имеет осевую симметрию, то для более точного расчёта в качестве ширины b_p , через которую протекает ток микроразряда, необходимо взять длину окружности электронной лавины (стримера), которая является инициатором микроразрядного процесса:

$$\xi_0 = 2\pi r_0, \quad (52)$$

где $r_0 \approx 0,5 \cdot 10^{-3}$ м – радиус электронной лавины или стримера [94].

Максимальное значение тока единичного микроразряда из формулы (45) (без коэффициента «2») с учётом (43), (46) и (52):

$$I_m = 1,65 \frac{E_0 2\pi r_0}{R_p + R_3} \approx 10,4 \frac{E_0 r_0}{R_p + R_3}. \quad (53)$$

Для $R_3 = 0$, $R_p = 10^4$ Ом имеем $I_m = 1,27$ А и для $R_3 = R_p = 10^4$ Ом $I_m = 0,64$ А, что близко к известным экспериментальным данным, где $0,1 \text{ А} < I_m < 1 \text{ А}$.

Минимальное напряжение, при котором может образоваться микроразряд:

$$U_{\min} = I_m r_{\text{микр}} = 0,64 \cdot 2100 \approx 1,35 \text{ кВ}, \quad (54)$$

чему соответствует действующее напряжение синусоидального источника:

$$U_{\text{ист.}} = 1,35 / \sqrt{2} = 0,96 \text{ кВ}. \quad (55)$$

Оценим диаметр приборьерной зоны микроразряда, имеющей осевую симметрию.

$$\text{Для } t = t_{\phi}: \quad d_{\phi}(t_{\phi}) = 2(r_3 + \xi) = 2 \left(r_3 + \frac{U_{\text{ист.}}}{\sqrt{2}E_0} \right), \quad (56)$$

где r_3 – радиус игольчатого электрода.

$$\text{При } U_{\text{ист.}} = 10 \text{ кВ}, r_3 = 0,5 \text{ мм}: \quad d_{\phi}(t_{\phi}) = 6,8 \text{ мм}.$$

Более точная оценка диаметра приборьерной зоны микроразряда, имеющей осевую симметрию, будет произведена далее при рассмотрении математической модели системы генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами в цилиндрической системе координат.

Во второй, завершающей стадии микроразряда происходит дозарядка приборьерной зоны микроразряда. Геометрия этой части микроразряда уже сформирована и ёмкость неизменна. Соответственно, можно предполагать, что дозарядка будет происходить по экспоненте с некоторой постоянной времени τ . Для определения τ найдём соотношение между электрическими зарядами, которые поставляются в приборьерную зону микроразряда в процессе её формирования и дозарядки. Используя распределение напряжения по приборьерной зоне разряда (40) с учётом (38) и (36), найдём:

$$u_1(x, t) = U_{\text{ист.}} \cdot \left[1 - \Phi \left(\beta \frac{x}{\xi} \right) / \Phi(\beta) \right]. \quad (57)$$

Соотношение зарядов при формировании микроразряда и его завершении $k = q_{\text{форм}} / q_{\text{зав}}$ соответственно будет равно:

$$k = \frac{\int_0^1 \left[1 - \Phi\left(\beta \frac{x}{\xi}\right) / \Phi(\beta) \right] d \frac{x}{\xi}}{\int_0^1 \left[\Phi\left(\beta \frac{x}{\xi}\right) / \Phi(\beta) \right] d \frac{x}{\xi}}. \quad (58)$$

Здесь достаточно определить знаменатель:

$$\int_0^1 \left[\Phi\left(\beta \frac{x}{\xi}\right) / \Phi(\beta) \right] d \frac{x}{\xi} = \frac{1}{\Phi(\beta) \cdot \beta} \cdot \left[\Phi(\beta) \cdot \beta + \frac{e^{-\beta^2} - 1}{\sqrt{\pi}} \right] = 1 - \frac{1 - e^{-\beta^2}}{\sqrt{\pi} \cdot \beta \cdot \Phi(\beta)}. \quad (59)$$

Для $\beta = 1/\sqrt{2} = 0,71$ имеем:

$$\int_0^1 \left[\Phi\left(\beta \frac{x}{\xi}\right) / \Phi(\beta) \right] d \frac{x}{\xi} = 0,53. \quad (60)$$

Окончательно получим:

$$k = \frac{q_{\text{форм}}}{q_{\text{зав}}} = 0,887. \quad (61)$$

При определении соотношения зарядов « k » использовалось распределение напряжения (33), которое было получено в предположении мгновенного формирования R_p – удельного сопротивления разрядной зоны и, соответственно, неизменного тока микрозаряда в процессе его развития. Тогда справедливо:

$$q_{\text{форм}} = I_m t_p. \quad (62)$$

Подставляя (43) и (53) в (62), получим:

$$q_{\text{форм}} = 2,5 \frac{U_{\text{ист.}}^2 r_0}{E_p} C_6. \quad (63)$$

Реальный процесс установления максимального тока микрозаряда близок к линейному закону. Ток достигает максимума в районе окончания формирования микрозаряда. Можно принять, что реальный заряд в процессе формирования:

$$q'_{\text{форм}} \geq \frac{1}{2} q_{\text{форм}} = 1,25 \frac{U_{\text{ист.}}^2 r_0}{E_0} C_6. \quad (64)$$

Для завершающей стадии микрозаряда заряд определяется по формуле:

$$q_{\text{зав}} = \frac{q_{\text{форм}}}{k} = \frac{2,5 U_{\text{ист.}}^2 r_0 C_6}{k E_0}. \quad (65)$$

Для $U_{\text{ист.}} = 10$ кВ, $r_0 = 0,5$ мм, $E_0 = 2,45$ кВ/мм, $C_6 \approx 3 \cdot 10^{-8}$ Ф/м² имеем:

$$8 \cdot 10^{-10} \text{ Кл} < q'_{\text{форм}} < 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл};$$

$$q_{\text{зав}} = \frac{q_{\text{форм}}}{k} = 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

Полный заряд, переносимый микрозарядом, будет равен:

$$q = q'_{\text{форм}} + q_{\text{зав}} \quad (66)$$

Количественно имеем $2,6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} < q < 3,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$.

Такие параметры хорошо согласуются с известными данными (см. табл. 5).

Принимая в первом приближении емкость микрозаряда постоянной в процессе формирования ($C_{\text{микро}} = \text{const}$), получим, что отношение напряжения, приложенного к емкости микрозаряда в конце стадии формирования ($U_{C_{\text{микро}}}$), к напряжению источника ($U_{\text{ист}}$), равно отношению заряду, переносимого на стадии формирования, к полному заряду, переносимому микрозарядом. С учётом выражения (61) это соотношение будет равно:

$$\frac{U_{C_{\text{микро}}}}{U_{\text{ист}}} = \frac{q'_{\text{форм}}}{q'_{\text{форм}} + q_{\text{зав}}} = \frac{q'_{\text{форм}}}{q'_{\text{форм}} + \frac{q'_{\text{форм}}}{k}} = \frac{k}{k+1} = \frac{0,887}{0,887+1} = 0,47. \quad (67)$$

В стадии завершения микрозаряда ёмкость приборьерной части остаётся постоянной. В связи с этим, как предполагалось ранее, в первом приближении процесс завершающего заряда приборьерной зоны микрозаряда можно считать как заряд конденсатора. Ток заряда затухает по экспоненте с некоторой постоянной времени τ .

Тогда справедливо:

$$I'_m \tau = q_{\text{зав}}, \quad (68)$$

$$\text{где } I'_m = \frac{U_{\text{ист}} - U_{C_{\text{микро}}}}{r_{\text{микро}}} = I_m \frac{1}{1+k} = 1,5 \frac{1}{1+0,887}, \quad (69)$$

где $U_{C_{\text{микро}}}$ – напряжение, приложенное к емкости микрозаряда в начале завершающей стадии.

Отсюда:

$$\tau = q_{\text{зав}} / I'_m. \quad (70)$$

Используя числовые значения для $q_{\text{зав}} = 1,8 \cdot 10^{-9}$ Кл и $I_m = 0,64$ А, имеем $\tau = 2,8$ нс. С другой стороны, полный заряд можно найти, исходя из ёмкости приборьерной части микрозаряда:

$$C_{\text{микро}} = C_6 S_{\text{микро}}, \quad (71)$$

где $S_{\text{микро}}$ – площадь приборьерной части микрозаряда, которую можно определить по формуле:

$$S_{\text{микро}} = \pi r_0^2 + 2\pi r_0 \xi = \pi r_0 (r_0 + 2\xi) \approx 2\pi r_0 \xi. \quad (72)$$

Учитывая выражение (44) для границы ионизации, имеем:

$$S_{\text{микро}} = 1,4 \pi r_0 \frac{U_{\text{ист.}}}{E_0}, \quad (73)$$

$$C_{\text{микро}} = 1,4 \pi r_0 \frac{U_{\text{ист.}}}{E_0} C_6. \quad (74)$$

Так как $q = U_{\text{ист.}} C_{\text{микро}}$, получим:

$$q = \pi r_0 \left(r_0 + 1,4 \frac{U_{\text{ист.}}}{E_0} \right) U_{\text{ист.}} C_6 = 1,4 \pi r_0 \frac{U_{\text{ист.}}^2}{E_0} C_6. \quad (75)$$

Для $U_{\text{ист.}} = 10$ кВ, $r_0 = 0,5$ мм, $E_0 = 24,5$ кВ/см, $C_6 \approx 3 \cdot 10^{-8}$ Ф/м² имеем $q = 2,7 \cdot 10^{-9}$ Кл, что хорошо согласуется с предыдущим результатом, определенным по формуле (66).

Для энергии микрозаряда имеем:

$$W_{\text{микро}} = W_6 + W_{\text{акт}}, \quad (76)$$

где $W_6 = qU/2$ – реактивная энергия, запасённая в приборьерной части микрозаряда;

$W_{\text{акт}}$ – активная энергия, потраченная для заряда приборьерной части микрозаряда.

Если принять, что приборьерная часть микрозаряда заряжается от нуля до напряжения горения микрозаряда « U », то справедливо (см. стр. 47):

$$W_{\text{акт}} = W_6 = qU/2. \quad (77)$$

С учётом (75) имеем:

$$W_{\text{акт}} = W_6 = 0,7\pi r_0 \frac{U^3}{E_0} C_6. \quad (78)$$

В свою очередь, активная часть энергии складывается из двух составляющих:

$$W_{\text{акт}} = W_{\text{э}} + W_{\text{дж}}, \quad (79)$$

где $W_{\text{э}} = U_{\text{э}} q$ – приэлектродные потери;

$U_{\text{э}} \leq 1$ кВ – приборьерное падение напряжения, принимаемое исходя из минимума напряжения горения разряда [96].

Джоулевы потери энергии можно определить по формуле:

$$W_{\text{дж}} = q \cdot \left(\frac{U}{2} - U_{\text{э}} \right) = I_m^2 \cdot \left(t_p + \frac{1}{2} \tau \right) \cdot (r_{\text{микро}} + r_{\text{внос}}). \quad (80)$$

Для $U = 10$ кВ, $r_0 = 0,5$ мм, $E_0 = 24,5$ кВ/см, $C_6 \approx 3 \cdot 10^{-8}$ Ф/м² получим:

$$W_{\text{акт}} = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}; \quad W_{\text{э}} = 0,27 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}; \quad W_{\text{дж}} = 1,67 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}.$$

Как видно из выражения (80), джоулевы потери подразделяются на потери внутри разрядной камеры:

$$W'_{\text{дж}} = I_m^2 r_{\text{микро}} \left(t_p + \frac{1}{2} \tau \right) \quad (81)$$

и внешние на высокоомных электродах

$$W''_{\text{дж}} = I_m^2 r_{\text{внос}} \left(t_p + \frac{1}{2} \tau \right). \quad (82)$$

Произведём ещё раз оценку максимального тока микроразряда, исходя из энергетического баланса. Из выражения (80) с учётом (43), (47) и (75) определим амплитуду тока микроразряда:

$$I_m = 6,3 \sqrt{\frac{r_0 \left(\frac{U}{2} - U_{\text{э}} \right) E_p}{R_p + R_{\text{э}}}}. \quad (83)$$

Для $U = 10$ кВ, $r_0 = 0,5$ мм, $E_0 = 24,5$ кВ/см, $R_p = R_{\text{э}} = 10^4$ Ом имеем $I_m = 0,7$ А, что хорошо согласуется с предыдущей оценкой, полученной по формуле (53).

Наличие высокоомных электродов задерживает процесс заряда ёмкости озонаторной камеры. Чем выше частота источника питания генератора озона, тем значительнее неравномерность зарядного процесса. В итоге синтез озона становится менее эффективным.

Более подробно такое явление рассмотрим для симметричного случая: разрядная озонаторная камера с двумя барьерами и двумя высокоомными электродами (рисунок 22).

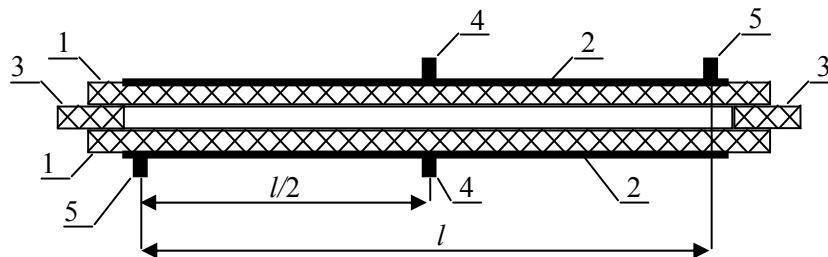


Рисунок 22 – Разрядная камера с двумя барьерами: 1 – барьеры; 2 – высокоомные электроды; 3 – прокладки; 4 – токоподводы; 5 – смещённые токоподводы.

Для расчёта используем схему замещения с распределёнными параметрами, представленную на рисунок 23.

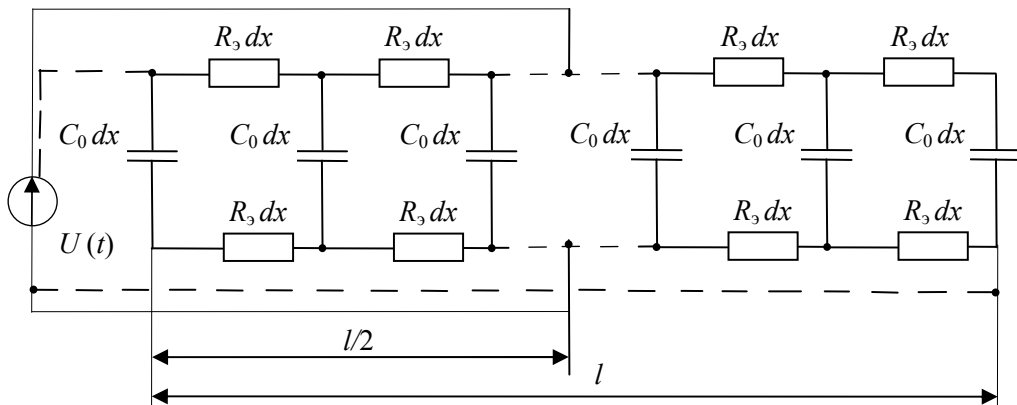


Рисунок 23 – Схема замещения с распределёнными параметрами: $U(t)$ – источник питания; R_3 – удельное поверхностное сопротивление высокоомного электрода; C_0 – удельная ёмкость разрядной озонаторной камеры; l – длина разрядной озонаторной камеры.

Здесь также представлены два варианта подключения источника питания: токоподвод без смещения (провода изображены сплошными линиями) и со смещением (провода изображены штриховой линией).

Проведём сравнение подключения со смещением токоподводов и без смещения для синусоидального источника питания. Считаем процесс установившимся.

Для подключения без смещения токоподводов минимальное напряжение на концах озонаторной камеры будет определяться выражением [41]:

$$U_{\min} = \frac{U}{\operatorname{ch}(\gamma l / 2)}, \quad (84)$$

$$\gamma = \sqrt{4\pi f C_0 R_3}, \quad (85)$$

где f – частота источника питания.

Соответственно, имеем для относительного уменьшения напряжения:

$$\Delta U = \frac{U_{\min}}{U} = \frac{1}{\operatorname{ch} \gamma l / 2}. \quad (86)$$

С целью упрощения расчётов и использования литературных данных в первом приближении схему на рис. 23 представим в виде расчетной (рисунок 24).

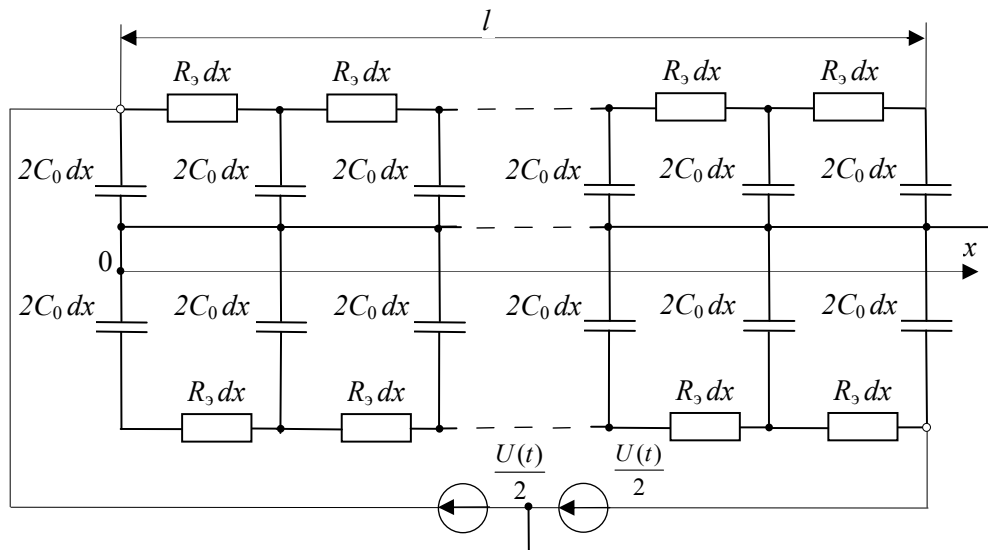


Рисунок 24 – Расчетная схема для смещённых токоподводов.

Тогда максимум напряжения определяется на концах кассеты в соответствии с формулой:

$$U_{\max \text{ см.}} = U \frac{\operatorname{ch}^2 \gamma l / 2}{\operatorname{ch} \gamma l}. \quad (87)$$

Относительное уменьшение напряжения для смещённых токоподводов имеет вид:

$$\Delta U_{\text{см}} = \frac{U_{\text{min см.}}}{U_{\text{max см.}}} = \frac{1}{\text{ch } \gamma l / 2}. \quad (88)$$

Из (88) находим γl :

$$\gamma l = 2 \text{Arch} (1 / \Delta U). \quad (89)$$

Подставляя выражение (84) для γ и решая относительно частоты f источника питания:

$$f \leq \frac{\text{Arch}^2(1 / \Delta U)}{\pi C_0 R_3 l^2}. \quad (90)$$

Например, для $\Delta U = 0,95$; $R_3 = 10^4$ Ом; $C_0 = 10^{-8}$ Ф/м²; $l = 0,3$ м имеем $f \leq 3,5$ кГц.

Оценочный расчёт показывает, что использование высокоомных электродов с целью повышения производительности по синтезу озона имеет ограничение, обусловленное пределом повышения частоты источников питания озонаторов. Отрицательное влияние повышения частоты напряжения выше определённого предела на интенсивность барьерного разряда описано, например, и в статье [124].

Повышение частотной границы $f_{\text{гр}}$ можно выполнить за счёт увеличения количества токоподводов и соответственно уменьшения расстояния l между ними. Эскиз такой озонаторной камеры представлен на рисунке 25.

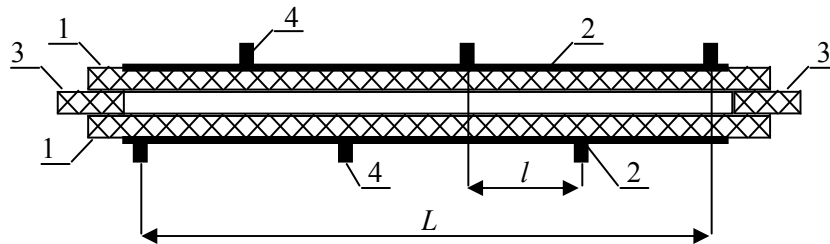


Рисунок 25 – Озонаторная кассета с шестью токоподводами: 1 – барьеры; 2 – высокоомные электроды; 3 – прокладки; 4 – токоподводы; l – расстояние между токоподводами; L – длина разрядной камеры.

Минимум l обусловлен диаметром d прибарьерной части микроразряда $l > d$. Для оценочных расчётов принимаем $l = 1$ см. Используя данные по формуле (90) получим $f_{\text{гр}} \approx 3$ МГц.

Если зарядные процессы можно считать установившимися, то разрядные процессы носят кратковременный наносекундный переходной характер и определяются микроразрядными процессами.

Также как и ранее рассмотрим микроразрядный процесс в плоскосимметричном варианте. Для анализа используем схему замещения, представленную на рис. 19, дифференциальное уравнение (33) и начальное условие $U(x, 0) = U$ [38, 87] остаются в силе. Заменяется граничное условие $\frac{\partial U}{\partial x}(0, t)$.

Учитывая, что $\frac{\partial U}{\partial x}(0, t) = E_0$ и используя выражение (53) для амплитуды микроразрядного тока, получим:

$$\frac{\partial U}{\partial x}(0, t) = -I_m \cdot \frac{(R_p + R_9)}{10r_0}. \quad (91)$$

Кроме этого, принимаем в первом приближении ток микрозаряда постоянным и равным I_m с длительностью, определяемой по формуле:

$$t_{\text{микр}} = t_p + \tau = t_p(1 + 1/k). \quad (92)$$

Кроме этого, в схеме замещения R_p принимаем равным нулю, т.к. ток микрозаряда сформирован. Тогда дифференциальное уравнение (33) примет вид:

$$\frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial x^2} - R_9 C_0 \frac{\partial U(x, t)}{\partial t} = 0. \quad (93)$$

Исходя из вышеприведённых условий и допущений справедливо следующее распределение напряжения по высокоомному электроду, которое получено из известных примеров [93]:

$$U(x, t) = U \cdot \Phi\left(x \cdot \sqrt{\frac{R_9 C_0}{2t}}\right) + \frac{I_m (R_9 + R_p)}{10r_0} \cdot \sqrt{\frac{2t}{\pi R_9 C_0}} \cdot \exp\left(\frac{-x^2 R_9 C_0}{2t}\right) - \frac{I_m (R_p + R_9)}{10r_0} x \cdot \left[1 - \Phi\left(x \cdot \sqrt{\frac{R_9 C_0}{2t}}\right)\right]. \quad (94)$$

Для оценки эффективного размера части высокоомного электрода, с которой заряд перешёл на приборьерную часть микрозаряда, примем значение аргумента при интеграле ошибок равным единице. Это достаточно точное

приближение, так как $\Phi(1) = 0,84$, что близко к предельному значению $\Phi(\infty) = 1$. Исходя из такого приближения, получим:

$$x_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{2 t_{\text{микро}}}{R_3 C_0}}. \quad (95)$$

Для $t_{\text{микро}} = (5,6 + 6,3) \cdot 10^{-9}$ с, $R_3 = 10^4$ Ом, $C_0 = 10^{-8}$ Ф/м² имеем $x_{\text{эфф}} = 15$ мм.

Проведём оценку вносимого высокоомным электродом сопротивления.

На рисунке 26 представлен чертёж части поверхности высокоомного электрода для расчёта вносимого сопротивления.

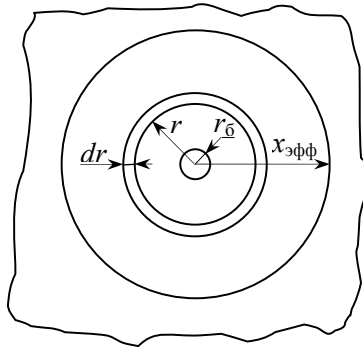


Рисунок 26 – Участок поверхности высокоомного электрода.

Исходя из рис. 26, имеем соотношение:

$$d \cdot r_{\text{внос}} = R_3 \frac{dr}{2\pi r}. \quad (96)$$

Тогда значение вносимого сопротивления можно определить по формуле:

$$r_{\text{внос}} = \int_{r_0}^{x_{\text{эфф}}} R_3 \frac{dr}{2\pi r} = \frac{R_3}{2\pi} \ln \frac{x_{\text{эфф}}}{r_0}. \quad (97)$$

Здесь $r_0 = d_0 / 2$ – радиус приборьерной зоны микроразряда.

Для $R_3 = 10^4$ Ом, $x_{\text{эфф}} = 15$ мм, $r_0 = 2,8$ мм получим $r_{\text{внос}} = 0,27R_3 = 2700$ Ом, что удовлетворительно согласуется с предыдущими расчётами (51).

3.3 Математическая модель с распределенными параметрами в цилиндрических координатах

Рассмотрим двухмерную систему генерации озона в барьерном поверхностном разряде с цилиндрической симметрией (см. рис. 20). Разряд происходит в воздухе. В качестве условия ионизации и развития поверхностного разряда примем достижение в разрядной зоне значения пороговой напряженности электрического поля $E_0 = 24,5$ кВ/см [6].

В работе [3] для системы генерации озона в поверхностном барьерном разряде с высокопроводящими электродами были получены математические выражения, позволяющие оценить время существования ΔT и длину ξ_{\max} отдельного поверхностного микроразряда. Применительно к системам генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами результаты моделирования барьерного поверхностного разряда в цилиндрических координатах будут иметь вид выражений (98)-(100).

Время существования отдельного микроразряда при рассмотрении системы генерации озона в барьерном поверхностном разряде с высокоомными электродами в цилиндрической системе координат определяется согласно выражению (98):

$$\Delta T = \frac{(U_0 - U_S)^2 \exp[-2(\rho_S + r_{\text{доб}})C\gamma^2]}{4\gamma^2 E_0^2 \left(\int_{\gamma\sqrt{(\rho_S + r_{\text{доб}})C}}^{\infty} \frac{1}{\theta} \exp(-\theta^2) d\theta \right)^2}, \quad (98)$$

где U_0 – напряжение относительно земли на цилиндрическом электроде, В;

U_S – остаточное напряжение относительно земли на поверхности барьера в момент времени $t = 0$, В;

ρ_S – удельное приповерхностное сопротивление в зоне разряда, Ом;

$r_{\text{доб}}$ – добавочное сопротивление в цепи цилиндрического электрода, Ом;

γ – параметр, определяемый из уравнения (100), $\text{м}\cdot\text{с}^{-0,5}$;

$C \approx 3 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/м}^2$ – ёмкость диэлектрического барьера на единицу площади (см. стр. 59);

$E_0 = 2,45 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ – значение пороговой напряжённости электрического поля;

θ – переменная, соответствующая расстоянию от центра координат в направлении z .

Напряжение U_S от остаточного заряда на поверхности барьера в первом приближении примем равным нулю – предыдущие разряды отсутствовали.

Максимальная длина поверхностного микрозаряда определяется по формуле:

$$\xi_{\max} = r_3 + 2\gamma\sqrt{\Delta T}. \quad (99)$$

Примем $r_3 = 1 \text{ мм}$.

Параметр γ определяется в результате решения уравнения:

$$\frac{\exp[-(\rho_S + r_{\text{доб}})C \cdot \gamma]}{\int_{\gamma\sqrt{(\rho_S + r_{\text{доб}})}}^{\infty} \frac{1}{\theta} \exp(-\theta^2) d\theta} = \frac{2en_e\gamma^2 b(\rho_S + r_{\text{доб}})(1 + \alpha\delta)}{U_0 - U_S}, \quad (100)$$

где e – заряд электрона,

n_e – концентрация электронов в ионизированной области поверхностного микрозаряда,

b – средняя высота ионизированной области поверхностного микрозаряда,

$\delta \ll \xi_{\max}$ – ширина области, в которой происходит генерация новых электрических зарядов,

α – коэффициент ударной ионизации (Таунсенда), который при нормальной плотности воздуха можно определить [6] по формуле (101):

$$\alpha = 0,2 \cdot (E - E_0)^2, \quad (101)$$

где E – напряженность электрического поля в канале поверхностного микрозаряда.

Барьерный поверхностный разряд, протекающий при различной полярности приповерхностного электрода (отрицательной и положительной), имеет существенные различия геометрических, электрических параметров и различие в принципе существования в целом [63, 100, 107, 133]. Известно, что выраженной

канальной структурой обладает поверхностный разряд и микроразряд при положительной полярности приповерхностного электрода. При отрицательной полярности канал поверхностного разряда такой структурой не обладает.

Поэтому данная математическая модель подходит для описания процесса развития барьерного поверхностного микроразряда только при положительной полярности приповерхностного электрода. Это следует из того, что в данной математической модели согласно уравнению (98) длина микроразряда ξ_{\max} растёт пропорционально времени существования микроразряда, если параметр γ имеет постоянное значение. Развитие поверхностного микроразряда при отрицательной полярности приповерхностного электрода ограничено в пространстве [107, 133]. Поэтому применение данной математической модели и, в частности, уравнения (98) для описания такого процесса требует либо ограничения времени ΔT развития микроразряда, либо введения нелинейности параметра γ , что в данной диссертации не рассматривается.

По данным работы [107] запишем параметры n_e и b для поверхностного барьерного микроразряда при положительной полярности приповерхностного электрода (таблица 6).

Таблица 6 – Концентрация электронов и толщина ионизированного слоя барьерного поверхностного микроразряда при положительной полярности приповерхностного электрода [107].

Параметр	Полярность приповерхностного электрода
	положительная
Концентрация электронов в области микроразряда, м^{-3}	10^{21}
Средняя высота ионизированной области	$100 \cdot 10^{-6}$

Известно из других работ [38, 87, 107] и получено в данной диссертации (48), что длина поверхностного микроразряда составляет порядка $10^{-3} - 10^{-2}$ м – большие значения соответствуют положительной полярности приповерхностного электрода и более высоким значениям напряженности электрического поля. Поэтому при значениях электрического поля E , превышающего пороговое

значение электрического поля E_0 не более, чем в несколько раз, справедливо соотношение $\alpha\delta \ll 1$.

Удельное приповерхностное сопротивление в зоне разряда определяется для ионизированного газа – для плазмы поверхностного разряда. Оценим удельную проводимость ионизированной области исходя из закона Ома в дифференциальной форме (102) по известным параметрам барьерного поверхностного разряда:

$$\sigma = \frac{j}{E} = \frac{j}{E/N_L} \cdot \frac{1}{N_L}, \quad (102)$$

где $j = 10^6 \text{ А/м}^2$ – плотность тока в барьерном микроразряде [45],

$E/N_L = 100 \text{ Тд} = 100 \cdot 10^{-21} \text{ В} \cdot \text{м}^2$ – среднее значение напряженности электрического поля в канале поверхностного микроразряда [107],

$N_L = 2,687 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ – постоянная Лошмидта при нормальных условиях.

Тогда удельная (объёмная) проводимость поверхностного микроразряда равна:

$$\sigma = \frac{10^6}{10^{-19}} \cdot \frac{1}{2,687 \cdot 10^{25}} \approx 0,4 \text{ См/м}.$$

Полученное значение удельной объёмной проводимости хорошо согласуется с известными параметрами слабоионизированной плазмы [94, С. 576].

Рассмотрим активное сопротивление поверхностного микроразряда. Определение этого сопротивления по значению удельного поверхностного или удельного объёмного сопротивления имеет одинаковый физический смысл. То есть справедливы соотношения (103) и (104):

$$\rho_S \frac{\xi}{x} = \rho_V \frac{\xi}{x \cdot b}, \quad (103)$$

$$\rho_S = \frac{\rho_V}{b} = \frac{1}{\sigma \cdot b}, \quad (104)$$

где ξ – длина поверхностного микроразряда,

x – ширина поверхностного микроразряда,

ρ_V – удельное объёмное сопротивление поверхностного микроразряда.

Значение удельного поверхностного сопротивления ионизированной области микрозаряда согласно выражению (104) и параметрам поверхностного микрозаряда (таблица 6) при положительной полярности приповерхностного электрода:

$$\rho_s = \frac{1}{0,4 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} \approx 2,5 \cdot 10^4 \text{ Ом.}$$

Определим параметр γ , подставив значения известных параметров в уравнение (100). Зависимости параметра γ от напряжения U_0 при различных значениях добавочного сопротивления представлены на рисунке 27 для положительной полярности приповерхностного электрода.

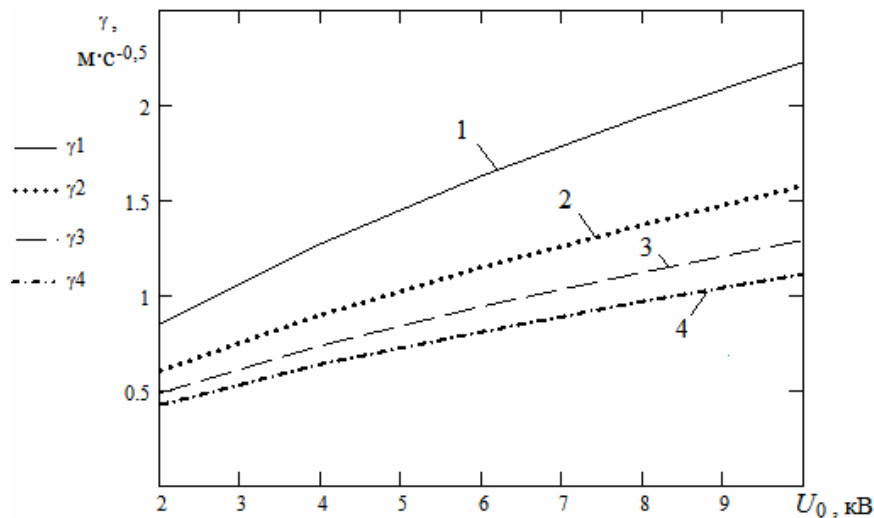


Рисунок 27 – Зависимости параметра γ от напряжения на цилиндрическом электроде при различных значениях добавочного сопротивления: 1 – $r_{\text{доб.}} = 0$, 2 – $r_{\text{доб.}} = \rho_s$, 3 – $r_{\text{доб.}} = 2\rho_s$, 4 – $r_{\text{доб.}} = 3\rho_s$.

Определим время существования отдельного поверхностного микрозаряда. С учётом выражения (100) уравнение (98) примет вид:

$$\Delta T = \left(\frac{e \cdot n_e \cdot \gamma \cdot b \cdot (\rho_s + r_{\text{доб.}})}{E_0} \right)^2. \quad (105)$$

Зависимость времени существования отдельного микрозаряда ΔT от напряжения на приповерхностном электроде с учётом найденных значений γ при различных значениях добавочного сопротивления представлена на рисунке 28 для положительной полярности приповерхностного электрода.

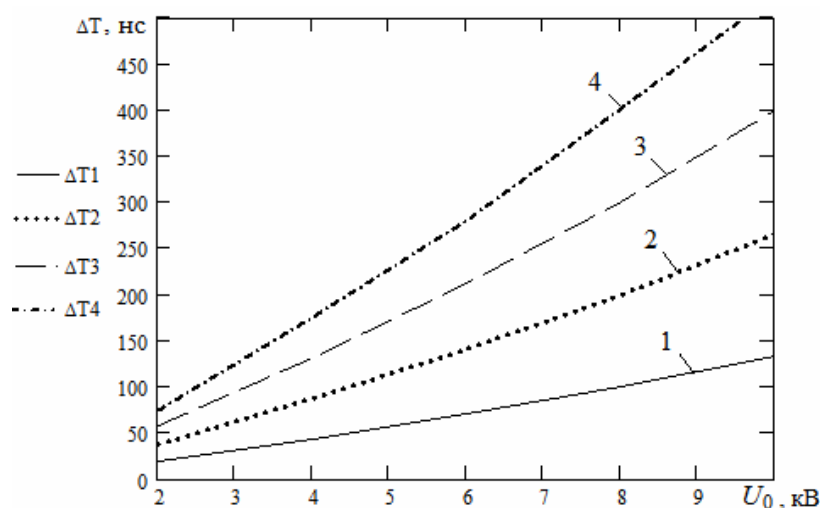


Рисунок 28 – Зависимость времени существования поверхностного микрозаряда от напряжения на цилиндрическом электроде при различных значениях добавочного сопротивления: 1 – $r_{доб.} = 0$, 2 – $r_{доб.} = \rho_s$, 3 – $r_{доб.} = 2\rho_s$, 4 – $r_{доб.} = 3\rho_s$.

Длина поверхностного микрозаряда ξ_{max} при совместном рассмотрении уравнений (98-100) математической модели не зависит от дополнительного сопротивления в цепи электрода. Расчётная зависимость длины поверхностного микрозаряда ξ_{max} от напряжения представлена на рисунке 29.

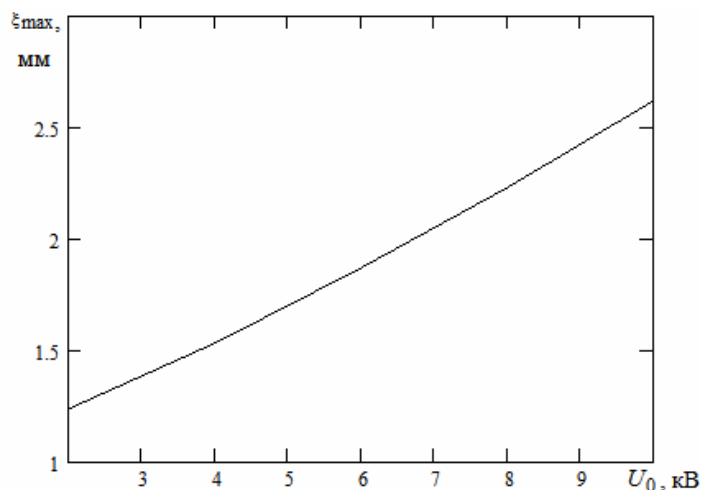


Рисунок 29 – Зависимость длины поверхностного микрозаряда от напряжения на цилиндрическом электроде.

Время микрозаряда на рис. 28 хорошо согласуется с результатами осциллографических исследований систем генерации озона с высокоомными электродами, представленными далее в диссертации. При этом время микрозаряда увеличивается пропорционально увеличению сопротивления в цепи электрода.

Диаметр приборьерной зоны поверхностного микрозаряда при напряжении $U_0 = 10$ кВ: $d_6 = 2\xi_{\max} = 5,2$ мм.

Это значение хорошо согласуется со значением, полученным в результате расчёта модели с распределёнными параметрами в плоскосимметричной системе координат в данной диссертации (см. стр. 60).

3.4 Математическая модель с сосредоточенными параметрами

Вторую стадию микрозаряда (см. рис. 17), во время которой происходит дозарядка приборьерной ионизированной области канала микрозаряда, можно проанализировать с помощью математической модели на основе электрической схемы замещения с сосредоточенными параметрами (см. рис. 19). К началу второй стадии геометрия приборьерной части микрозаряда становится стационарной.

Расчет тока $i_{\text{МК}}$ в схеме замещения рис. 5, выполненный по законам Кирхгофа, известен [23], и его результат может быть записан в виде:

$$i_{\text{МК}} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (106)$$

где p_1 и p_2 – корни характеристического уравнения цепи рис. 5;

A_1 и A_2 – постоянные, которые находятся из начальных условий и определяются по формулам:

$$A_1 = \frac{i_{\text{МК}}(0)}{p_2 - p_1} \cdot \left[p_2 + \frac{1}{r_{\text{МК}}} \left(\frac{1}{C_{\text{МК}}} + \frac{1}{C_9} \right) \right], \quad (107)$$

$$A_2 = A_1 + i_{\text{МК}}(0) = \frac{i_{\text{МК}}(0)}{p_1 - p_2} \cdot \left[p_1 + \frac{1}{r_{\text{МК}}} \left(\frac{1}{C_{\text{МК}}} + \frac{1}{C_9} \right) \right]. \quad (108)$$

Значения корней в выражениях (107) и (108) зависят от электрических параметров цепи рис. 19, которые, в свою очередь, связаны с конструктивными параметрами разрядных озонаторных камер.

Для конструкций со сплошными плоскопараллельными электродами (см. рис. 16, а) справедливо соотношение $C_3 \gg C_{\text{МК}}$, тогда выражения для корней характеристического уравнения могут быть найдено в виде:

$$p_{1,2} \approx \frac{-(C_{\text{МК}} + C_3) r_{\text{ИСТ}} - r_{\text{МК}} C_{\text{МК}} \pm [(C_{\text{МК}} + C_3) r_{\text{ИСТ}} - r_{\text{МК}} C_{\text{МК}}]}{2 r_{\text{МК}} r_{\text{ИСТ}} C_3 C_{\text{МК}}}, \quad (109)$$

$$p_1 = -1/r_{\text{МК}} C_{\text{МК}}, \quad p_2 = -1/r_{\text{ИСТ}} C_3. \quad (110)$$

Вычисляя постоянные интегрирования A_1 и A_2 с помощью формул (107) и (108), получим:

$$A_1 \approx -\frac{u_{\text{ИСТ}} - u_3}{r_{\text{МК}}} \cdot \frac{C_{\text{МК}}}{C_3}, \quad A_2 \approx \frac{u_{\text{ИСТ}} - u_3}{r_{\text{МК}}}, \quad (111)$$

где $u_3 \approx 0,47U_{\text{ИСТ}}$ – напряжение, приложенное к емкости микроразряда в начале завершающей стадии (см. стр. 62).

В итоге выражение для тока микроразряда примет вид:

$$i_{\text{МК}} \approx \frac{u_{\text{ИСТ}} - 0,47u_{\text{ИСТ}}}{r_{\text{МК}}} e^{\frac{-t}{r_{\text{МК}} C_{\text{МК}}}} - \frac{u_{\text{ИСТ}} - 0,47u_{\text{ИСТ}}}{r_{\text{МК}}} \frac{C_{\text{МК}}}{C_3} e^{\frac{-t}{r_{\text{ИСТ}} C_3}}. \quad (112)$$

Учитывая, что $C_3 \gg C_{\text{МК}}$, можно пренебречь вторым слагаемым, тогда окончательно получим:

$$i_{\text{МК}} \approx \frac{0,53u_{\text{ИСТ}}}{r_{\text{МК}}} e^{\frac{-t}{r_{\text{МК}} C_{\text{МК}}}}. \quad (113)$$

Из формулы (113) видно, что на ток микроразряда можно воздействовать изменением активного сопротивления ($r_{\text{МК}}$) микроразряда. Если использовать в качестве электродов разрядной озонаторной камеры высокоомные электроды, можно уменьшить величину микроразрядного тока и соответственно увеличить постоянную времени микроразряда $\tau_{\text{МК}} = r_{\text{МК}} C_{\text{МК}}$.

Для конструкций с секционированными электродами (см. рис. 16, б) справедливо соотношение $C_3 < C_{\text{МК}}$. Анализ влияния параметров схемы на постоянные интегрирования показал, что при этом условии одним из корней можно пренебречь. В этом случае оставшийся корень будет иметь вид:

$$p = -\frac{1}{(C_{\text{МК}} + C_3)r_{\text{ИСТ}} + r_{\text{МК}}C_{\text{МК}}} \approx -\frac{1}{C_{\text{МК}}(r_{\text{ИСТ}} + r_{\text{МК}})}. \quad (114)$$

Ток микроразряда будет определяться формулой:

$$i_{\text{МК}} = Ae^{pt}, \quad (115)$$

где $A = i_{\text{МК}}(0) = (u_{\text{ИСТ}} - u_3) / (r_{\text{МК}} + r_{\text{ИСТ}})$.

Окончательно получим:

$$i_{\text{МК}} \approx \frac{0,53u_{\text{ИСТ}}}{r_{\text{МК}} + r_{\text{ИСТ}}} e^{\frac{-t}{(C_{\text{МК}} + C_3)r_{\text{ИСТ}} + r_{\text{МК}}C_{\text{МК}}}}. \quad (116)$$

Учитывая $C_3 < C_{\text{МК}}$, выражение (116) упрощается и принимает вид:

$$i_{\text{МК}} \approx \frac{0,53u_{\text{ИСТ}}}{r_{\text{МК}} + r_{\text{ИСТ}}} e^{\frac{-t}{C_{\text{МК}}(r_{\text{ИСТ}} + r_{\text{МК}})}}. \quad (117)$$

В данном случае снижение микроразрядного тока можно получить за счёт искусственного увеличения сопротивления источника питания $r_{\text{ИСТ}}$ путём включения последовательно с ним добавочного резистора. В конструкциях с секционированным электродом, в том числе и в озонаторах с поверхностным разрядом, резисторы можно располагать на значительном расстоянии от озонаторной камеры. Таким образом, можно избежать передачи тепла в разрядный промежуток, за счёт чего синтез озона станет более эффективным.

Выводы по третьей главе

Для электрической схемы замещения с распределенными параметрами поверхностного барьерного микроразряда в плоскосимметричной системе координат справедливо уравнение в частных производных, которое сводится к задаче Стефана о фазном переходе, имеющей известное решение. При значении удельного поверхностного сопротивления высокоомного электрода $R_3 = 10^4$ Ом было рассчитано значение максимальной длины поверхностного микроразряда – 3 мм при напряжении между электродами 10 кВ.

При толщине диэлектрического барьера равной 1 мм и значении относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 3,5$ время развития поверхностного микрозаряда до длины 3 мм рассчитано равным 3 нс, что соответствует скорости удлинения стримера порядка 10^6 м/с.

Рассчитано максимальное значение тока поверхностного микрозаряда с высокоомными электродами, имеющими поверхностное сопротивление 10^4 Ом – максимальный ток микрозаряда равен $I_m = 0,64$ А, что соответствует известным экспериментальным данным, по которым $0,1 \text{ А} < I_m < 1 \text{ А}$.

Значения переносимых во время микрозаряда электрических зарядов не зависят от сопротивления цепи разряда. Заряд, приобретаемый поверхностным микрозарядом на стадии формирования, $q'_{\text{форм}} = (2,1 - 4,3) \cdot 10^{-9}$ Кл. Заряд, приобретаемый микрозарядом на завершающей стадии во время дозарядки $q_{\text{зав}} = 4,85 \cdot 10^{-9}$ Кл. Полный заряд, переносимый микрозарядом, рассчитан равным $q = (7 - 9) \cdot 10^{-9}$ Кл. Рассчитано значение постоянной времени завершающей стадии поверхностного микрозаряда $\tau = 7,5$ нс.

Энергетический баланс в микрозаряде представлен суммой реактивной и активной энергии микрозаряда; активная часть энергии складывается из двух составляющих: из приэлектродных потерь и джоулевых потерь энергии. Рассчитанное значение приэлектродных потерь энергии при протекании поверхностного микрозаряда составляет $0,7 \cdot 10^{-5}$ Дж, значение джоулевых потерь $3 \cdot 10^{-5}$ Дж.

Рассчитаны предельные режимы работы систем генерации озона в объемном барьерном разряде с высокоомными электродами, определена граничная частота напряжения, до которой применение высокоомных электродов эффективно. Значение такой граничной частоты зависит от расстояния между соседними токоподводами к высокоомному электроду. При расстоянии между токоподводами 30 см и поверхностном сопротивлении высокоомного электрода 10^4 Ом режим эффективного применения высокоомных электродов ограничен частотой 3 кГц. При уменьшении расстояния между токоподводами до 1 см это

ограничение становится менее узким на три порядка – граничная частота увеличивается до 3 МГц.

Проведена оценка эффективного расстояния по поверхности высокоомного электрода, задействованного в процессе микроразряда – это расстояние равно 15 мм. При этом значение сопротивления, вносимого высокоомным электродом в отдельный микроразряд, составляет 2,1 кОм.

Математическая модель с распределенными параметрами систем генерации озона с высокоомными электродами в цилиндрической системе координат позволяет оценить длину поверхностного микроразряда, а также время развития разряда. Время развития разряда, согласно данной модели, пропорционально сопротивлению микроразряда и при обычных параметрах составляет порядка 50-100 нс и зависит от напряжения питания. При увеличении сопротивления, вносимого в цепь микроразряда, время развития разряда пропорционально увеличивается. Длина поверхностного микроразряда, согласно данной математической модели, не зависит от сопротивления, вносимого в цепь микроразряда.

С помощью упрощенной математической модели систем генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами с сосредоточенными параметрами получены результаты для двух конструктивных исполнений разрядной озонаторной камеры: со сплошными электродами и с секционированным электродом. Исследование процесса барьерного микроразряда на модели с сосредоточенными параметрами показало, что увеличение сопротивления цепи микроразряда приводит к уменьшению амплитуды при одновременном возрастании длительности импульса микроразряда.

Если использовать в качестве электродов разрядной озонаторной камеры высокоомные электроды, можно уменьшить значение микроразрядного тока и, соответственно, увеличить постоянную времени микроразряда. В разрядной камере с секционированным электродом снижение микроразрядного тока можно получить за счёт искусственного увеличения сопротивления источника питания путём включения добавочного резистора.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦИИ ОЗОНА В БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ С ВЫСОКООМНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

4.1 Действующие макеты для физического моделирования и исследования процессов электросинтеза озона

Учитывая сложность математического описания процессов, протекающих в реальных озонаторах барьерного типа, некоторые исследования целесообразно выполнить путём физического моделирования. Эти исследования касаются моделирования электрофизических процессов, которое позволяет оценить электрические параметры и производительность систем генерации озона с высокоомными электродами.

Для экспериментального исследования путей повышения энергоэффективности систем генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами была создана принципиальная физическая модель озонатора, позволяющая осуществлять изменение параметров электрической цепи отдельного барьерного микроразряда. Такая модель была создана в виде камеры барьерного разряда с плоскопараллельными электродами, один электрод которой представляет собой предельно секционированный элемент (рисунок 30).

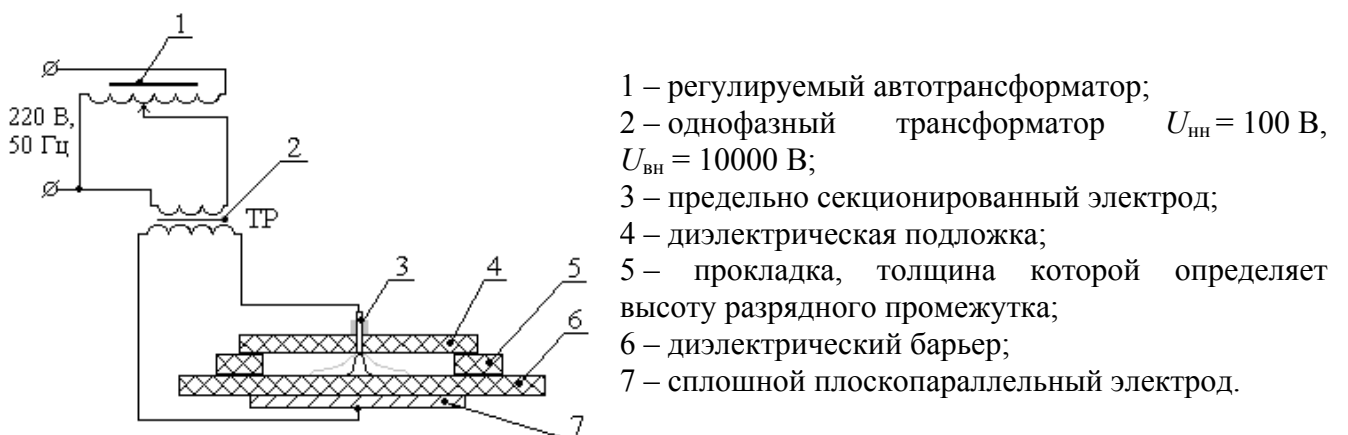


Рисунок 30 – Камера барьерного разряда с предельно секционированным электродом.

Диэлектрический барьер 6 на рис. 30 представляет собой фольгированный стеклотекстолит, так что электрод 7 и барьер 6 являются неразрывной

конструкцией. Электрод 3 представляет собой отрезок алюминиевого изолированного кабеля с диаметром жилы 2 мм, вмонтированный в подложку из оргстекла 4 и закрепленный в ней с помощью эпоксидного клея. Толщина прокладки 5 и, соответственно, высота разрядного промежутка составляет 1 мм. Толщина диэлектрического барьера 6 составляет 1 мм.

Диаметр предельно секционированного электрода 2 мм соизмерим с диаметром расширенной части барьерного микроразряда порядка 1 мм (см. рис. 4), что даёт возможность протекания одного или нескольких микроразрядов с поверхности предельно секционированного электрода при относительно небольшом искажении электрического поля между электродами. Фотография камеры барьерного разряда с предельно секционированным электродом изображена на рисунок 31.

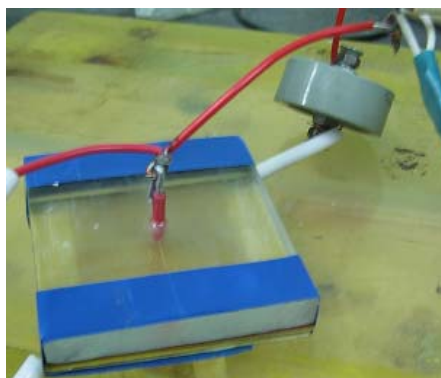
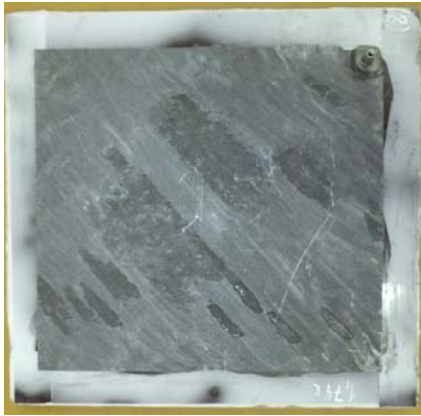


Рисунок 31 – Фотография камеры барьерного разряда с предельно секционированным электродом.

Камера барьерного разряда с предельно секционированным электродом (рис. 30, 31) предназначена для осциллографического исследования параметров импульсов барьерных микроразрядов, имеющих различные параметры электрической цепи. Изменение параметров цепи микроразрядов осуществляется с помощью подключения к предельно секционированному электроду таких компонентов как резисторы, конденсаторы и др.

С целью осуществления экспериментального сравнения параметров систем генерации озона в барьерном разряде с различным сопротивлением электродов была изготовлена разрядная озонаторная камера проточно-вытяжной конструкции, состоящая из двух диэлектрических барьеров из оргстекла,

разделенных воздушным разрядным промежутком, покрытых образующими емкостью, распределенными токоподводами (электродами) (рисунок 32). Такой тип разрядной озонаторной камеры со сплошными плоскопараллельными электродами схематически изображен на рис. 16, а.



а



б

Рисунок 32 – Фотографии разрядной озонаторной камеры со сплошными плоскопараллельными электродами: а – с высокоомным электродом на основе сажи и графита, б – с высокопроводящим электродом из фольги.

Разрядная камера (рис. 32) имеет следующие параметры:

- разрядная площадь электродов 480 см^2 ,
- высота разрядного промежутка 4,2 мм,
- межэлектродная емкость 150 пФ.

Технология изготовления сплошных электродов, имеющих повышенное активное поверхностное сопротивление порядка единиц – десятков килоом, заключается в создании тонкого слоя на основе смеси мелкодисперсных порошков сажи и графита, равномерно распределенного по наружной поверхности разрядной озонаторной камеры (рис. 32, а). В качестве связующего состава использовался термостойкий кремнеорганический лак. Порошки сажи и графита в целях создания высокоомного слоя смешивались в различных пропорциях, в результате чего образовывались электродные покрытия, обладающие различным поверхностным сопротивлением. Такое различие достигается в результате того, что сажа, по сравнению с графитом, обладает значительным электрическим сопротивлением, и сравнительно небольшое

увеличение содержания порошка сажи в смеси приводит к заметному увеличению поверхностного сопротивления электродного слоя, образующегося после нанесения и высыхания смеси.

Особенностью разрядной озонаторной камеры со сплошными плоскопараллельными электродами, схематично представленной на рис. 16, а является самое большое значение межэлектродной емкости среди вариантов конструкции камер барьерного разряда (см. рис. 16, а-в). В разрядной камере такой конструкции во время барьерного разряда, состоящего из одновременно протекающей совокупности микрозарядов (серии микрозарядов), будет происходить локальная разрядка частичных емкостей озонаторной камеры. Геометрия этих частичных емкостей соответствует отдельным микрозарядам в серии, распределенным по площади разрядного промежутка. Ток в завершающей стадии микрозаряда в такой разрядной озонаторной камере можно определить в соответствии с выражением (113), полученным в результате математического моделирования барьерного разряда в системах генерации озона с плоскопараллельными высокоомными электродами.

С целью осуществления оперативного изменения параметров цепи разряда, а также с целью создания конструкции камеры барьерного разряда, обладающей существенно меньшим значением межэлектродной емкости по сравнению с камерой со сплошными плоскопараллельными электродами, была изготовлена разрядная озонаторная камера проточно-вытяжной конструкции с секционированным электродом (рисунок 33). Разрядная камера состоит из двух электродов, разделенных диэлектрическим барьером и газовым разрядным промежутком. Один из электродов является секционированным и представляет собой алюминиевые проволоки диаметром 1 мм, расположенные параллельно друг другу на поверхности диэлектрического барьера в пространстве газового разрядного промежутка. Другой электрод сплошной плоскопараллельный, выполненный из высокопроводящего материала. Такой тип разрядной озонаторной камеры с секционированным электродом схематически изображен на рис. 16, в.

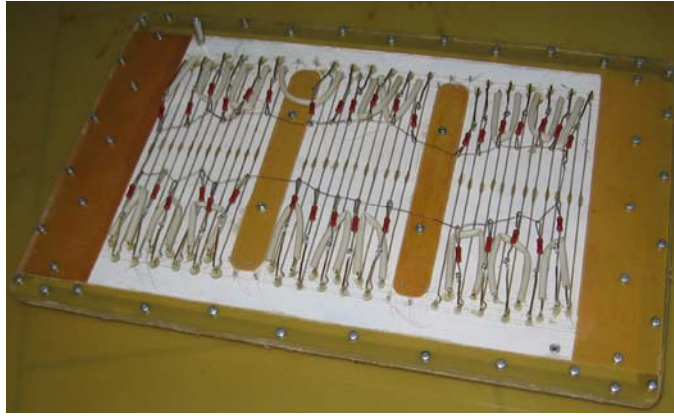


Рисунок 33 – Фотография разрядной озонаторной камеры с секционированным электродом с возможностью регулирования параметров цепи разряда.

Особенностью разрядной озонаторной камеры (рис. 33) является возможность регулирования параметров электрической цепи барьерного разряда путем последовательного подключения к элементам секционированного электрода RLC -элементов. Один из концов каждого из элементов секционированного электрода подключен к общей электрической шине, которая соединена с одним из двух выводов высоковольтной обмотки трансформатора. Другой вывод высоковольтной обмотки трансформатора соединен с другим электродом разрядной озонаторной камеры — сплошным высокопроводящим электродом.

В процессе выполнения диссертационной работы были изготовлены и внедрены в производственные процессы на трёх предприятиях опытные образцы озонаторных установок, в которых использованы разрядные озонаторные камеры с секционированным электродом с увеличенным активным сопротивлением (рис. 33). Акты о внедрении представлены в Приложении А.

В Приложении Б на рисунках П. Б. 1 и П. Б. 2 представлены фотографии опытных образцов озонаторных установок с разрядными камерами с высокоомными электродами, внедрённых в научно-исследовательские и производственные работы предприятий ООО «Компас» г. Пермь и ООО "Завод "Заряд" г. Гай Оренбургской обл. Производительность по озону каждой установки 5 г/ч при концентрации озона 20 г/м³, потребляемая мощность (без учёта концентратора кислорода) 150 Вт и 300 Вт соответственно.

4.2 Осциллографическое исследование барьерного разряда в системах генерации озона с высокоомными электродами

Исследование осциллограмм импульсов тока и напряжения микроразрядов производилось с помощью осциллографа универсального запоминающего С8-12 со сменными блоками в каналах вертикальной развёртки и горизонтального отклонения, предназначенного для исследования формы однократных и периодических электрических сигналов от 10 мкВ до 500 В в полосе частот от постоянного тока до 3500 МГц путём наблюдения и фотографирования.

Для получения и последующего фотографирования кривых тока и напряжения отдельных микроразрядов и их серий с помощью осциллографа необходима специальная схема, исключающая возможные помехи (рисунок 34).

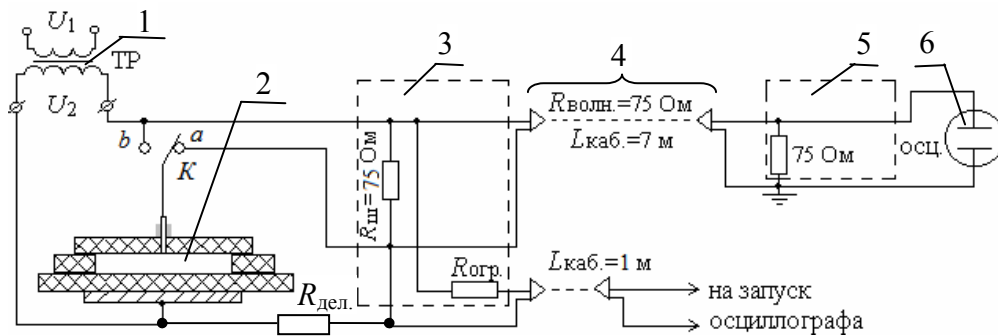


Рисунок 34 - Схема установки для снятия осциллограмм тока микроразряда (ключ K в положении a) и напряжения микроразряда (ключ K в положении b): 1 – однофазный трансформатор $U_{\text{нн}} = 100$ В, $U_{\text{вн}} = 10000$ В; 2 – камера барьерного разряда; 3, 5 – блоки согласующих сопротивлений; 4 – передающий кабель с волновым сопротивлением 75 Ом; 6 – осциллограф.

Для осуществления некоторого запаздывания сигнала, необходимого для получения чёткой картины на экране осциллографа, сигнал к осциллографу подаётся через длинный коаксиальный кабель ($L_{\text{каб.}} = 7$ м, $R_{\text{волн.}} = 75$ Ом), а запуск осциллографа осуществляется через кабель меньшей длины. Для устранения помех от измерительного кабеля к его концам подключены согласующие сопротивления 3, 5 значением 75 Ом. На осциллограф поступает сигнал от эквивалентного сопротивления $75/2 = 37,5$ Ом. Если ключ в положении « a », то подаётся сигнал, фиксирующий форму тока. В положении « b » – сигнал

напряжения между электродами. Здесь в качестве высоковольтного плеча делителя напряжения используется резистор $R_{\text{дел.}} = 150 \text{ кОм}$.

Питание разрядной ячейки осуществлялось напряжением 9 кВ частотой 50 Гц. Фотографирование кривых тока, выводимых на экран осциллографа, производилось с помощью цифрового фотоаппарата Canon Power Shot A510.

Для выяснения реальных значений амплитуды кривой тока, отображаемой на осциллографе, была проведена градуировка по напряжению (рисунок 35).

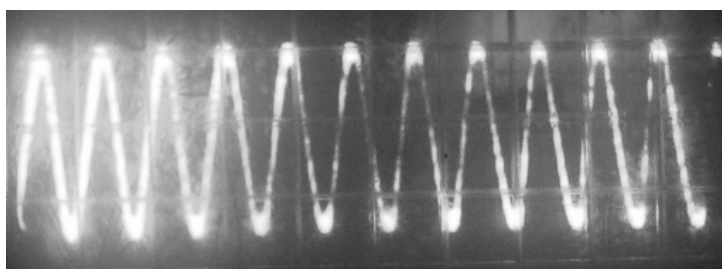


Рисунок 35 – Градуировка по напряжению.

На рисунке 35 разница между максимумами $2U_m = 10 \text{ В}$ при коэффициенте усиления отклонения $k_y = 2 \text{ В/дел.}$, коэффициент развёртки $k_p = 20 \text{ нс/дел.}$ То есть при коэффициенте усиления отклонения $k_y = 2 \text{ В/дел}$ цена деления составляет $U_{\text{дел.}} = 5 \text{ В/дел.}$

Следовательно, при снятии кривых тока цена деления при коэффициенте усиления отклонения $k_y = 2 \text{ В/дел}$ будет равна:

$$I_{\text{дел.}} = \frac{U_{\text{дел.}}}{R_{\text{ш}} / 2} = \frac{5 \text{ В/дел.}}{37,5 \text{ Ом}} = 0,134 \text{ А/дел.}$$

С помощью схемы (см. рис. 34) для получения осциллограмм импульсов микрозаряда с обычными параметрами при напряжении на разрядной камере $U_{\text{ист.}} = 9 \text{ кВ}$ получена осциллограмма тока микрозаряда (рисунок 36).

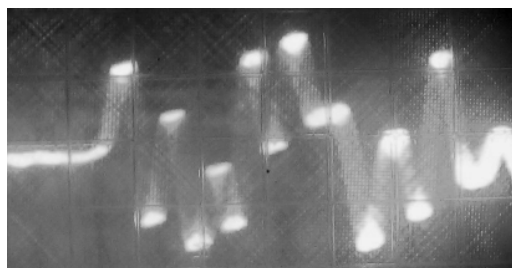


Рисунок 36 – Осциллограмма тока микрозаряда с обычными параметрами.

- коэффициент отклонения 3,3 мА/дел.;

- коэффициент развёртки 20 нс/дел.;
- время разряда $T_p \approx 120$ нс.

Как видно из рис. 36, переходный процесс микроразряда имеет сильно выраженную колебательную составляющую, следовательно, для параметров барьерного микроразряда выполняется следующее соотношение:

$$\frac{r_p^2}{4 \cdot L_p^2} < \frac{1}{L_p \cdot C_p}. \quad (118)$$

где r_p – активное сопротивление микроразряда, определяемое сопротивлением плазменного канала,

C_p – ёмкость микроразряда, определяемая межэлектродной ёмкостью плазменного канала, пФ,

L_p – индуктивность микроразряда.

Процесс микроразряда начинается при достижении напряжения на разрядном промежутке напряжения, которое меньше напряжения источника питания на уровень приэлектродного падения напряжения (см. (23) формулу). При этом напряжение на разрядном промежутке U_p можно считать постоянным при условии, если скорость изменения напряжения питания не выше порядка 0,1-1 кВ/мкс. Ток микроразряда, имеющего колебательный характер, при включении на постоянное напряжение можно определить по формуле [84]:

$$i_p = \frac{U_{\text{ист.}} - U_{\text{эл.}}}{\omega_{\text{св.}} L_p} \cdot e^{-\alpha t} \sin(\omega_{\text{св.}} t + \pi), \quad (119)$$

где $\omega_{\text{св.}} = \sqrt{1/LC - r_p^2/4L_p^2}$ – угловая частота собственных колебаний цепи микроразряда,

$\alpha = r_p/2L_p$ - коэффициент затухания.

Колебательный характер барьерного микроразряда можно объяснить тем, что конструкция с предельно секционированным электродом имеет низкую межэлектродную ёмкость. Это, согласно выражению (118), могло стать причиной сильного колебательного характера процесса микроразряда.

Чтобы сделать характер микроразряда соответствующим реальным условиям (достаточно большой площади электродов), для увеличения ёмкости параллельно с разрядной камерой с предельно секционированным электродом была включена добавочная ёмкость $C_d = 1000$ пФ в соответствии со схемой (рисунок 37).

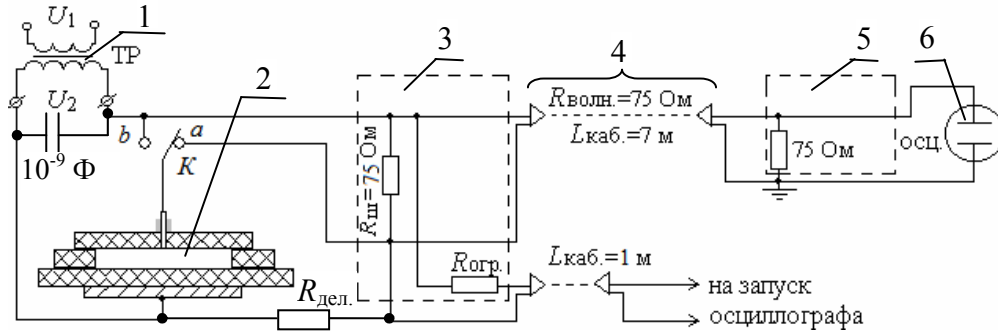


Рисунок 37 – Схема подключения к осциллографу камеры барьерного разряда с обычными параметрами цепи микроразряда и добавочной ёмкостью.

В результате добавления ёмкости переходный процесс микроразряда стал иметь апериодический характер (рисунок 38).

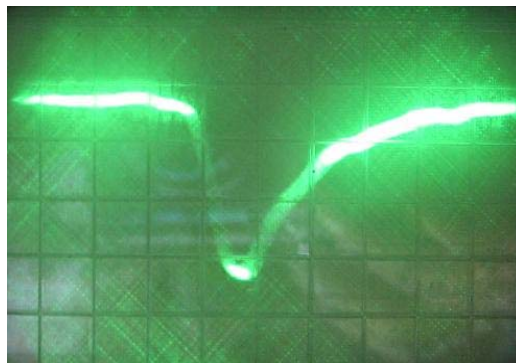


Рисунок 38 – Осциллограмма импульса тока микроразряда в разрядной камере с предельно секционированным электродом и добавочной ёмкостью.

Осциллограмма, изображённая на рис. 38, имеет следующие параметры:

- коэффициент отклонения 110 мА/дел.;
- коэффициент развёртки 10 нс/дел.;
- время разряда $T_p \approx 50$ нс.

В результате увеличения ёмкости микроразряда характер переходного процесса микроразряда изменился и стал апериодическим, амплитуда тока увеличилась в 30 раз, длительность микроразряда уменьшилась в 2,5 раза.

Для импульса микроразряда, имеющего аperiодический характер, справедливо следующее соотношение параметров цепи микроразряда:

$$\frac{r_p^2}{4 \cdot L_p^2} > \frac{1}{L_p \cdot C_p}. \quad (120)$$

Ток микроразряда, имеющего аperiодический характер, при включении на постоянное напряжение можно определить по формуле [84]:

$$i_p = \frac{U_{\text{ист.}}}{L_p(p_1 - p_2)} \left(e^{p_1 \cdot t} - e^{p_2 \cdot t} \right), \quad (121)$$

$$\text{где } p_{1,2} = \frac{-r_p}{2L_p} \pm \sqrt{\frac{r_p}{4L_p^2} - \frac{1}{L_p \cdot C_p}}. \quad (122)$$

Учитывая соотношение (120), p_1 и p_2 будут действительными числами.

На рисунке 39 изображена схема для получения осциллограммы тока микроразряда с изменённым параметром электрической цепи, а именно с увеличенным активным сопротивлением. Ёмкость микроразряда также была скомпенсирована добавочной ёмкостью.

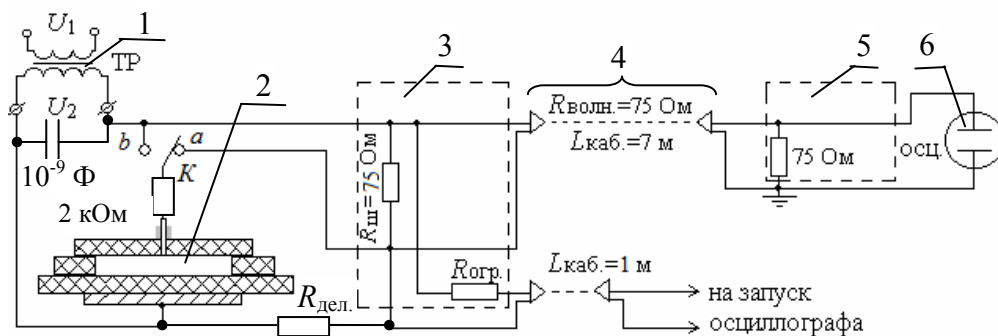


Рисунок 39 – Схема подключения к осциллографу камеры барьерного разряда с добавочным сопротивлением в цепи микроразряда и добавочной ёмкостью.

При напряжении на разрядной камере $U_{\text{ист.}} = 9 \text{ кВ}$ получена осциллограмма тока микроразряда с увеличенным активным сопротивлением (рисунок 40).

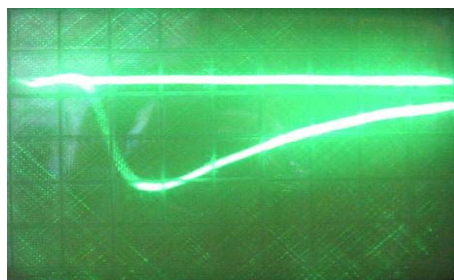


Рисунок 40 – Осциллограмма импульса тока микроразряда с увеличенным активным сопротивлением.

Осциллограмма, изображённая на рис. 40, имеет следующие параметры:

- коэффициент отклонения 110 мА/дел.;
- коэффициент развёртки 50 нс/дел.

При добавлении последовательно в цепь микроразряда активного сопротивления порядка кОм усилился аperiodический характер микроразряда. При этом по сравнению с микроразрядом с обычными параметрами (см. рис. 36), постоянная времени завершающей стадии микроразряда τ_3 увеличилась примерно в 2,5 раза: со 100 нс до 250 нс. Амплитуда тока микроразряда также уменьшилась примерно в 2 раза: с 350 мА до 200 мА.

На рисунке 41 изображена схема для получения осциллограммы тока микроразряда с изменённым параметром электрической цепи, а именно, с увеличенной индуктивностью. При этом ёмкость микроразряда была скомпенсирована добавочной ёмкостью.

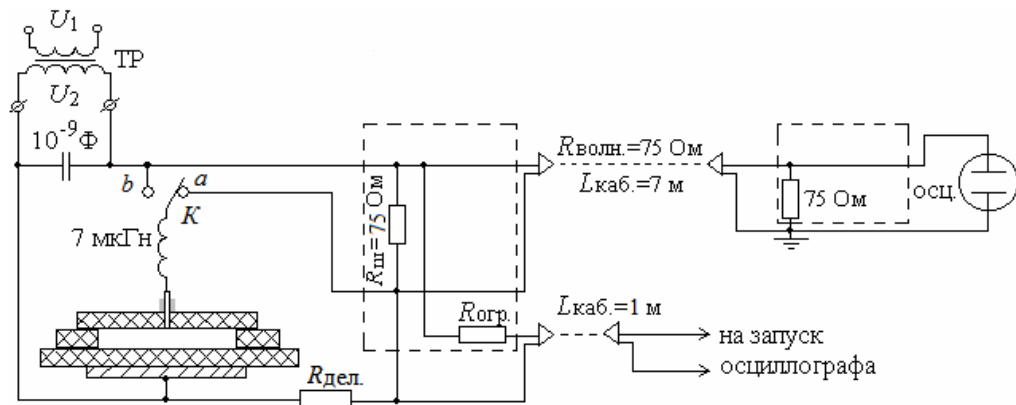


Рисунок 41 – Схема подключения к осциллографу камеры барьерного разряда с добавочной индуктивностью в цепи микроразряда и добавочной ёмкостью.

При напряжении на разрядной камере $U_{ист.} = 9$ кВ получена осциллограмма тока микроразряда с увеличенной индуктивностью (рисунок 42).

Осциллограмма, изображённая на рисунке 42, имеет следующие параметры:

- коэффициент отклонения 16,7 мА/дел.;
- коэффициент развёртки 50 нс/дел.;
- время разряда $T_p \approx 350$ нс.

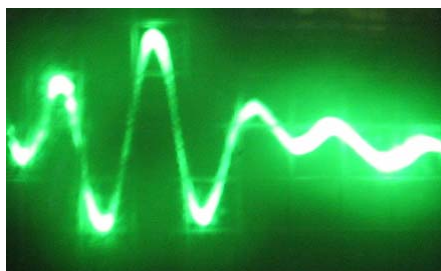
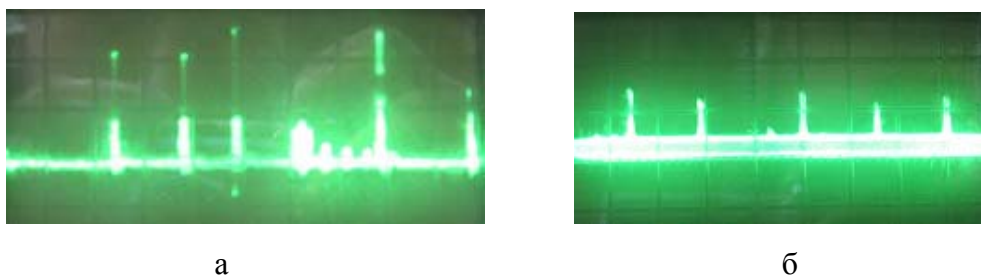


Рисунок 42 – Осциллограмма импульса тока микроразряда с увеличенной индуктивностью.

При добавлении последовательно в цепь микроразряда индуктивности характер микроразряда изменился с апериодического на колебательный. По сравнению с обычным микроразрядом (см. рис. 36) время разряда T_p увеличилось примерно в 7 раз, примерно в 10 раз уменьшилась амплитуда тока микроразряда.

Основными соотношениями, определяющими процесс микроразряда с увеличенной индуктивностью, являются соотношения (118) и (119).

При увеличении коэффициента развертки осциллографа до 5 мкс/дел были получены осциллограммы импульсов серий микроразрядов с обычными неизменными параметрами (рисунок 43, а) и с увеличенным активным сопротивлением цепи микроразряда (рисунок 43, б).



а

б

Рисунок 43 – Осциллограммы импульсов серий микроразрядов: а) с обычными параметрами; б) с увеличенным активным сопротивлением.

Осциллограммы, изображённые на рис. 43 (а, б), имеют следующие параметры:

- коэффициент отклонения 110 мА/дел.;
- коэффициент развёртки 5 мкс/дел.

При обычных параметрах цепи разряда среднее время между отдельными микроразрядами в серии равняется нескольким микросекундам и на порядок превышает длительность отдельных микроразрядов. Средний максимум тока в серии примерно 200 мА.

Для импульсов тока с увеличенным сопротивлением цепи разряда среднее время между отдельными микроразрядами в серии более пяти микросекунд и примерно в два раза больше, чем время между импульсами микроразрядов с обычными параметрами. Средний максимум тока в серии микроразрядов с увеличенным сопротивлением примерно 100 мА, что в два раза меньше, чем у микроразрядов с обычными параметрами.

На рисунке 44, а изображена осциллограмма тока нескольких микроразрядов с обычными (неизменными) параметрами цепи разряда:

- коэффициент отклонения 110 мА/дел.;
- коэффициент развёртки 5 мс/дел.



а



б

Рисунок 44 – Осциллограммы тока (а) и напряжения (б) нескольких серий микроразрядов.

Из осциллограммы (рис. 44, а) можно определить время между сериями микроразрядов примерно равное 5 мс; время отдельной серии также примерно равно 5 мс. Периодически возникающим импульсам тока серий микроразрядов (рис. 44, а) соответствует периодическое изменение напряжения на разрядной ячейке (рис. 44, б). Осциллограмма, изображённая на рис. 44, б, имеет следующие параметры:

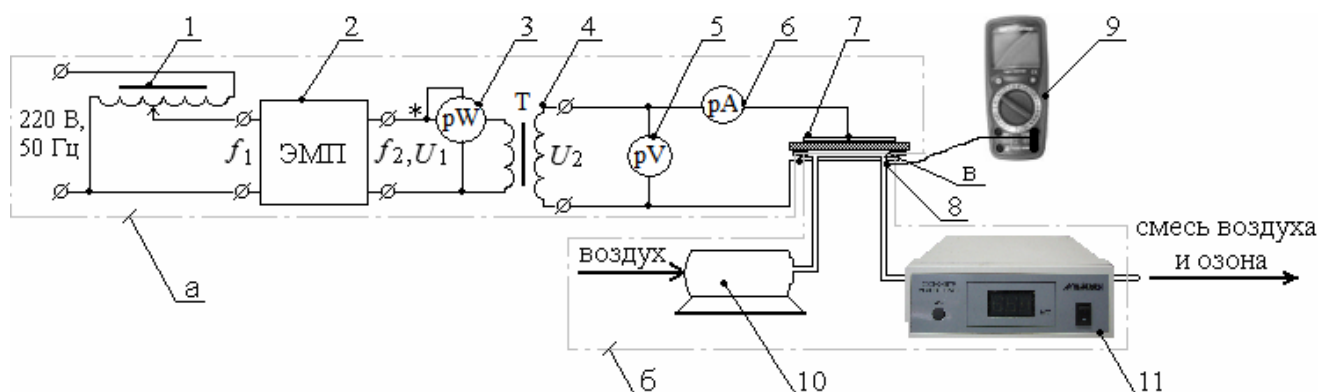
- коэффициент отклонения 10 кВ/дел.;
- коэффициент развёртки 5 мс/дел.

Характер изменения напряжения на рис. 44, б соответствует возникновению серии микроразрядов в каждом полупериоде питающего напряжения. Т.е. при постепенном нарастании и достижении определенного уровня напряжения возникает серия микроразрядов при $U_{ист.} = U_{г} = const$, что соответствует сравнительно длительному постоянному значению напряжения на осциллограмме рис. 44, б.

4.3 Экспериментальное исследование и сравнение электрических параметров, производительности и нагрева систем генерации озона с высокопроводящими и высокоомными электродами различных конструкций

4.3.1 Описание экспериментальной установки

Схема установки, на которой проводилось экспериментальное сравнение электрических параметров, производительности и нагрева систем генерации озона с высокопроводящими и высокоомными электродами различных конструкций, изображена на рисунке 45. При этом измерение концентрации озона и температуры озоносодержащего газа осуществлялось на выходе из разрядной озонаторной камеры.



1 – автотрансформатор; 2 – электромеханический преобразователь ($f_2 = 400$ Гц); 3 – ваттметр; 4 – однофазный трансформатор $U_{\text{нн}} = 100$ В, $U_{\text{вн}} = 10000$ В, $S = 640$ В·А; 5 – киловольтметр; 6 – миллиамперметр; 7 – разрядная озонаторная камера; 8 – термопара типа К; 9 – мультиметр; 10 – воздушный компрессор; 11 – озонметр.

Рисунок 45 - Установка для экспериментального исследования электрических параметров разряда в озонаторной камере и концентрации озона: а – электрическая часть, б – пневматическая часть, в – зона разряда.

В экспериментальной установке (рис. 45) используются приборы и оборудование для следующих целей:

- автотрансформатор тип АОСН-20-220-75 У4, для регулирования напряжения, подводимого к первичной обмотке повышающего трансформатора в диапазоне 0-240 В;

- электромеханический преобразователь частоты для повышения частоты напряжения до 400 Гц;
- ваттметр электродинамический тип Д50043, класс точности 0.5, предел шкалы измерения 150 Вт (при 1 Вт/дел) для измерения потребляемой активной мощности в цепи низкого напряжения;
- однофазный трансформатор тип НОМ-10, $S = 640$ ВА, $U_{\text{нн}} = 100$ В, $U_{\text{вн}} = 10000$ В для получения напряжения, достаточного для осуществления барьерного разряда;
- киловольтметр электростатический тип С196, класс точности 1.0, предел измерения 15 кВ, цена деления 0.2 кВ для измерения действующего значения электрического напряжения, приложенного к электродам разрядной озонаторной камеры;
- миллиамперметр тип Ц423021, класс точности 2.5, предел измерения 10 мА, цена деления 0,4 мА, госреестр № 37284-08 для измерения среднего значения тока, протекающего через разрядную озонаторную камеру;
- цифровой мультиметр тип DT-9908, госреестр № 58550-14 для контроля температуры на выходе из разрядной озонаторной камеры, измеряемой посредством термопары типа K в начале патрубка, отходящего от озонаторной камеры;
- воздушный компрессор тип AP-9800, производительность 1,6 л/мин, давление 0,012 МПа для прокачки озонобразующего воздуха через разрядную камеру;
- цифровой озонометр тип «Медозон-254/5а», диапазон измерения 2,0-150,0 г/м³, госреестр № 43416-09 для измерения концентрации озона в озоносодержащем газе на выходе из озонаторной камеры;
- цифровой мультиметр/осциллограф UT81A для измерения частоты напряжения на разрядной камере с целью её поддержания на уровне $f_2 = 400 \pm 5$ Гц.

Экспериментальная установка (рис. 45) работает следующим образом. К барьерному озонатору проточно-вытяжной конструкции 7 от повышающего однофазного трансформатора 4 подается напряжение с частотой $f_2 = 400$ Гц. Амплитуда напряжения регулируется с помощью автотрансформатора 1, частота

– с помощью электромеханического преобразователя частоты 2. Потребляемая активная мощность измеряется с помощью ваттметра 3. Для определения значений напряжения и тока разрядной озонаторной камеры используются киловольтметр 5 и миллиамперметр 6. Воздух в разрядную озонаторную камеру подаётся от воздушного компрессора 10 со скоростью 1,6 л/мин. Температура газа на выходе из озонаторной камеры измеряется с помощью термопары (типа К) 8, подключенной к цифровому мультиметру 9. Концентрация озона в озонозодушной смеси на выходе из озонаторной камеры измеряется с помощью цифрового озонометра 11.

В данных экспериментальных исследованиях с целью определения энергоэффективности систем генерации озона проводилось измерение потребляемой активной мощности в цепи низкого напряжения с помощью ваттметра 3 (рис. 45). Чтобы определить активную мощность, рассеиваемую непосредственно в разрядной камере, необходимо из значения мощности, измеряемой ваттметром, вычесть значение потерь активной мощности в трансформаторе при соответствующем уровне напряжения. В связи с тем, что электрический ток, протекающий по обмоткам трансформатора во время экспериментов, гораздо меньше номинальных значений, то потери активной мощности трансформатора соответствуют потерям в магнитопроводе трансформатора. Эти потери определены в результате измерения потребляемой трансформатором мощности в режиме холостого хода в зависимости от действующего значения высшего напряжения трансформатора (таблица 7).

Таблица 7 – Потери мощности в магнитопроводе трансформатора.

U_2 , кВ	4,6	7,0	8,0	9,0	9,6	10,6
$P_{x.x.}$, Вт	2,0	4,0	6,0	8,0	10	12

Таким образом, активная мощность P_{O_3} , рассеиваемая в разрядной озонаторной камере, будет меньше значения мощности P_W , измеряемого ваттметром, на значение активной мощности $P_{x.x.}$ потерь в магнитопроводе трансформатора в соответствии с выражением:

$$P_{O_3} = P_W - P_{x.x.} \quad (123)$$

4.3.2 Экспериментальное исследование и сравнение систем генерации озона в барьерном разряде со сплошными плоскопараллельными электродами

В таблице 8 представлены экспериментальные данные исследования разрядной камеры с высокопроводящими электродами из алюминия (см. рис. 32, а).

Таблица 8 – Результаты экспериментального исследования разрядной озонаторной камеры с высокопроводящим электродом ($R_{эл.} \approx 0,1 \text{ Ом}$).

U_2 , кВ	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	8,4	9,0	9,6	10,0
$I_{ср.}$, мА	0,4	0,8	1,2	1,2	-	1,6	2,0	-	2,4	3,2	3,6	4,0
P_W , Вт	0,2	0,4	0,8	1,8	3,2	4,2	5,8	7,4	8	10	14	20
P_{O_3} , Вт	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0	2,0	4,0	7,0
x_{O_3} , мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,0	4,0	6,0

В таблицах 9-11 представлены экспериментальные данные разрядной камеры с электродами, изготовленными на основе смеси мелкодисперсных порошков сажи и графита и имеющими повышенное активное сопротивление (см. рис. 32, б).

Таблица 9 – Результаты экспериментального исследования разрядной озонаторной камеры с поверхностным сопротивлением электрода $R_{эл.} = 2,5 \text{ кОм}$.

U_2 , кВ	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	8,4	9,0	9,6	10,0
$I_{ср.}$, мА	0,4	0,8	1,2	-	1,6	2,0	2,4	2,8	2,8	3,6	4,0	4,4
P_W , Вт	0,2	0,4	0,8	1,6	2,8	4,0	5,4	6,6	7,8	11	14	20
P_{O_3} , Вт	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0	3,0	4,0	9,0
x_{O_3} , мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,0	3,0	5,0

Таблица 10 – Результаты экспериментального исследования разрядной озонаторной камеры с поверхностным сопротивлением электрода $R_{эл.} = 6,5 \text{ кОм}$.

U_2 , кВ	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	8,4	9,0	9,6	10,0
$I_{ср.}$, мА	0,4	0,8	1,2	-	1,6	-	2,0	2,4	2,8	3,2	4,0	4,4
P_W , Вт	0,2	0,4	1,0	2,0	3,2	4,4	6,0	7,4	10	12	17	25
P_{O_3} , Вт	-	-	-	-	1,2	1,4	2	1,4	3,0	4,0	7,0	15
x_{O_3} , мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,0	2,5	5,5	9,0

Таблица 11 – Результаты экспериментального исследования разрядной озонаторной камеры с поверхностным сопротивлением электрода $R_{эл.} = 25$ кОм.

U_2 , кВ	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	8,4	9,0	9,6	10,0
$I_{ср.}$, мА	0,4	0,8	1,2	1,2	-	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0
P_W , Вт	0,2	0,4	0,6	1,2	2,2	3,6	5,0	6,4	7,2	10	12	14
P_{O_3} , Вт	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	2,0	3,0
x_{O_3} , мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,0

По результатам экспериментальных данных, представленных в таблицах 8-11, построены зависимости среднего тока через разрядную озонаторную камеру от действующего значения напряжения на разрядной камере $I_{ср.}(U_2)$ (рисунок 46) при различных значениях поверхностного сопротивления электродов озонаторной камеры со сплошными плоскопараллельными электродами.

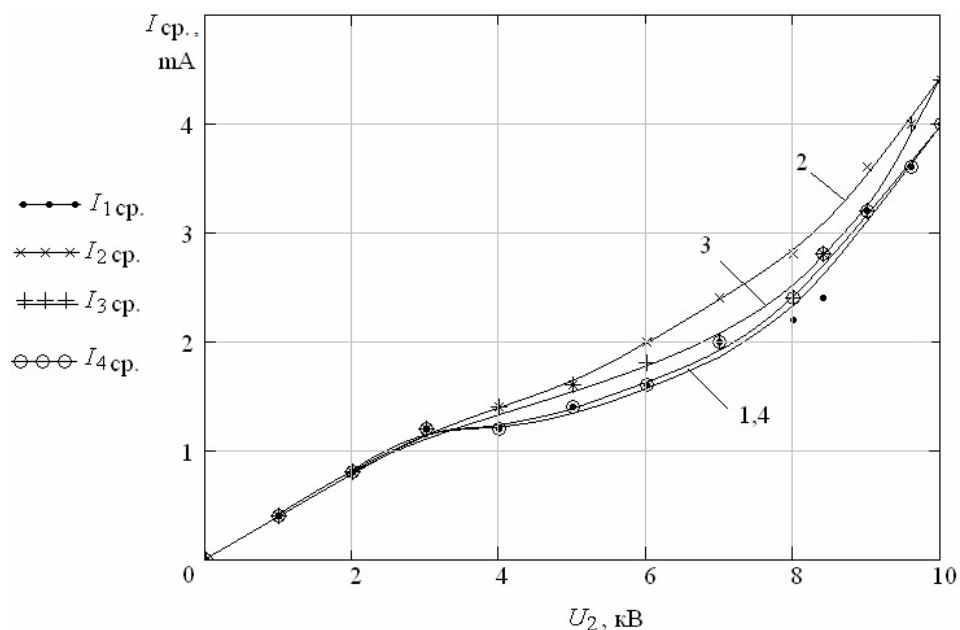


Рисунок 46 – Вольтамперные характеристики разрядных камер со сплошными плоскопараллельными электродами: 1 – при $R_{эл.} \approx 0,1$ Ом; 2 – при $R_{эл.} = 2,5$ кОм; 3 – при $R_{эл.} = 6,5$ кОм; 4 – при $R_{эл.} = 25$ кОм.

Вольтамперные характеристики (рис. 46) разрядных камер с плоскопараллельными электродами, имеющими различное сопротивление, практически совпадают. При этом при поверхностном сопротивлении электрода

$R_{эл.} = 2,5$ кОм наблюдается наименьшее значение напряжения горения барьерного разряда (см. стр. 24).

На рисунке 47 представлены графики зависимости концентрации озона на выходе из озонаторной камеры со сплошными плоскопараллельными электродами от действующего значения напряжения на разрядной камере при различных сопротивлениях электродов. Максимальное значение измеряемого напряжения ограничено значением 10 кВ. Минимальное значение измеряемой концентрации озона ограничено нижним пределом диапазона измерения $2,0$ г/м³.

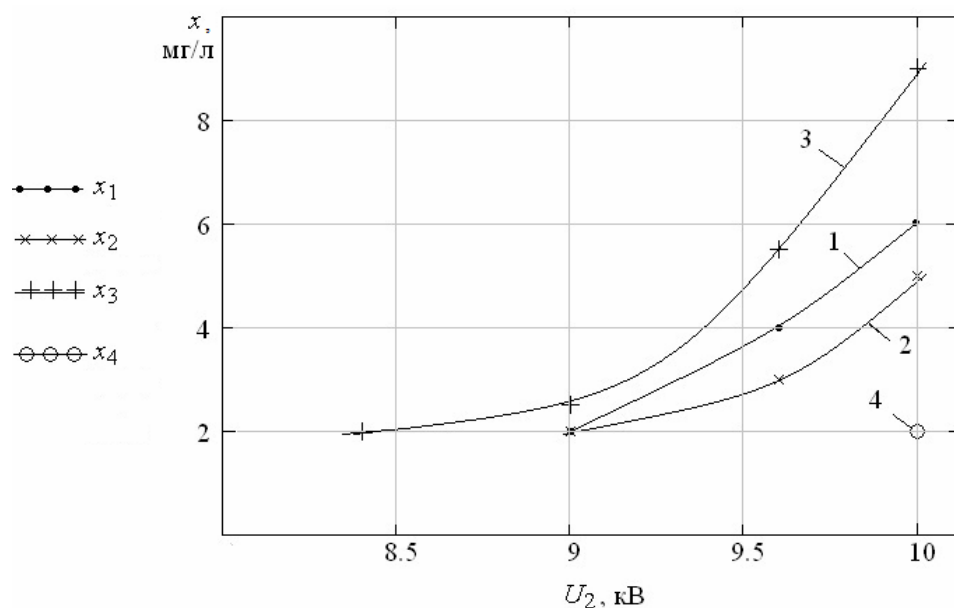


Рисунок 47 – Зависимости концентрации озона на выходе из озонаторной камеры от действующего значения напряжения на сплошных плоскопараллельных электродах камеры:

1 – $x_{1O_3} = f(U_2)$ при $R_{эл.} \approx 0,1$ Ом; 2 – $x_{2O_3} = f(U_2)$ при $R_{эл.} = 2,5$ кОм; 3 – $x_{3O_3} = f(U_2)$ при $R_{эл.} = 6,5$ кОм; 4 – $x_{4O_3} = f(U_2)$ при $R_{эл.} = 25$ кОм.

Из зависимостей рис. 47 видно, что с увеличением напряжения производительность повышается. При этом существует оптимальное поверхностное сопротивление электродов разрядной озонаторной камеры $R_{эл.} = 6,5$ кОм (кривая 3 на рис. 47), при котором наблюдается максимальная концентрация озона на выходе в сравнении озонаторных камер при определенном уровне напряжения.

4.3.3 Экспериментальное исследование и сравнение систем генерации озона в барьерном разряде с секционированным электродом

В таблице 12 представлены результаты экспериментального исследования разрядной камеры с секционированным электродом (см. рис. 33) с обычными параметрами цепи разряда без дополнительно подключенных сопротивлений. Охлаждение принудительное воздушное. Таким образом, экспериментальные данные фиксировались при тепловом режиме, обладающем малой инерционностью и малым временем выхода на установившийся тепловой режим при изменении мощности разряда.

Таблица 12 – Результаты экспериментального исследования разрядной озонаторной камеры без добавочных сопротивлений ($R_{доб.} = 0$).

U_2 , кВ	0,6	1,0	2,0	3,0	3,4	4,0	4,6	5,0	5,4	6,0	6,4	7,0
$I_{ср.}$, мА	0,4	1,2	2,0	2,0	2,8	3,6	4,8	6,0	7,2	8,0	9,2	10,0
P_W , Вт	-	-	2,0	4,0	6,0	12	18	24	34	40	50	60
P_{O_3} , Вт	-	-	2,0	3,0	5,0	11	16	22	31	37	46	56
x_{O_3} , мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,5	4,0	5,2	5,9	6,4	6,8	6,9
ΔT , °С	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2

В таблицах 13-16 представлены результаты экспериментального исследования разрядной озонаторной камеры с секционированным электродом с добавочными сопротивлениями, подключенными последовательно к каждому из элементов секционированного электрода (см. рис. 33). Охлаждение принудительное воздушное.

Таблица 13 – Результаты экспериментального исследования разрядной озонаторной камеры с добавочными сопротивлениями $R_{доб.} = 1,47$ кОм.

U_2 , кВ	0,6	1,0	2,0	3,0	3,4	4,0	4,6	5,0	5,4	6,0	6,4	7,0
$I_{ср.}$, мА	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	3,6	4,8	5,6	6,8	7,6	8,4	9,2
P_W , Вт	-	-	-	2,0	4,0	10	14	22	28	34	42	50
P_{O_3} , Вт	-	-	-	1,0	3,0	8,0	10	20	25	31	38	46
x_{O_3} , мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,8	4,5	5,8	6,8	7,3	7,7	7,9
ΔT , °С	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1

Таблица 14 – Результаты экспериментального исследования разрядной озонаторной камеры с добавочными сопротивлениями $R_{доб.} = 3,0$ кОм.

U_2 , кВ	0,6	1,0	2,0	3,0	3,4	4,0	4,6	5,0	5,4	6,0	6,4	7,0
$I_{ср.}$, мА	0,8	0,8	2,0	2,0	2,4	3,2	4,4	5,6	6,8	7,6	8,4	9,2
P_W , Вт	-	-	-	2,0	4,0	8,0	14	22	30	34	40	50
P_{O_3} , Вт	-	-	-	1,0	3,0	6,0	12	20	27	31	36	46
x_{O_3} , мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,6	4,5	6,3	7,5	8,0	8,2	8,3
ΔT , °С	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1

Таблица 15 – Результаты экспериментального исследования разрядной озонаторной камеры с добавочными сопротивлениями $R_{доб.} = 6,0$ кОм.

U_2 , кВ	0,6	1,0	2,0	3,0	3,4	4,0	4,6	5,0	5,4	6,0	6,4	7,0
$I_{ср.}$, мА	0,4	0,8	2,0	2,0	2,4	3,2	4,4	5,6	6,8	7,6	8,4	9,6
P_W , Вт	-	-	-	2,0	4,0	8,0	14	22	30	36	44	52
P_{O_3} , Вт	-	-	-	1,0	3,0	6,0	12	20	27	33	40	48
x_{O_3} , мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,6	4,5	6,4	7,4	7,8	8,0	8,0
ΔT , °С	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 16 – Результаты экспериментального исследования разрядной озонаторной камеры с добавочными сопротивлениями $R_{доб.} = 12$ кОм.

U_2 , кВ	0,6	1,0	2,0	3,0	3,4	4,0	4,6	5,0	5,4	6,0	6,4	7,0
$I_{ср.}$, мА	0,8	1,2	2,0	2,0	2,4	3,2	4,4	5,6	6,8	7,6	8,4	9,6
P_W , Вт	-	-	-	2,0	4,0	8,0	14	22	30	36	42	52
P_{O_3} , Вт	-	-	-	1,0	3,0	6,0	12	20	27	33	38	48
x_{O_3} , мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,3	4,2	5,9	6,8	7,4	7,7	7,8
ΔT , °С	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1

По результатам экспериментальных данных, представленных в таблицах 12-16, построены зависимости среднего тока через разрядную озонаторную камеру от действующего значения напряжения на разрядной камере $I_{ср.}(U_2)$ (рисунок 48) при различных значениях добавочного сопротивления.

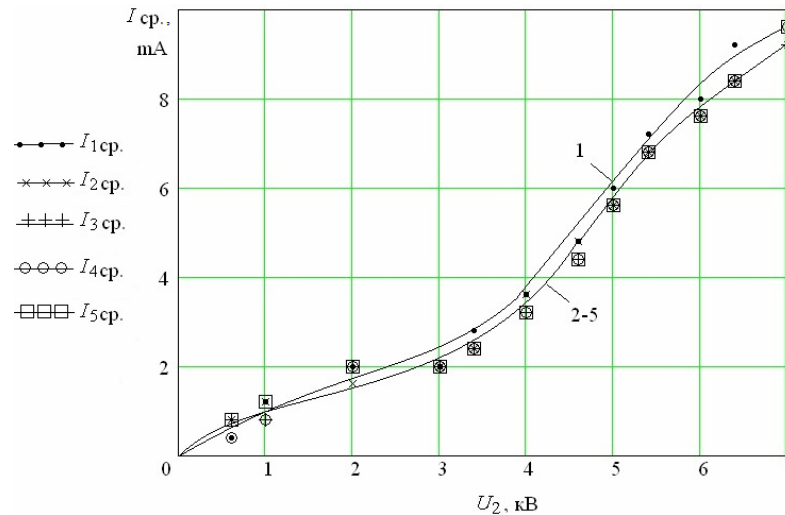


Рисунок 48 – Вольтамперные характеристики разрядной камеры с секционированным электродом: 1 – при $R_{доб.} = 0$; 2 – при $R_{доб.} = 1,47$ кОм; 3 – при $R_{доб.} = 3,0$ кОм; 4 – при $R_{доб.} = 6,0$ кОм; 5 – при $R_{доб.} = 12$ кОм.

Из рисунка 48 видно, что вольтамперные характеристики разрядной озонаторной камеры с секционированным электродом в зависимости от добавочного сопротивления практически совпадают.

На рисунке 49 представлены построенные зависимости концентрации озона на выходе из разрядной озонаторной камеры с секционированным электродом от значения добавочного сопротивления $R_{доб.}$ для установившегося режима работы при различных рабочих напряжениях между электродами разрядной озонаторной камеры.

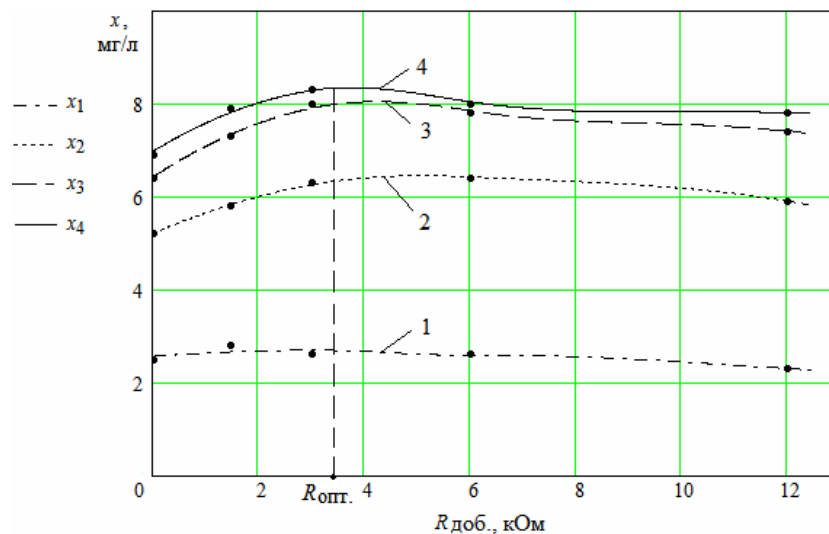


Рисунок 49 – Зависимости концентрации озона на выходе из озонаторной камеры с секционированным электродом от добавочного сопротивления: 1 – при $U_2 = 4,0$ кВ, 2 – при $U_2 = 5,0$ кВ, 3 – при $U_2 = 6,0$ кВ, 4 – при $U_2 = 7,0$ кВ.

Наблюдается оптимальное значение добавочного сопротивления $R_{\text{опт.}}$, включаемого последовательно к элементам секционированного электрода разрядной озонаторной камеры, при котором концентрация озона на выходе из озонаторной камеры максимальна при данном уровне напряжения. Такое значение добавочного сопротивления находится в области значений 2 – 4 кОм.

На рисунке 50 изображены зависимости концентрации озона от фактора P/ν для исследуемых конструкций разрядных озонаторных камер с секционированным электродом с различным добавочным сопротивлением, включаемым в цепь электродов. Значение скорости потока воздуха $\nu \approx 100$ л/час.

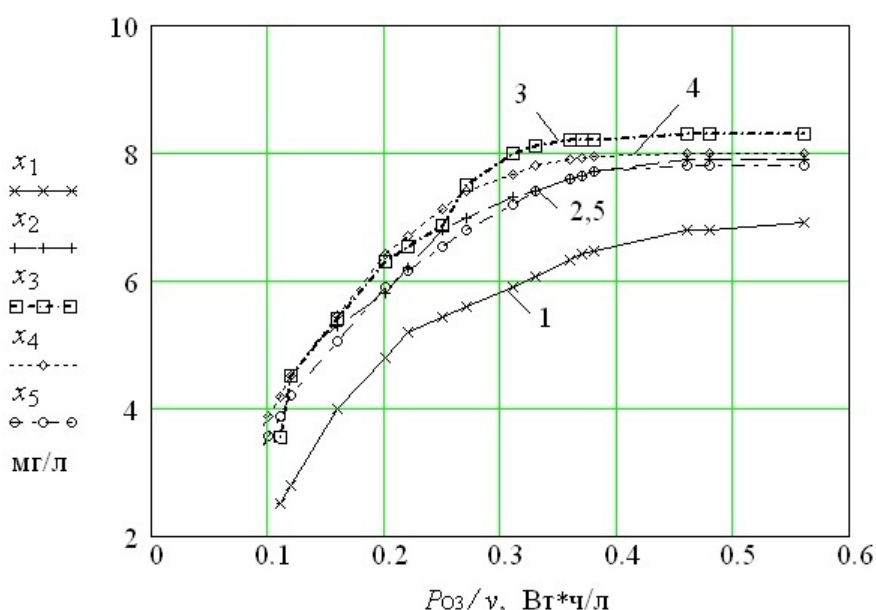


Рисунок 50 – Зависимость концентрации озона от удельной энергии P/ν : 1 – при $R_{\text{доб.}} = 0$; 2 – при $R_{\text{доб.}} = 1,47$ кОм; 3 – при $R_{\text{доб.}} = 3,0$ кОм, 4 – при $R_{\text{доб.}} = 6,0$ кОм, 5 – при $R_{\text{доб.}} = 12$ кОм.

Величина $P_{\text{оз}}/\nu$, Вт*ч/л, называемая удельной энергией, хорошо характеризует зависимость концентрации озона от мощности разряда при не очень больших значениях активной мощности и входит наряду с энергетическими константами образования k_0 и разложения k_1 озона в кинетическое уравнение (1) образования озона в барьерном разряде (см. стр. 30).

При малых значениях активной мощности значение энергетической константы разложения озона k_1 мало и $k_1 P/\nu \ll 1$; тогда концентрация озона $x_{\text{O}_3} = k_0 [x_{\text{O}_2}]_0 P/\nu$ [45, с. 102], откуда можно найти энергетическую константу образования озона k_0 по формуле (124):

$$k_0 = \frac{x_{O_3} \nu}{[x_{O_2}]_0 P_{O_3}}, \text{ л/Вт}\cdot\text{ч}, \quad (124)$$

где $[x_{O_2}]_0 = 283,6$ мг/л – начальная концентрация кислорода в воздухе на входе разрядной озонаторной камеры.

Так как формула (124) справедлива при небольших значениях фактора P/ν , определим значения константы образования озона k_0 для разрядных озонаторных камер с секционированным электродом с различным добавочным сопротивлением при значении $P_{O_3}/\nu = 0,11$ Вт·ч/л.

Значение константы k_1 находится при известных значениях константы k_0 и равновесной концентрации озона $x_p = k_0[x_{O_2}]_0/k_1$ по формуле (125):

$$k_1 = \frac{k_0[x_{O_2}]_0}{x_p}, \text{ л/Вт}\cdot\text{ч}. \quad (125)$$

Значения равновесной концентрации озона x_p , мг/л, для систем генерации озона с различным значением добавочного сопротивления, подключаемого к элементам секционированного электрода разрядной озонаторной камеры, а также значения констант k_0 и k_1 для значений концентрации озона, не превышающих равновесной концентрации, представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Значения x_p , k_1 и k_0 при $x_{O_3} < x_p$ для разрядных камер с секционированным электродом при различных значениях добавочного сопротивления.

$R_{\text{доб.}}$, кОм	0	1,47	3,0	6,0	12
x_p , мг/л	6,9	7,9	8,3	8,0	7,8
k_0 , л/Вт·ч	0,08	0,15	0,13	0,13	0,12
k_1 , л/Вт·ч	3,29	5,33	4,60	4,77	4,55

Значения вычисленных констант, представленные в табл. 16, получены для значения фактора удельной энергии $P_{O_3}/\nu = 0,11$ Вт·ч/л. При больших значениях фактора удельной энергии определение энергетических констант образования озона k_0 и разложения озона k_1 по формулам (124) и (125) будет менее справедливо, т.к. эти формулы имеют указанное выше ограниченное применение. Поэтому более полное представление дает рассмотрение и анализ графических

зависимостей $x_{\text{O}_3} = f(P_{\text{O}_3}/v)$ (см. рис. 50) наряду с анализом вычисленных значений констант (см. табл. 17).

Полученные последние результаты при совместном рассмотрении с результатами, изложенными ранее в данной диссертации, можно интерпретировать следующим образом:

1) увеличение активного сопротивления цепи микроразряда приводит к протеканию микроразряда в усиленном апериодическом режиме с большей длительностью электрического импульса при меньшей амплитуде (см. стр. 90);

2) длительности отдельных микроразрядов с ростом сопротивления увеличиваются, при этом повышается однородность распределения во времени импульсов нескольких микроразрядов (см. стр. 92);

3) повышение однородности протекания микроразрядов приводит к увеличению энергетических констант как образования, так и разложения озона (см. табл. 17), что вызвано ростом интенсивности электроразрядного процесса, при этом эффект от увеличения образующегося озона преобладает над эффектом, вызванным ростом температуры и приводящим к разложению озона (см. рис. 50).

На рисунке 51 изображены зависимости показателя энергоэффективности синтеза озона X_{O_3} , г/кВт·ч от напряжения на озонаторе при различных значениях сопротивления $R_{\text{доб}}$ резисторов, подключаемых к секционированному электроду разрядной озонаторной камеры.

Значение показателя энергоэффективности синтеза озона X_{O_3} , г/кВт·ч получено в результате деления значения концентрации озона на выходе из разрядной камеры к значению потребляемой активной мощности в соответствии с выражением (126):

$$X_{\text{O}_3} = x_{\text{O}_3}v/P_{\text{O}_3} = 100 \cdot x_{\text{O}_3}/P_{\text{O}_3}, \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}. \quad (126)$$

Из рисунка 51 видно, что с ростом добавочного сопротивления, подключаемого к элементу секционированного электрода камеры барьерного разряда, увеличивается энергоэффективность электросинтеза озона. Также при увеличении активного добавочного сопротивления происходит сдвигание

максимума энергоэффективности синтеза озона в область более низких напряжений.

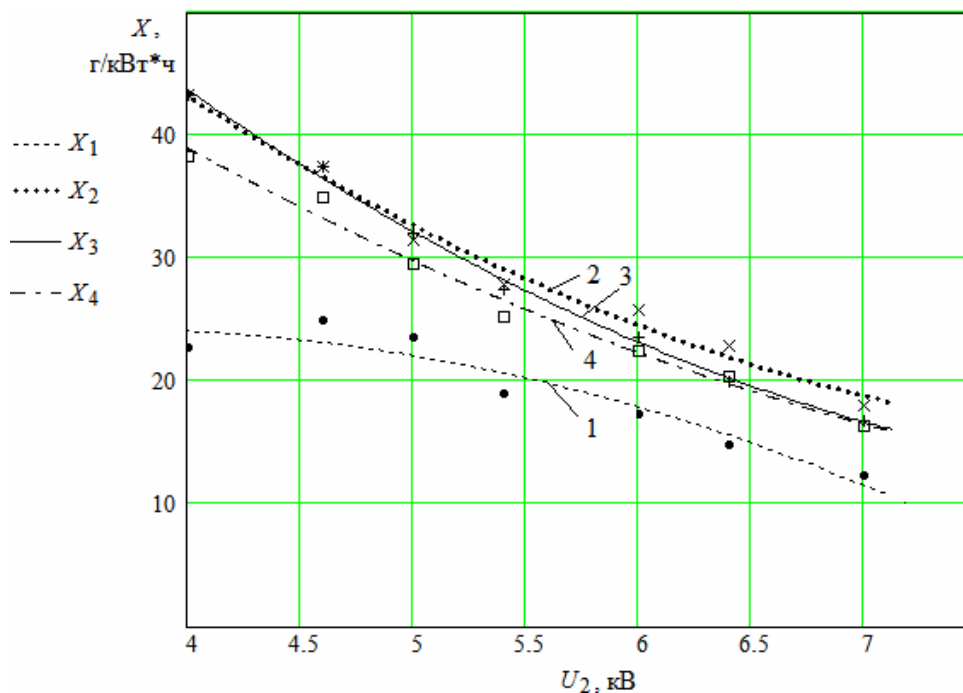


Рисунок 51 – Зависимости показателя энергоэффективности синтеза озона от напряжения:

1 – при $R_{доб.} = 0$; 2 – при $R_{доб.} = 3,0$ кОм, 3 – при $R_{доб.} = 6,0$ кОм, 4 – при $R_{доб.} = 12$ кОм.

Максимальная энергоэффективность наблюдается при значении добавочных сопротивлений порядка $R_{доб.} = 1 - 10$ кОм. При этом при значении добавочных сопротивлений $R_{доб.} = 3 - 6$ кОм максимум энергоэффективности проявляется при наименьшем уровне напряжения на разрядной камере.

Следующая группа сравнительных экспериментов для разрядной камеры с секционированным электродом с различным добавочным сопротивлением проводилась при отсутствии принудительного охлаждения. Таким образом уровень установившейся температуры был более значительным, что удобно для проведения экспериментального сравнения.

В таблице 18 представлены результаты экспериментального исследования разрядной камеры с секционированным электродом с обычными параметрами цепи разряда без дополнительно подключенных сопротивлений. Охлаждение естественное воздушное.

Таблица 18 – Результаты экспериментального исследования разрядной озонаторной камеры без добавочных сопротивлений, $R_{доб.} = 0$.

U_2 , кВ	2,4	3,0	3,6	4,0	4,6	5,0	5,6	6,0	6,4
$I_{ср.}$, мА	2,0	2,0	2,2	3,2	4,4	6,8	8,0	8,8	9,6
P_W , Вт	1,0	2,0	4,0	9,0	20	35	51	57	67
P_{O_3} , Вт	1,0	1,0	3,0	7,0	18	33	48	54	63
x_{O_3} , г/м ³	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,2	2,6	2,9	3,1
ΔT , °С	0	0	0	0	0	1	2	4	5

В таблицах 19-21 представлены результаты экспериментального исследования разрядной озонаторной камеры с секционированным электродом с добавочными сопротивлениями, подключенными последовательно к каждому из элементов секционированного электрода. Охлаждение естественное воздушное.

Таблица 19 – Результаты экспериментального исследования разрядной озонаторной камеры с добавочными сопротивлениями $R_{доб.} = 12$ кОм.

U_2 , кВ	2,4	3,0	3,6	4,0	4,6	5,0	5,6	6,0	6,4
$I_{ср.}$, мА	2,0	2,0	2,2	3,2	4,4	6,0	7,6	8,8	10,0
P_W , Вт	1,0	2,0	4,0	9,0	18	30	44	58	70
P_{O_3} , Вт	1,0	1,0	3,0	7,0	16	28	41	55	66
x_{O_3} , г/м ³	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,0	2,6	3,0	3,3
ΔT , °С	0	0	0	0	0	0	1	2	3

Таблица 20 – Результаты экспериментального исследования разрядной озонаторной камеры с добавочными сопротивлениями $R_{доб.} = 24$ кОм.

U_2 , кВ	2,4	3,0	3,6	4,0	4,6	5,0	5,6	6,0	6,4
$I_{ср.}$, мА	2,0	2,0	2,4	3,2	5,2	6,8	8,0	8,8	10,0
P_W , Вт	1,0	2,0	4,0	9,0	20	35	47	58	68
P_{O_3} , Вт	1,0	1,0	3,0	7,0	18	33	44	55	64
x_{O_3} , г/м ³	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,1	2,5	2,8	3,0
ΔT , °С	0	0	0	0	1	2	3	4	5

Таблица 21 – Результаты экспериментального исследования разрядной озонаторной камеры с добавочными сопротивлениями $R_{доб.} = 6$ кОм.

$I_{ср.}$, мА	5,2	8,0	9,2	10
ΔT , °С	0	2	3	4,5

Примечание: дополнительный эксперимент для уточнения температурных зависимостей электросинтеза озона от сопротивления электродов, температура измерялась цифровым мультиметром DT-838 с термопарой типа К.

В процессе экспериментов измерялась температура окружающей среды T_0 и температура озоносодержащего газа на выходе из разрядной озонаторной камеры $T_{\text{вых}}$. Нагрев газа в результате протекания разряда оценивался по разнице температур озоносодержащего газа и окружающей среды:

$$\Delta T = T_{\text{вых}} - T_0. \quad (127)$$

На рисунке 52 представлена зависимость нагрева озоносодержащего газа на выходе из разрядной озонаторной камеры с секционированным электродом от протекающего тока при различных значениях добавочного сопротивления, включаемого последовательно с элементом секционированного электрода. Измерения проводились при установившемся тепловом режиме.

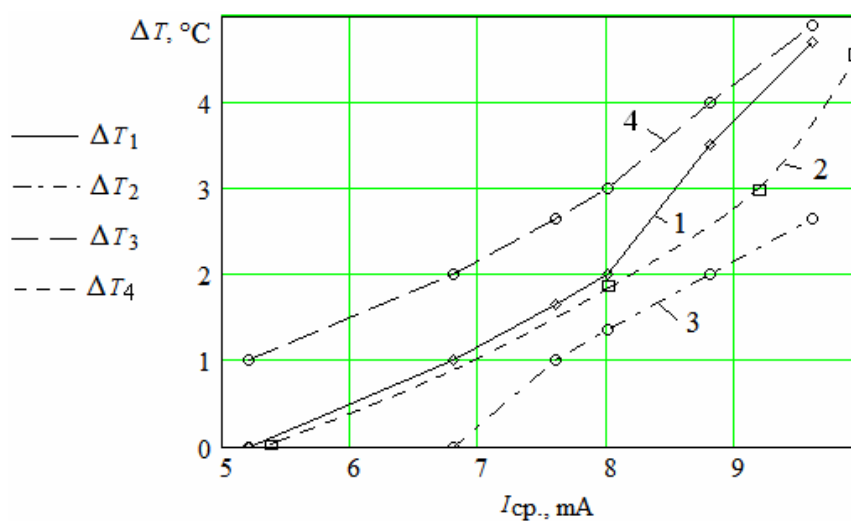


Рисунок 52 – Зависимость нагрева озоносодержащего газа от среднего тока через разрядную озонаторную камеру при различных добавочных сопротивлениях: 1 – $T = f(I_{\text{ср.}})$ при $R_{\text{доб.}} = 0$, 2 – $T = f(I_{\text{ср.}})$ при $R_{\text{доб.}} = 6$ кОм, 3 – $T = f(I_{\text{ср.}})$ при $R_{\text{доб.}} = 12$ кОм, 4 – $T = f(I_{\text{ср.}})$ при $R_{\text{доб.}} = 24$ кОм.

Из рис. 52 видно, что при значении добавочного сопротивления $R_{\text{доб.}} = 12$ кОм, подключаемого к элементам секционированного электрода озонаторной камеры с секционированным электродом, тепловой эффект от протекающего через разрядную камеру тока меньше. Это можно объяснить уменьшением амплитуды импульсов тока отдельных микрозарядов, а также

серий микроразрядов (см. стр. 77, 90, 92). При этом происходит перераспределение во времени переносимого микроразрядом заряда за счет увеличения времени процесса заряда микроразряда на второй стадии развития микроразряда, а также перераспределение тепловыделения между сопротивлением канала микроразряда и добавочным сопротивлением, включенным в цепь микроразряда, в соответствии с законами теории электрических цепей, что было рассмотрено во второй главе данной диссертации.

4.3.4 Определение влияния колебаний влажности воздуха на результаты экспериментов

Чтобы определить степень влияния на проводимые эксперименты такого фактора, как колебание влажности озonoобразующего газа, были проведены дополнительные исследования. С помощью экспериментальной установки (рисунок 53) проведено исследование влияния колебаний относительной влажности воздуха (от 40% до 57%) на электроэнергетические параметры систем генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами (вольтамперная характеристика, потребляемая мощность).

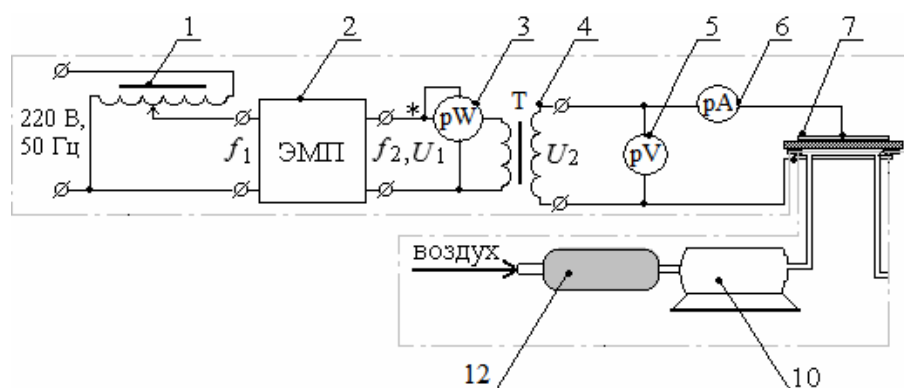


Рисунок 53 – Экспериментальная установка для исследования влияния колебаний влажности на электроэнергетические характеристики систем генерации озона в барьерном разряде: 1 – автотрансформатор; 2 – электромеханический преобразователь ($f_2 = 400$ Гц); 3 – ваттметр; 4 – однофазный трансформатор $U_{нн} = 100$ В, $U_{вн} = 10000$ В, $S = 640$ В·А; 5 – киловольтметр; 6 – миллиамперметр; 7 – разрядная озонаторная камера; 10 – воздушный компрессор; 12 – блок осушки воздуха.

Экспериментальная установка, представленная на рис. 53, отличается от используемой ранее (см. рис. 45) тем, что содержит блок осушки воздуха (12 на рис. 53), представляющий собой проточно-вытяжную камеру, заполненную гранулами силикагеля. Диаметр гранул силикагеля (2-3 мм) является достаточно большим для практически беспрепятственного прохождения воздуха через блок осушки.

Также, в отличие от ранее используемой экспериментальной установки, для измерения мощности использовался цифровой измеритель мощности ЩВ72.1 (Госреестр № 64916-16), позволяющий проводить измерения потребляемой активной и реактивной мощности (от 8 Вт/ 8 ВАр).

При проведении данных сравнительных экспериментов использовалась разрядная камера (7 на рис. 53), имеющая конструкцию с секционированным электродом (см. рис. 47).

В таблице 22 представлены сведения о зависимостях среднего тока от напряжения в разрядной камере с осушкой и без осушки при различном добавочном сопротивлении, подключенном последовательно к каждому из элементов секционированного электрода.

Таблица 22 – Зависимость тока от напряжения на разрядной камере при различном добавочном сопротивлении.

U , кВ		$I_{\text{ср.}}$, мА												
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
$R_{\text{Л}}=0$	ос.	0,8	1,2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,8	4,0	5,6	6,8	8,0	8,8	9,6
	б/о*	0,8	1,2	1,6	1,6	1,6	2,0	2,4	3,2	5,2	6,8	7,6	8,4	9,2
1,47 кОм	ос.	0,8	1,2	1,6	2,0	2,0	2,0	2,8	4,0	5,2	7,2	8,0	8,8	9,6
	б/о	0,8	1,2	1,6	2,0	2,0	2,0	2,8	4,4	5,6	7,4	8,0	8,8	9,6
3 кОм	ос.	0,8	1,2	1,6	2,0	2,0	2,0	2,8	4,0	5,6	6,8	8,0	8,8	9,6
	б/о	0,8	1,2	1,6	2,0	2,0	2,0	2,8	4,0	5,6	7,2	8,0	8,8	10,0
6 кОм	ос.	0,8	1,2	1,6	2,0	2,0	2,0	2,8	4,0	5,2	7,2	8,0	8,8	9,6
	б/о	0,8	1,2	1,6	2,0	2,0	2,0	2,8	4,0	5,2	6,8	8,0	8,8	9,6
12 кОм	ос.	0,8	1,2	1,6	1,6	1,8	2,0	2,4	3,6	4,8	6,8	7,6	8,4	9,2
	б/о	0,8	1,2	1,6	1,6	1,6	2,0	2,4	3,2	5,2	6,4	7,6	8,4	9,2

Примечания

1 Значения измерены при осушке воздуха (ос.) и без осушки воздуха (б/о).

2 При проведении эксперимента б/о при $R_d = 0$ (*) относительная влажность воздуха 50 %.

По данным таблицы 22 оценим среднее значение колебания измеренного среднего тока в разрядной камере в результате изменения влажности озонобразующего воздуха.

Среднее относительное колебание измеренного тока δ_{I_0} , %, при отсутствии добавочного сопротивления ($R_d = 0$):

$$\delta_{I_0} = \frac{1}{13} \left(\frac{0,8-0,8}{0,8} + \frac{1,2-1,2}{1,2} + \frac{2-1,6}{1,6} + \frac{2-1,6}{1,6} + \frac{2-1,6}{1,6} + \frac{2-2}{2} + \frac{2,8-2,4}{2,4} + \frac{4-3,2}{3,2} + \frac{5,6-5,2}{5,2} + \frac{6,8-6,8}{6,8} + \frac{8-7,6}{7,6} + \frac{8,8-8,4}{8,4} + \frac{9,6-9,2}{9,2} \right) \cdot 100\% = \pm 10,7\%.$$

Среднее относительное колебание измеренного тока $\delta_{I_{1,47}}$, %, при значении добавочного сопротивления $R_d = 1,47$ кОм:

$$\delta_{I_{1,47}} = \frac{1}{13} \left(\frac{0,8-0,8}{0,8} + \frac{1,2-1,2}{1,2} + \frac{1,6-1,6}{1,6} + \frac{2-2}{2} + \frac{2-2}{2} + \frac{2-2}{2} + \frac{2,8-2,8}{2,8} + \frac{4,4-4,0}{4,0} + \frac{5,6-5,2}{5,2} + \frac{7,4-7,2}{7,2} + \frac{8-8}{8} + \frac{8,8-8,8}{8,8} + \frac{9,6-9,6}{9,6} \right) \cdot 100\% = \pm 1,6\%.$$

Среднее относительное колебание измеренного тока $\delta_{I_{3,0}}$, %, при значении добавочного сопротивления $R_d = 3,0$ кОм:

$$\delta_{I_{3,0}} = \frac{1}{13} \left(\frac{0,8-0,8}{0,8} + \frac{1,2-1,2}{1,2} + \frac{1,6-1,6}{1,6} + \frac{2-2}{2} + \frac{2-2}{2} + \frac{2-2}{2} + \frac{2,8-2,8}{2,8} + \frac{4,0-4,0}{4,0} + \frac{5,6-5,6}{5,6} + \frac{7,2-6,8}{6,8} + \frac{8-8}{8} + \frac{8,8-8,8}{8,8} + \frac{10-9,6}{9,6} \right) \cdot 100\% = 0,8\%.$$

Среднее колебание измеренного тока $\delta_{I_{6,0}}$, %, при значении добавочного сопротивления $R_d = 6,0$ кОм:

$$\delta_{I_{6,0}} = \frac{1}{13} \left(\frac{0,8-0,8}{0,8} + \frac{1,2-1,2}{1,2} + \frac{1,6-1,6}{1,6} + \frac{2-2}{2} + \frac{2-2}{2} + \frac{2-2}{2} + \frac{2,8-2,8}{2,8} + \frac{4,0-4,0}{4,0} + \frac{5,2-5,2}{5,2} + \frac{7,2-6,8}{6,8} + \frac{8-8}{8} + \frac{8,8-8,8}{8,8} + \frac{9,6-9,6}{9,6} \right) \cdot 100\% = 0,5\%.$$

Среднее колебание измеренного тока $\delta_{I_{12,0}}$, %, при значении добавочного сопротивления $R_d = 12,0$ кОм:

$$\delta_{I_{12,0}} = \frac{1}{13} \left(\frac{0,8-0,8}{0,8} + \frac{1,2-1,2}{1,2} + \frac{1,6-1,6}{1,6} + \frac{1,6-1,6}{1,6} + \frac{1,8-1,6}{1,6} + \frac{2-2}{2} + \frac{2,4-2,4}{2,4} + \frac{3,6-3,2}{3,2} + \frac{5,2-4,8}{4,8} + \frac{6,8-6,4}{6,4} + \frac{7,6-7,6}{7,6} + \frac{8,4-8,4}{8,4} + \frac{9,2-9,2}{9,2} \right) \cdot 100\% = 3\%.$$

Оценим совместное влияние систематической основной погрешности средства измерения (СИ) и систематической погрешности от изменения влажности озонобразующего воздуха на значения тока в разрядной озонаторной камере и, следовательно, на количество синтезируемого озона.

Приведенная к верхнему пределу диапазона измерений тока основная погрешность СИ миллиамперметра Ц423021 класса точности 2,5 составляет $\gamma_{\text{СИ}} = \pm 2,5\%$. В первом приближении примем приведенную погрешность СИ примерно равной относительной погрешности СИ: $\delta_{\text{СИ}} \approx \gamma_{\text{СИ}} = \pm 2,5\%$.

Систематические составляющие погрешности измерения тока и последующего сравнения между собой можно считать взаимонезависимыми. Тогда определим суммарную погрешность измерения и сравнения тока в разрядной озонаторной камере суммированием трех составляющих: основной погрешности СИ $\delta_{\text{СИ}} \approx \gamma_{\text{СИ}} = \pm 2,5\%$, погрешности от изменения влажности в экспериментах при отсутствии добавочного сопротивления $\delta_{I_0} = \pm 10,7\%$, погрешности от изменения влажности в экспериментах при добавочном сопротивлении 3 кОм $\delta_{I_{3,0}} = \pm 0,8\%$. Суммарную относительную погрешность измерения и сравнения тока можно определить [97] по формуле (128):

$$\delta_{\Sigma} = K_p \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}, \quad \%, \quad (128)$$

где $K_p = 0,95$ - коэффициент при принятой доверительной вероятности 0,9.

$$\text{Тогда: } \delta_{I_{\Sigma}} = 0,95 \cdot \sqrt{2,5^2 + 10,7^2 + 0,8^2} = 10,5\%.$$

В таблице 23 представлены сведения о зависимости потребляемой активной и реактивной мощности разряда от напряжения в разрядной камере с осушкой и без осушки при различном добавочном сопротивлении, подключенном последовательно к каждому из элементов секционированного электрода.

Из таблицы 23 видно, что значение коэффициента мощности систем генерации озона в барьерном разряде не зависит от вносимого в разряд активного сопротивления и составляет примерно $\cos \varphi \approx 1/\sqrt{2} \approx 0,7$.

Таблица 23 – Зависимость активной и реактивной мощности от напряжения на разрядной камере при различном добавочном сопротивлении.

U, кВ		P, Вт / Q, ВАр					
		4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
R _д = 0	ос.	8 / 8	14 / 15	18 / 18	24 / 21	27 / 26	32 / 31
	б/о*	-	14 / 13	20 / 19	24 / 23	27 / 27	32 / 32
1,47 кОм	ос.	10 / 10	13 / 12	20 / 21	24 / 24	28 / 27	33 / 32
	б/о	10 / 10	15 / 14	21 / 20	24 / 22	28 / 25	31 / 30
3 кОм	ос.	10 / 9	14 / 13	20 / 18	23 / 23	27 / 27	32 / 31
	б/о	10 / 9	14 / 12	20 / 19	25 / 24	27 / 29	33 / 32
6 кОм	ос.	10 / 9	13 / 14	21 / 20	24 / 23	27 / 29	34 / 31
	б/о	10 / 9	13 / 14	20 / 20	23 / 25	27 / 26	33 / 31
12 кОм	ос.	8 / 9	13 / 14	19 / 19	22 / 24	26 / 26	31 / 31
	б/о	8 / 8	13 / 14	19 / 18	23 / 23	28 / 28	31 / 31

По данным таблицы 23 оценим среднее значение колебания измеренной активной и реактивной мощности в разрядной камере в результате изменения влажности озonoобразующего воздуха.

Среднее колебание измеренной активной мощности ΔP_0 , %, и измеренной реактивной мощности ΔQ_0 , %, при отсутствии добавочного сопротивления ($R_d = 0$):

$$\Delta P_0 = \frac{1}{5} \left(\frac{14-14}{14} + \frac{20-18}{18} + \frac{24-24}{24} + \frac{27-27}{27} + \frac{32-32}{32} \right) \cdot 100 \% = \pm 2,2 \%;$$

$$\Delta Q_0 = \frac{1}{5} \left(\frac{15-13}{13} + \frac{19-18}{18} + \frac{23-21}{21} + \frac{27-26}{26} + \frac{32-31}{31} \right) \cdot 100 \% = \pm 7,5 \%.$$

Среднее колебание измеренной активной мощности ΔP_0 , %, и измеренной реактивной мощности ΔQ_0 , %, при значении добавочного сопротивления $R_d = 1,47$ кОм:

$$\Delta P_{1,47} = \frac{1}{6} \left(\frac{10-10}{10} + \frac{15-13}{13} + \frac{21-20}{20} + \frac{24-24}{24} + \frac{28-28}{28} + \frac{33-31}{31} \right) \cdot 100 \% = \pm 4,5 \%;$$

$$\Delta Q_{1,47} = \frac{1}{6} \left(\frac{10-10}{10} + \frac{14-12}{12} + \frac{21-20}{20} + \frac{24-22}{22} + \frac{27-25}{25} + \frac{32-30}{30} \right) \cdot 100 \% = \pm 7,6 \%.$$

Среднее колебание измеренной активной мощности ΔP_0 , %, и измеренной реактивной мощности ΔQ_0 , %, при значении добавочного сопротивления $R_d = 3,0$ кОм:

$$\Delta P_{3,0} = \frac{1}{6} \left(\frac{10-10}{10} + \frac{14-14}{14} + \frac{20-20}{20} + \frac{25-23}{23} + \frac{27-27}{27} + \frac{33-32}{32} \right) \cdot 100 \% = \pm 2,0 \%;$$

$$\Delta Q_{3,0} = \frac{1}{6} \left(\frac{9-9}{9} + \frac{13-12}{12} + \frac{19-18}{18} + \frac{24-23}{23} + \frac{29-27}{27} + \frac{32-31}{31} \right) \cdot 100 \% = \pm 4,8 \%.$$

Среднее колебание измеренной активной мощности ΔP_0 , %, и измеренной реактивной мощности ΔQ_0 , %, при значении добавочного сопротивления $R_d = 6,0$ кОм:

$$\Delta P_{6,0} = \frac{1}{6} \left(\frac{10-10}{10} + \frac{13-13}{13} + \frac{21-20}{20} + \frac{24-23}{23} + \frac{27-27}{27} + \frac{34-33}{33} \right) \cdot 100 \% = \pm 2,1 \%;$$

$$\Delta Q_{6,0} = \frac{1}{6} \left(\frac{9-9}{9} + \frac{14-14}{14} + \frac{20-20}{20} + \frac{25-23}{23} + \frac{29-26}{26} + \frac{31-31}{31} \right) \cdot 100 \% = \pm 3,4 \%.$$

Среднее колебание измеренной активной мощности ΔP_0 , %, и измеренной реактивной мощности ΔQ_0 , %, при значении добавочного сопротивления $R_d = 12,0$ кОм:

$$\Delta P_{12,0} = \frac{1}{6} \left(\frac{8-8}{8} + \frac{13-13}{13} + \frac{19-19}{19} + \frac{23-22}{22} + \frac{28-26}{26} + \frac{31-31}{31} \right) \cdot 100 \% = \pm 2,0 \%;$$

$$\Delta Q_{12,0} = \frac{1}{6} \left(\frac{9-8}{8} + \frac{14-14}{14} + \frac{19-18}{18} + \frac{24-23}{23} + \frac{28-26}{26} + \frac{31-31}{31} \right) \cdot 100 \% = \pm 5,0 \%.$$

Приведенная основная погрешность СИ цифрового измерителя мощности ЩВ72.1 составляет $\gamma_{\text{си}} = \pm 0,5 \%$. В первом приближении примем приведенную погрешность СИ примерно равной относительной погрешности СИ: $\delta_{\text{си}} \approx \gamma_{\text{си}} = \pm 0,5 \%$.

Определим суммарную погрешность измерения и сравнения активной и реактивной мощности в разрядной озонаторной камере суммированием трех составляющих: основной погрешности СИ $\delta_{\text{си}} \approx \gamma_{\text{си}} = \pm 0,5 \%$, погрешности от изменения влажности в экспериментах при отсутствии добавочного

сопротивления $\delta_{P_0} = \pm 2,2 \%$ и $\delta_{Q_0} = \pm 7,5 \%$, погрешности от изменения влажности в экспериментах при добавочном сопротивлении 3 кОм $\delta_{P_{3,0}} = \pm 2,0 \%$ и $\delta_{Q_{3,0}} = \pm 4,8 \%$. Суммарную систематическую относительную погрешность измерения и сравнения активной и реактивной мощности определим в соответствии с формулой (128):

$$\begin{aligned}\delta_{P\Sigma} &= 0,95 \cdot \sqrt{0,5^2 + 2,2^2 + 2,0^2} = 2,9 \%; \\ \delta_{Q\Sigma} &= 0,95 \cdot \sqrt{0,5^2 + 7,5^2 + 4,8^2} = 8,5 \%.\end{aligned}$$

При проведении экспериментальных исследований электроэнергетических параметров систем генерации озона в барьерном разряде с различным сопротивлением электродов также проводилось измерение межэлектродной ёмкости ($C_{\text{эл}}$) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) разрядных озонаторных камер. Данные измерения проводились с помощью цифрового RLC-измерителя E7-8.

При изменении значения сопротивления, подключаемого к элементам секционированного электрода, от 0 до 24 кОм наблюдались незначительные колебания значения межэлектродной ёмкости исследуемой разрядной озонаторной камеры ($C_{\text{эл}} = 215 - 260$ пФ) и значения тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta = 0,017 - 0,03$). Измеренные параметры позволяют оценить диэлектрические потери ($P_{\text{д}}$) в исследуемых системах генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами в зависимости от напряжения между электродами при частоте тока $f_2 = 400$ Гц в соответствии с формулой (128).

$$P_{\text{д}} = 2\pi f U_2^2 C_{\text{эл}} \text{tg}\delta = 800\pi U_2^2 C_{\text{эл}} \text{tg}\delta, \text{ Вт.} \quad (128)$$

В таблице 24 представлена зависимость диэлектрических потерь в разрядной камере с высокоомными электродами от напряжения между электродами, представленная для наиболее часто наблюдаемых измеренных значений ёмкости ($C_{\text{эл}} = 230$ пФ) и тангенса угла потерь ($\text{tg}\delta = 0,02$) в диапазоне напряжений, используемых при экспериментах.

Таблица 24 – Диэлектрические потери в разрядной камере с высокоомными электродами в исследуемом диапазоне выходного напряжения.

U_2 , кВ	1	2	3	4	5	6	7
P_d , Вт	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6

Представленные в таблице 24 значения диэлектрических потерь в исследуемом диапазоне выходного напряжения свидетельствуют о малости данных потерь, поэтому влиянием диэлектрических потерь на общую активную мощность в системах генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами можно пренебречь.

Выводы по четвёртой главе

Проведены экспериментальные исследования осциллограмм импульсов токов и напряжений микрозарядов в системах генерации озона с различными параметрами цепи разряда. Для этого физическая модель разрядной камеры с предельно секционированным электродом, а при снятии осциллограмм применена специальная схема, исключающая возможные помехи. Получены осциллограммы как нескольких микрозарядов, так и отдельных импульсов при коэффициенте развёртки до 10 нс/дел.

При добавлении последовательно в цепь микрозаряда активного сопротивления по сравнению с обычным микрозарядом увеличивается время переходного процесса микрозаряда, а амплитуда тока микрозаряда уменьшается. При этом, по сравнению с микрозарядом с обычными параметрами, постоянная времени завершающей стадии микрозаряда τ_3 увеличилась примерно в 2 раза: примерно с 20 нс до 50 нс. Амплитуда тока микрозаряда также уменьшилась примерно в 2 раза: примерно с 350 мА до 200 мА. При увеличении индуктивности в цепи микрозаряда, начиная с некоторого значения индуктивности цепи микрозаряда, характер переходного процесса становится колебательным. Импульс тока микрозаряда с увеличенной

индуктивностью имеет затухающий колебательный характер. При увеличении индуктивности время разряда T_p возрастает примерно в 2 раза, и одновременно во столько же раз уменьшилась амплитуда тока микроразряда.

На основании полученных осциллограмм нескольких микроразрядов можно сделать вывод, что применение высокоомных электродов в системах генерации озона позволяет повысить однородность барьерного разряда. Уменьшается разброс максимальных значений импульсов тока микроразрядов с увеличенным сопротивлением, а распределение этих импульсов во времени становится более равномерным.

Проведены экспериментальные сравнительные исследования электроэнергетических и производительных характеристик систем генерации озона, имеющих различное сопротивление электродов. Для этих исследований созданы физические модели систем генерации озона с высокоомными электродами двух конструктивных типов: со сплошными плоскопараллельными электродами и с электродами, один из которых секционирован в виде параллельных проволок на поверхности диэлектрика.

Вольтамперные характеристики барьерного разряда практически не зависят от сопротивления электродов для обоих типов конструкций разрядных камер. Применение высокоомных электродов согласно данным сравнительных экспериментов, позволяет повысить производительность систем генерации озона при соответствующем уровне напряжения. Наибольшего увеличения производительности систем генерации озона с высокоомными электродами по сравнению с системами с высокопроводящими электродами удаётся добиться при более высоких значениях напряжения.

Системы генерации озона с секционированным электродом в виде параллельных проволок позволяют увеличивать сопротивление разряда путём подключения резисторов к элементам секционированного электрода. Увеличение вносимого сопротивления в таких системах позволяет также увеличить энергоэффективность синтеза озона. При этом наибольшего увеличения производительности систем генерации озона с секционированными

высокоомными электродами по сравнению с системами с высокопроводящими электродами удаётся добиться при более низких значениях напряжения.

Получена зависимость нагрева озоносодержащего газа на выходе из озонаторной камеры от электрического тока при различном сопротивлении секционированного электрода. Вносимое сопротивление порядка 10^4 Ом позволяет уменьшить температуру, выделяющуюся в области разряда. Это явление объясняется более равномерным протеканием импульсов микрозарядов в системах генерации озона с высокоомными электродами, а именно уменьшением максимального тока микрозарядов при одновременном увеличении длительности отдельных микрозарядов.

Возможное колебание относительной влажности во время экспериментов в диапазоне от 40 % до 57 % увеличивает до 10 % относительную погрешность измерения и сравнения тока в системах генерации озона при различном активном сопротивлении высокоомных электродов.

В таблице 25 представлены сравнительные результаты теоретических и экспериментальных исследований барьерных микрозарядов с высокоомными электродами при напряжении $U_{ист.} \approx 10$ кВ.

Таблица 25 – Основные параметры барьерного микрозаряда с высокоомными электродами.

Параметр	Результаты расчёта	Результаты эксперимента
время формирования t_{ϕ} , нс	3,3	20
постоянная времени завершения τ_3 , нс	2,8	50
максимальный ток I_m , А	0,64	0,25

В расчётах не была учтена нелинейность сопротивления микрозаряда во время его развития, а также индуктивность и индуктивное сопротивление. Этим объясняется меньшее по сравнению с экспериментальным расчётное значение времени формирования (t_{ϕ}) и завершения (τ_3) микрозаряда, и, соответственно, большее расчётное значение максимального тока микрозаряда (I_m).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации проведено исследование систем генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами. Разработаны математические модели, описывающие процессы формирования и дозарядки ионизированной области барьерного микроразряда. Представлены результаты экспериментальных исследований, анализ которых подтверждает практическую значимость диссертационного исследования и позволяет сформулировать рекомендации по применению систем генерации озона с высокоомными электродами барьерного типа.

На основании изложенных в диссертации результатов можно сформулировать следующие выводы:

1. В диссертации предложены новые системы генерации озона барьерного типа с высокоомными электродами, защищенные патентами РФ.

2. Разработаны и исследованы физические модели систем генерации озона в барьерном разряде, отличающиеся от известных высоким активным сопротивлением электродов разрядной камеры порядка $10^3 - 10^4$ Ом.

3. Разработаны математические модели систем генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами, с помощью которых определены основные параметры барьерного микроразряда с высокоомными электродами.

4. Проведено сравнительное экспериментальное исследование систем генерации озона в барьерном разряде при различном значении сопротивления высокоомных электродов; экспериментально установлено оптимальное значение активного сопротивления высокоомных электродов 3–5 кОм, обеспечивающее снижение энергопотребления систем генерации озона в барьерном разряде.

5. Проведено сравнительное осциллографическое исследование физических моделей систем генерации озона в барьерном разряде, отличающихся активным сопротивлением, включаемым в цепь микроразряда; установлена взаимосвязь активного сопротивления цепи микроразряда с амплитудой и длительностью импульса тока барьерного микроразряда.

Также разработаны системы генерации озона, обладающие повышенным индуктивным вносимым сопротивлением микроразряда [18]. Данные системы обладают повышенной однородностью микроразрядных процессов по сравнению с системами генерации озона с высокопроводящими электродами.

Перспективой дальнейшей разработки темы диссертации может являться исследование влияния высокоомных электродов на повышение надёжности работы разрядных озонаторных камер барьерного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акватрол — инженерно-технический центр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.aquatrol.ru.
2. Алексеев, Л.С. Техничко-гигиенические аспекты фторирования воды / Л.С. Алексеев, Г.А. Ивлева, Заед Садик Абрахем Аль-Амри // Вестник МГСУ. - 2012. - № 3. - С. 154-158.
3. Андреев, В.В. Исследование структуры барьерного разряда вблизи электрода с цилиндрическим поперечным сечением / В.В. Андреев, Л.А. Васильева, А.Н. Матюнин, Ю.П. Пичугин // Прикладная физика. - 2011. - № 1. - С. 51-57.
4. Андреев, В.В. Исследование эффективности плазмохимических генераторов озона на барьерном разряде в воздухе при атмосферном давлении / В.В. Андреев, А.Н. Матюнин, Ю.П. Пичугин, В.Г. Телегин, Г.Г. Телегин // Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез. - 2011. - № 4. - С. 112-117.
5. Атомарный кислород и его влияние на человека [Электронный ресурс] / ВекЖиву.ком. — Оздоровительный проект. 2011. 11 сентября. – Режим доступа: <http://vekzhivu.com/article/395-atomarnyi-kislorod-i-ego-vliyanie-na-cheloveka>.
6. Базуткин, В.В. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов / В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь; Под общ. ред. В.П. Ларионова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
7. Боголицын, К.Г. Перспективы озонных технологий в химической переработке древесины / К.Г. Боголицын, Т.Э. Скребец // «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». Материалы Первой Всероссийской конф. – М.: Изд-во ЧеРо-2005, «Книжный дом Университет», 2005. – С. 47-56.

8. Бочаров, Ю.Н. Техника высоких напряжений: учеб. пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2013. – 265 с.
9. Воронов, Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод: Учебник для вузов / Ю.В. Воронов, С.В. Яковлев. - М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. - 704 с.
- 10.Высокочастотный безбарьерный озонатор: пат. 1809965 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 / Е.Г. Безруких, Б.Б. Долгополов - № 4909067/26; заявл. 07.02.91; опубл. 10.11.05.
- 11.Высокочастотный озонатор: а. с. 1495287 СССР: МПК С 01 В 13/11 / В.Б. Гаврилюк, В.А. Вобликова, Ю.В. Филиппов (СССР). - № 4264808/31-26; заявл. 23.06.87; опубл. 23.07.89, Бюл. № 27.
- 12.Высокочастотный озонатор: а. с. № 1807661 СССР: МПК С 01 В 13/11 / Е.Г. Безруких, Б.Б. Долгополов, В.Ю. Тришанков (СССР). - № 4789291/26; заявл. 06.02.90; опубл. 20.11.05, Бюл. № 32.
- 13.Высокочастотный трубчатый озонатор: а. с. 1103488 СССР: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / А.В. Катявин, М.В. Горохов (СССР). - № 3510878/26; заявл. 16.11.82; опубл. 27.03.95. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555326327921.
- 14.Высокочастотный трубчатый озонатор: а. с. 839201 СССР: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / М.В. Горохов, А.В. Катявин, В.И. Семенов, С.С. Баранов, Г.Н. Гончаров (СССР). - № 2621038/26; заявл. 14.06.78; опубл. 20.02.95. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555326424004.
- 15.Газоразрядный трубчатый элемент озонатора: а. с. 1058221 СССР: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / А.В. Катявин, В.И. Сорокина, М.В. Горохов (СССР). - 3446923/26; заявл. 28.05.82; опубл. 10.03.95. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555326506715.
- 16.Газоразрядный трубчатый элемент озонатора: а. с. 864724 СССР: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / А.В. Катявин, М.В. Горохов (СССР). - № 2854027/26; заявл. 17.12.79; опубл. 10.03.95. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555326742997.

17. Генератор озона: а. с. 1742205 СССР: МПК С 01 В 13/11 / В.С. Савин, В.П. Симонов (СССР). - № 4663410/26; заявл. 30.12.88; опубл. 23.06.92, Бюл. 23.
18. Генератор озона: пат. 135639 РФ на полезную модель: МПК С 01 В 13/11 / В.В. Андреев, А.Н. Матюнин, Ю.П. Пичугин - № 2013130083/05; заявл. 01.07.2013; опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35.
19. Генератор озона: пат. 2046753 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / В.В. Данилин, М.П. Кокуркин, М.М. Пашин, Ю.В. Горбатский, В.П. Ельчинов, А.И. Смородин - № 93049882/26; заявл. 02.11.93; опубл. 27.10.95. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555326664858.
20. Генератор озона: пат. 2116959 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / И.А. Потапенко, В.К. Андрейчук, Д.А. Нормов - № 95109197/25; заявл. 05.06.95; опубл. 27.07.98. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555326714800.
21. Генератор озона: пат. 2458855 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 / Н.А. Четвергов, Н.А. Токарев, П.П. Турчин, С.В. Мисюль - № 2011114700/05; заявл. 13.04.11; опубл. 20.08.12, Бюл. № 23.
22. Генератор озона Ю.П. Пичугина: пат. 2135407 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / Ю.П. Пичугин - № 98115710/25; заявл. 17.08.98; опубл. 27.08.99. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555326830791.
23. Гинзбург, С.Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях / С.Г. Гинзбург. – М.: «Высшая школа», 1967.
24. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования / Министерство здравоохранения Российской Федерации, «Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Минздрава России», Москва, 2003 г.
25. ГН 2.1.5.2280-07 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-

- бытового водопользования. Дополнения и изменения № 1 к ГН 2.1.5.1315-03 / Главный государственный санитарный врач Российской Федерации. - Постановление от 28 сентября 2007 года № 75 (действующее).
26. ГНЦ РФ ТРИНИТИ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.triniti.ru.
27. Горбунов, А.К. Аналитический обзор реагентов, используемых в водоподготовке / А.К. Горбунов, О.П. Петросян, Д.В. Рябченков // Электронный журнал: наука, техника и образование. - 2016. - № 1 (5). - С. 195-215.
28. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М.: Станартинформ, 2008.
29. Драгинский, В.Л. Роль озонирования в свете новых требований к качеству питьевой воды / В.Л. Драгинский, Л.П. Алексеева // «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». Материалы Первой Всероссийской конф. – М.: Изд-во ЧеРо-2005, «Книжный дом Университет», 2005. – С.57-73.
30. Захаров, В.Г. Источник питания озонатора / В.Г. Захаров, А.Н. Матюнин, Ю.П. Пичугин // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. - Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. – С. 315-316.
31. Импульсный безбарьерный озонатор: пат. 2545305 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 / Ю.П. Пичугин - № 2013132060/05; заявл. 10.07.13; опубл. 20.01.15, Бюл. № 2.
32. Караффа-Корбуттъ, В.В. Озонъ и его примъненіе въ промышленности и санитаріи. - Спб.: Изд-ство «Образование», 1912.
33. Каскадный озонатор: пат. 2083482 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / Л.И. Варламов - № 95102792/25; заявл. 27.02.95; опубл. 10.07.97. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555326881106.

34. Кислород в организме человека [Электронный ресурс] / "Здоровье и психология". 2015. 10 июля. – Режим доступа: <https://zdips.ru/zdorovoe-pitanie/mineraly/1626-kislorod-v-organizme-cheloveka.html>.
35. Кожин, В.Ф. Озонирование воды / В.Ф. Кожин, И.В. Кожин. - М., Стройиздат, 1973. - 160 с.
36. Кожин, В.Ф. Очистка питьевой и технической воды. Примеры и расчеты: Учеб. пособие для вузов / В.Ф. Кожин. - 4-е изд., репринтное. - М.: ООО «БАСТЕТ», 2008. - 304 с.
37. Козлов, К.В. Современный уровень понимания механизма барьерного разряда в смесях кислорода с азотом / К.В. Козлов // Материалы Первой всероссийской конф. «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии», посвящённой 250-летию МГУ им. М.В. Ломоносова. - М., 2005. - С. 81–94.
38. Кравченко, Г.А. Исследование диэлектрических барьеров с короностойким покрытием и разработка высокоресурсных систем электродов генераторов озона: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.09.03 / Кравченко Галина Алексеевна. - Чебоксары, 2013. - 19 с.
39. Кравченко, Г.А. Исследование, разработка генераторов озона и их использование в экологических и технологических целях / Г.А. Кравченко, А.Н. Матюнин, Ю.П. Пичугин // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. 7. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – С. 264-271.
40. Курганхиммаш. Ведущий производитель оборудования для нефтегазовой отрасли [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kurgankhimmash.ru>.
41. Лабораторные работы по технике высоких напряжений. Учеб. пособие для вузов / под ред. М.А. Аронова. – М.: Энергия, 1974. – 320 с.
42. Лунин, В.В. Озон в очистке газовых выбросов, сельском хозяйстве и подготовке питьевой воды: Учебное пособие / В.В. Лунин, Н.В. Карягин, С.Н. Ткаченко, В.Г. Самойлович. - М.: МАКС Пресс, 2010. - 232 с.

43. Лунин, В.В. Применение и получение озона / В.В. Лунин, Н.В. Карягин, С.Н. Ткаченко, В.Г. Самойлович. - М.: Изд-во «Книжный дом Университет», 2006. - 128 с.
44. Лунин, В.В. Способы получения озона и современные конструкции озонаторов: Учебное пособие / В.В. Лунин, Н.В. Карягин, С.Н. Ткаченко, В.Г. Самойлович. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 216 с.
45. Лунин, В.В. Физическая химия озона / В.В. Лунин, М.П. Попович, С.Н. Ткаченко. - М.: Изд-во МГУ, 1998. - 480 с.
46. Луцевич, И.Н. Гигиеническая оценка трансформации сложных органических веществ, образующихся в результате обеззараживания питьевой воды хлором / И.Н. Луцевич // Казанский медицинский журнал. - 2003. - Т. 84. - № 2. - С. 142-145.
47. Малашин, М.В. О возможности получения объемного диэлектрического барьерного разряда в воздухе при атмосферном давлении / М.В. Малашин, С.И. Мошкунов, В.Ю. Хомич, Е.А. Шершунова, В.А. Ямщиков // Письма в журнал технической физики. - 2013. - Т. 39. - Вып. 5. - С. 48-53.
48. Малогабаритный генератор озона: пат. 2057059 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / И.П. Верещагин, В.Б. Громовой, В.А. Жуков, А.В. Калинин, М.В. Козлов, Ю.А. Кузин, В.В. Панюшкин – заявл. 30.06.92; опубл. 27.03.96. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555326936947.
49. Матюнин, А.Н. Влияние характеристик микроразряда на работу барьерного озонатора / А.Н. Матюнин, Ю.П. Пичугин // Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий. Сборник материалов XXI Всероссийской межвузовской научно-технической конф. Часть 2. - Казань: Издательство «Отечество», 2009. – С. 181-182.
50. Матюнин, А.Н. Временная структура барьерного разряда / А.Н. Матюнин, Ю.П. Пичугин // Студенческая наука – будущее России. Сб. тр. Регион. 42-й научн. студенч. конф. - Чебоксары: Изд-во Чуваш ун-та, 2008. – С. 297-299.

51. Матюнин, А.Н. Высоочастотные озонаторы на базе экономичных электродов / А.Н. Матюнин // Сборник материалов победителей и призеров VII Республиканского конкурса научно-исследовательских работ студентов, молодых ученых и специалистов «Наука XXI века». – Чебоксары, 2010. – С. 151-156.
52. Матюнин, А.Н. Исследование моделей озонаторов с высокоомными электродами / А.Н. Матюнин, Ю.П. Пичугин // Человек. Гражданин. Учёный: сб. тр. Регион. фестиваля студ. и молодёжи. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. – С. 14-15.
53. Матюнин, А.Н. Математическое моделирование поверхностного газового разряда / А.Н. Матюнин // Сборник научных трудов молодых ученых и специалистов. - Чебоксары, 2016. - С. 103-108.
54. Матюнин, А.Н. Озонаторы с коронистой барьерной структурой и экономичными электродами / А.Н. Матюнин // МАТЕРИАЛЫ VII Республиканского конкурса инновационных проектов по программе У.М.Н.И.К. – Чебоксары, 2012. – С. 66-67.
55. Матюнин, А.Н. Повышение эффективности озонаторов с высокоомными электродами / А.Н. Матюнин // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. 11. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С. 260-274.
56. Матюнин, А.Н. Повышение эффективности работы кассеты, генерирующей озон при высокой частоте питающего напряжения / А.Н. Матюнин, Ю.П. Пичугин // Сборник тезисов победителей XI межрегиональной конференции-фестиваля научного творчества учащейся молодёжи «Юность Большой Волги». – Чебоксары, 2009. – С. 170-171.
57. Матюнин, А.Н. Применение упрощенной математической модели при исследовании барьерного разряда / А.Н. Матюнин, В.А. Нестерин, Ю.П. Пичугин // Вестник Чувашского университета. - 2017. - № 1. - С. 130-136.
58. Матюнин, А.Н. Регулирование параметров барьерного разряда с целью повышения эффективности синтеза озона / А.Н. Матюнин, Ю.П. Пичугин //

- Человек. Гражданин. Учёный: сб. тр. Открытого фестиваля студ. молодёжи. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2009. – С. 189.
59. Матюнин, А.Н. Совершенствование электродных систем озонаторов / А.Н. Матюнин // Сборник материалов XII Межрегиональной конференции-фестиваля творчества учащейся молодёжи «Юность Большой Волги». – Чебоксары, 2010. – эл. диск. – С. 77-80.
60. Матюнин, А.Н. Совершенствование озонаторов для очистки сточных вод / А.Н. Матюнин // Наука XXI века: сборник научных статей победителей и призёров IX Республиканского конкурса научно-исследовательских работ студентов, молодых учёных и специалистов. – Чебоксары, 2013. – С. 113-117.
61. Матюнин, А.Н. Характеристики импульсов тока барьерного разряда в озонаторе и их регулирование в практических целях / А.Н. Матюнин // Сборник научных трудов молодых учёных и специалистов. - Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2009. – С. 44-47.
62. Нестерин, В.А. Разработка и применение озонаторов с высокоомными электродами барьерного типа для очистки газов нефтехимических производств / В.А. Нестерин, Ю.П. Пичугин, А.Н. Матюнин, С.Д. Слонимский, Д.А. Токмаков // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли материалы Международной научно-практической конф., посвященной 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан. Альметьевский государственный нефтяной институт. - 2016. - С. 184-185.
63. Нуднова, М.М. Влияние полярности на свойства наносекундного поверхностного барьерного разряда в воздухе атмосферного давления / М.М. Нуднова, Н.Л. Александров, А.Ю. Стариковский // Физика плазмы. - 2010. - Т. 36. - № 1. - С. 94-103.
64. Озонатор: а. с. 1564113 СССР: МПК С 01 В 13/11 / В.С. Энгельшт, Л.Т. Ларькина, Ю.И. Нашницын (СССР). - № 4402171/23-26; заявл. 01.04.88; опубл. 15.05.90, Бюл. № 18.

65. Озонатор: а. с. 1627506 СССР: МПК С 01 В 13/11 / В.С. Энгельшт, Л.Т. Ларькина, Ю.И. Нашницын (СССР). - № 4402172/26; заявл. 01.04.88; опубл. 15.02.91, Бюл. № 6.
66. Озонатор: а. с. 1718530 СССР: МПК С 01 В 13/11 / М.В. Соколова, А.Е. Киселев, А.В. Калинин, И.П. Верещагин, В.Б. Громовой, В.А. Жуков, И.К. Решидов, В.В. Панюшкин (СССР). - № 4246968/26; заявл. 06.10.89; опубл. 20.06.00, Бюл. № 17.
67. Озонатор: а. с. 998328 СССР: МПК С 01 В 13/11 / М.В. Горохов, С.С. Баранов, В.И. Семенов, А.В. Катявин (СССР). - № 3305965; заявл. 22.06.81; опубл. 23.02.83, Бюл. № 7.
68. Озонатор: пат. 2016841 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / К.С. Демирчян, И.К. Алиев, Г.Г. Гусев, О.А. Склянченков - № 4946366/26; заявл. 14.06.91; опубл. 30.07.94. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555326985023.
69. Озонатор: пат. 2040461 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / И.Х. Хайруллин, Р.К. Фаттахов, Ф.Р. Исмагилов, В.И. Лысенко - № 5028651/26; заявл. 25.02.92; опубл. 25.07.95. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555327027196.
70. Озонатор: пат. 2056343 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / В.И. Зубков - № 92006374/26; заявл. 16.11.92; опубл. 20.03.96. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555327055555.
71. Озонатор: пат. 2061651 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / Ю.А. Волченко, А.Н. Рожнев – заявл. 10.06.93; опубл. 10.06.96. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555327081588.
72. Озонатор: пат. 2084399 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / И.Х. Хайруллин, Р.К. Фаттахов, Ф.Р. Исмагилов - № 94003544/25; заявл. 03.02.94; опубл. 20.07.97. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555327114188.
73. Озонатор: пат. 2109678 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / О.А. Журавлёв, В.П. Марков - № 96113656/25; заявл. 26.06.96;

- опубл. 27.04.98. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555327150362.
74. Озонатор: пат. 2122519 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / И.Х. Хайруллин, Р.К. Фаттахов, Ф.Р. Исмагилов, З.Р. Исмагилов - № 96113615/25; заявл. 26.06.96; опубл. 27.11.98. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555327213825.
75. Озонатор: пат. 2132300 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / И.А. Потапенко, В.К. Андрейчук, Д.А. Нормов, В.В. Помазанов, А.А. Лиферь, В.П. Бойко - № 97104314/25; заявл. 27.03.97; опубл. 27.06.99. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555327241774.
76. Озонатор: пат. 2132815 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / В.В. Пацевич, В.В. Лопатин, В.Р. Кухта, А.Г. Сипайлов - № 97117987/25; заявл. 22.10.97; опубл. 10.07.99. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555327282348.
77. Озонатор: пат. 2289542 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 / А.Н. Бабицкий, Б.А. Беляев, А.А. Лексиков - № 2005101557/15; заявл. 24.01.05; опубл. 20.12.06, Бюл. № 35.
78. Озонатор: пат. 2301773 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 / И.Г. Стрижков, О.Н. Разнован - № 2005137410/15; заявл. 01.12.05; опубл. 27.06.07, Бюл. № 18.
79. Озонатор: пат. 2427528 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 / Ю.П. Пичугин, А.Н. Матюнин – № 2009144348/05; заявл. 30.11.2009; опубл. 27.08.2011, Бюл. № 24.
80. Озонатор: пат. 2660870 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 / Ю.П. Пичугин, А.Н. Матюнин - № 2016119299; заявл. 18.05.16; опубл. 23.11.17, Бюл. № 19.
81. Озонатор и источник питания для него: пат. 2578158 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 / М.Н. Волков - № 2015100560/05; заявл. 12.01.15; опубл. 20.03.16, Бюл. № 8.
82. ООО «Озония» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.ozonia.ru.

83. Основы теоретической электротехники: Учебное пособие / Ю.А. Бычков, В.М. Золотницкий, Э.П. Чернышев, А.Н. Белянин. 2-е изд., стер. - Спб.: Издательство «Лань», 2008. - 592 с.
84. Основы теории цепей: Учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. - 5-е изд., перераб. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 528 с.
85. Пичугин, Ю.П. Исследование генерации озона в озонаторах с высокоомными электродами / Ю.П. Пичугин, А.Н. Матюнин // Вестник Чувашского университета. - 2011. - №3. - С. 107-111.
86. Пичугин, Ю.П. Особенности работы генераторов озона с высокоомными электродами / Ю.П. Пичугин, А.Н. Матюнин // Вестник Чувашского университета. - 2015. - №3. - С. 109-121.
87. Пичугин, Ю.П. Оценка геометрических и температурных параметров микроразрядов в барьерном разряде / Ю.П. Пичугин, Г.А. Кравченко // Вестник Чувашского университета. - 2011. - № 3. - С. 102-107.
88. Пичугин, Ю.П. Структура барьерного разряда и синтез озона / Ю.П. Пичугин // «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». Материалы Первой Всероссийской конф. – М.: Изд-во ЧеРо-2005, «Книжный дом Университет», 2005 – С. 146.
89. Пичугин, Ю.П. Экспериментальное исследование структуры барьерного разряда / Ю.П. Пичугин // «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». Материалы Первой Всероссийской конф. – М.: Изд-во ЧеРо-2005, «Книжный дом Университет», 2005. – С. 147.
90. ПК «ПОЗИТРОН» - Москва [Электронный ресурс] / Новейшие озоновые технологии очистки воды и воздуха. – Режим доступа: www.tk-pozitron.ru.
91. Плазмохимический генератор с самопрокачкой газа: пат. 2105438 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / О.А. Журавлёв, В.П. Марков - № 94013084/25; заявл. 12.04.94; опубл. 20.02.98. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555327319933.
92. Плазмохимический генератор роторного типа: пат. 2034778 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / О.А. Журавлев - № 93010101/26;

- заявл. 26.02.93; опубл. 10.05.95. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555327353837.
- 93.Полянин, А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики / А.Д. Полянин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576 с.
- 94.Райзер, Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание / Ю.П. Райзер - 3-е изд. перераб. и доп. - Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. - 736 с.
- 95.Самойлович, В.Г. 20-ый всемирный конгресс по озону и 6-ой всемирный конгресс по ультрафиолету. Париж, Франция. Май.2011г. Краткий обзор научных докладов / В.Г. Самойлович // Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии. Материалы 32-го Всероссийского семинара / Под редакцией В.В. Лунина, В.Г. Самойловича, С.Н. Ткаченко. – М.: Изд-во «Макспресс», 2012. – С. 19-40.
- 96.Самойлович, В.Г. Физическая химия барьерного разряда / В.Г. Самойлович, В.И. Гибалов, К.В. Козлов. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 176 с.
- 97.Сергеев, А.Г. Метрология: Учебник / А.Г. Сергеев. - М.: Логос, 2005. - 272 с.
- 98.Система электродов генератора озона: пат. 2326811 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / Ю.П. Пичугин, С.Д. Слонимский - № 2006115311/15; заявл. 27.11.07; опубл. 20.06.08. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555327720611.
- 99.Скребец, Т.Э. Применение озона для отбеливания целлюлозы / Т.Э. Скребец, К.Г. Боголицын, Т.С. Сыркова // «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». Материалы Первой Всероссийской конф. – М.: Изд-во ЧеРо-2005, «Книжный дом Университет», 2005. – С. 240.
- 100.Соколова, М.В. Особенности электрических характеристик объёмно-поверхностного разряда в трёхэлектродной системе в воздухе при импульсно-периодическом питании / М.В. Соколова, А.М. Никитин, С.А. Кривов, А.В. Лазуткин, И.Е. Ребров, М.В. Малашин, С.В. Небогаткин // Прикладная физика. - 2015. - № 5. - С. 39-43.

101. Способ генерирования озона и устройство для его осуществления: пат. 2211800 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 / Н.И. Бойко - № 2001132154/12; заявл. 29.11.01; опубл. 10.09.03, Бюл. № 25.
102. Способ получения озона в электрическом разряде и устройство для его осуществления: пат. 2027664 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / Ю.П. Пичугин, В.Н. Косолапов, В.Д. Тимофеев, О.Н. Зайцев - № 5031273/26; заявл. 16.01.92; опубл. 27.01.95. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555327748526.
103. Способ регулирования концентрации озона: а. с. 468881 СССР: МПК С 01 В 13/10, G 05 D 27/00 / Иванов Ю.Е. (СССР). - № 1686635/23-26; заявл. 16.07.71; опубл. 30.04.75, Бюл. 16.
104. Способ регулирования концентрации озона: а. с. 691393 СССР: МПК С 01 В 13/11, G 05 D 11/13 / В.Ф. Хмара, Л.Н. Тропин, Ю.А. Мошков (СССР). - № 2614596/23-26; заявл. 15.05.78; опубл. 15.10.79, Бюл. 38.
105. Способ синтеза озона и устройство для его реализации: пат. 2220093 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 / А.А. Мынка, Н.П. Поляков - № 2001116653/12; заявл. 14.06.01; опубл. 27.12.03, Бюл. № 18.
106. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики: Учеб. пособие / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 1999.
107. Ткаченко, И.С. Моделирование синтеза озона в поверхностном барьерном разряде в кислороде: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 02.00.04 / Ткаченко Илья Сергеевич. - М., 2010. - 20 с.
108. Туровский, Б.В. Опасные и вредные примеси природных и питьевых вод / Б.В. Туровский // Научный журнал КубГАУ. - 2014. - №102(08). - С. 1-14.
109. Устройство барьерного разряда: пат. 2187910 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / И.Г. Учайкин, П.Ф. Дьяков, М.Г. Комисаров - № 2001117791/12; заявл. 26.06.01; опубл. 20.08.02. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555327792953.

110. Устройство для генерирования озона: пат. 2255897 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 / В.Н. Бондалетов, Н.В. Карягин, Н.И. Пуресев - № 2004100055/15; заявл. 05.01.04; опубл. 10.07.05, Бюл. № 19.
111. Устройство для генерирования озона: пат. 2355627 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 / Ю.П. Пичугин, Г.А. Кравченко - № 2007135585/15; заявл. 25.09.07; опубл. 27.09.09, Бюл. № 27.
112. Устройство для генерирования озона: пат. 2446093 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11. / Е.В. Корса-Вавилова, Н.И. Пуресев, Е.А. Гордееня, Ю.А. Назаров, В.Я. Крылова - № 2010136167/05; заявл. 01.09.10; опубл. 27.03.12, Бюл. № 9.
113. Устройство для дезодорации и бактерицидной обработки воздуха в электрическом разряде: пат. 2116244 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / О.А. Журавлёв, А.В. Ивченко, В.И. Рябов, В.И. Серов, В.Г. Фейгин - № 95109197/25; заявл. 05.06.95; опубл. 27.07.98. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555327821639.
114. Устройство для обработки газа в электрическом разряде: пат. 1756267 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / Н.Д. Быстров, О.А. Журавлёв, А.И. Кравцов - № 4862812; заявл. 26.08.90; опубл. 23.08.92. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/175/1756267.html>.
115. Устройство для получения озона: пат. 2103225 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / Манфред Римплер - № 93058273/25; заявл. 11.12.92; опубл. 27.01.98. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555327997551.
116. Устройство для получения озона в электрическом разряде: пат. 2118938 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / Ю.П. Пичугин - № 95109197/25; заявл. 05.06.95; опубл. 27.07.98. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1555328069937.
117. Филиппов, Ю.В. Электросинтез озона / Ю.В. Филиппов, В.А. Вобликова, В.И. Пантелеев. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. – 237 с.
118. Шаланова, Е.А. Комплексное использование окислителей в технологии очистки воды / Е.А. Шаланова, П.С. Сёмин, Е.Э. Димитров, К.Г. Тютюшев //

- Современные тенденции развития науки и технологий. - 2017. - № 2-3. - С. 57-59.
119. Шапиро, С.В. Высокочастотный озонатор с адиабатическим охлаждением (методом Джоуля-Томпсона) / С.В. Шапиро, С.А. Дунаев, А.Ш. Амирханов // «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». Материалы Первой Всероссийской конф. – М.: Изд-во ЧеРо-2005, «Книжный дом Университет», 2005 – С. 140-141.
120. Электрогазодинамическое устройство: пат. 2200126 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 / Пичугин Ю.П. - № 2001133509/12; заявл. 07.12.01; опубл. 10.03.2003, Бюл. № 7.
121. Электрод генератора озона: пат. 2370433 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 / В.Н. Антонов, В.В. Данилин, М.П. Кокуркин, М.Г. Морозов, М.А. Семин - № 2007137264/15; заявл. 10.10.07; опубл. 20.04.09, Бюл. № 29.
122. Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учеб. для вузов / И.М. Бортник, И.П. Верещагин, Ю.Н. Вершинин и др.; Под ред. И.П. Верещагина, В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 543 с.
123. Control system for corona discharge ozone generating unit: пат. 3899684 США: МКИ С 01 В 13/12, F 25 В 9/02 [Электронный ресурс] / R. Tenney. - № 475760; заявл. 03.06.74; опубл. 12.08.75. – Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/US3899684>.
124. Ghazanchaei, M.R. Quasi-stationary numerical model of the dielectric barrier discharge / M.R. Ghazanchaei, K. Adamiak // Journal of Electrostatics. - Cocoa Beach, FL, USA. - 2013.
125. Ghazanchaei, Mohammadreza. Secondary Electrohydrodynamic Flow Generated by Corona and Dielectric Barrier Discharges. - 2015. (URL: <http://ir.lib.uwo.ca/etd/3295>).
126. Guerra-Garcia, C. Gas-Confined Barrier Discharges: a Simplified Model for Plasma Dynamics in Flame Environments / C. Guerra-Garcia, M Martinez-Sanchez // Journal of Physics D: Applied Physics. - 2013. - Vol. 46. - No. 34.

127. Ican Ozone [Электронный ресурс] / Ican Ozone Suppliers and Manufacturers at Alibaba.com. – Режим доступа: www.alibaba.com/showroom/ican-ozone.html.
128. Suzuki, M. On the nature of chemical reaction in silent discharge II / M. Suzuki, Y. Naito // Proc. Japan Acad. - 1952. - Vol. 26. - No. 9. - P. 20-24.
129. Brandenburg, R. Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and singlefilaments / R. Brandenburg // Plasma Sources Science and Technology. - 2017. - Vol. 26. - 29 pp. (URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aa6426>).
130. Rip G. Rice. Evolution of ozone for the bleaching of paper pulps / G. Rice Rip, Jeff Rounsaville // Ozone: Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association. - 1996. - Vol. 18. - Issue 6. - P. 549-566.
131. Kogelschatz, U. Dielectric-Barrier Discharges. Principle and Applications / U. Kogelschatz, B. Eliasson, W. Egli // Journal de Physique IV Colloque. - 1997. - 07 (C4). - P. C4-47-C4-66.
132. Kogelschatz, U. Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications / U. Kogelschatz // Plasma Chemistry and Plasma Processing. - 2003. - Vol. 23. - No. 1. - P. 1–46.
133. Kozlov, V. Nanosecond Surface Corona Discharge for Different Types of Strip Electrodes and Ceramic or Polymer Dielectrics / V. Kozlov, M. Sokolova, M.V. Temnikov, Alexander V. Timatkov, V.P. Vereshchagin // Plasmas and Polymers. - 2003. - Vol. 8. - No. 3. - P. 179-197.
134. Tay, W.H. Electrical Characteristics and Modeling of a Filamentary Dielectric Barrier Discharge in Atmospheric Air / W.H. Tay, S.L. Yap, C.S. Wong // Sains Malaysiana. - 2014. - Vol. 43(4). - P. 583–594.

Приложение А. Акты о внедрении результатов диссертации в практическую
деятельность

Общество с ограниченной ответственностью
«Компас»

ИНН 5904357780 ОГРН/КПП 1175958049970/590401001
РФ, Пермский край, 614990, г. Пермь, ул. Героев Хасана, 74а,
Тел. +7(902)839-31-91; (342) 205-56-59,
Email: director@kompaskom.ru

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Компас»
Кыров В.В.

Дата 03.11.18г.



А К Т

о внедрении результатов
кандидатской диссертационной работы

Комиссия в составе:

председатель – Кыров Виталий Владимирович, директор,
составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы

Матонина Алексея Николаевича

«Исследование систем генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, а именно:
разработанные разрядные камеры систем генерации озона, в которых использованы
электроды, обладающие повышенным активным сопротивлением, внедрены в практику
деятельности ООО «Компас»

Представленные в диссертации разработки использовались при создании озонаторных
установок, используемых, в частности, при проведении исследовательской работы по
изучению химической модификации органической массы, посредством озонирования.

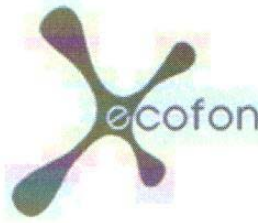
Использование разрядных камер с высокоомными электродами позволяет повысить
энергоэффективность и надёжность озонаторных установок.

Председатель комиссии

Члены комиссии

Общество с ограниченной ответственностью
«Экологический фон»

ИНН 2130043979
КПП 213001001



428018, Чувашская Республика, г.
Чебоксары, ул. Нижегородская, д. 4
оф.210
Телефон: (8352)37-48-75, 65-50-96
e-mail: ecofon@mail.ru
www.eco-fon.ru

УТВЕРЖДАЮ
директор ООО «ЭКОФОН»
А.В. Лаврентьев



«21» ноября 2018 г.

А К Т

о внедрении результатов
кандидатской диссертационной работы

Комиссия в составе:

председатель – Лаврентьев Александр Васильевич, директор ООО «ЭКОФОН»

члены комиссии:

Нарзаева Светлана Николаевна, менеджер ООО «ЭКОФОН».

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы

Матюнина Алексея Николаевича

«Исследование систем генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, а именно: разработанные разрядные камеры систем генерации озона, в которых использованы электроды, обладающие повышенным активным сопротивлением, внедрены в практику деятельности ООО «Экологический фон».

Представленные в диссертации разработки использовались при создании озонаторных установок, используемых для дезинфекции и дезодорации объектов.

Данные озонаторные установки демонстрируют хорошие эксплуатационные характеристики и надёжны в работе.

Председатель комиссии

Члены комиссии

Российская федерация

**“ЗАВОД”ЗАРЯД”**

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

462630, Россия, Оренбургская область, г.Гай, Орское шоссе, 15, тел/факс
(35362) 4-23-55; 3-16-88; ИНН/ КПП 5604009870 / 560401001; БИК 045354601,
р/с 40702810846310015104, к/с 30101810600000000601, Оренбургское отделение № 8623
ОАО «Сбербанка России» г.Оренбург.,

Утверждаю:

Директор ООО «Завод»Заряд»



П.М.Вусык

05 декабря 2018г.

АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертационной работы

Комиссия в составе

председатель— Горьканова Анна Васильевна , заместитель директора ООО «Завод»Заряд»;

члены комиссии :

Иванищев Владимир Иванович – мастер ООО «Завод»Заряд»,

Сыркин Андрей Юрьевич –наладчик ООО «Завод»Заряд»,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы

Матюнина Алексея Николаевича- «Исследования генерации озона в барьерном

разряде с высокоомными электродами» представленной на соискание ученой степени

кандидата технических наук, а именно : разработанные разрядные камеры систем

генерации озона, в которых использованы электроды, обладающие повышенным

активным сопротивлением, внедрены в производстве ООО «Завод» Заряд» для очистки

воды которая входит в состав многофункциональной жидкости «Вихрь» выпускаемой

заводом.

Системы генерации озона с высокоомными электродами- надежны, достаточно
энергоэффективны.

Председатель комиссии-

Члены комиссии

Приложение Б. Фотографии опытных образцов озонаторных установок с разрядными камерами с высоковольтными электродами



Рисунок П. Б. 1 – Фотографии опытного образца озонаторной установки с разрядными камерами с высоковольтными электродами и электронно коммутируемым источником питания.

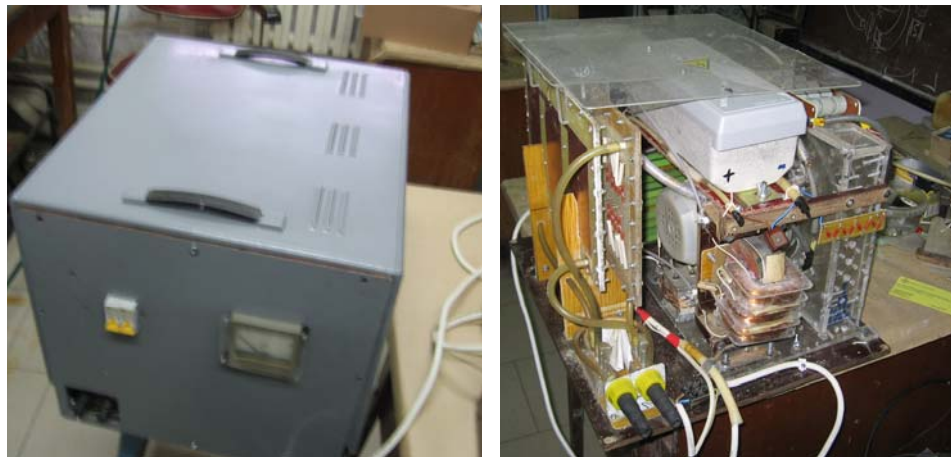


Рисунок П. Б. 2 – Фотографии опытного образца озонаторной установки с разрядными камерами с высоковольтными электродами и механически коммутируемым источником питания.