



БАРЬЕРНЫЕ И КОРОННЫЕ РАЗРЯДЫ – ГЕНЕРАТОРЫ ОЗОНА



THE STATE EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER
PROFESSIONAL EDUCATION
KYRGYZ-RUSSIAN SLAVIC UNIVERSITY

V.M. Lelevkin, A.V. Tokarev

**BARRIER AND CORONA
DISCHARGES –
OZONE GENERATORS**

Bishkek 2020

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.М. Лелевкин, А.В. Токарев

**БАРЬЕРНЫЕ И КОРОННЫЕ
РАЗРЯДЫ –
ГЕНЕРАТОРЫ ОЗОНА**

Бишкек 2020

УДК 533.521
ББК 26.23
Л 43

Рецензенты:

А.Ж. Жайнаков, д-р физ.-мат. наук, профессор, академик НАН КР,
Г.С. Денисов, д-р физ.-мат. наук, профессор КРСУ

Рекомендовано к изданию НТС КРСУ

Лелевкин В.М., Токарев А.В.

Л 33 БАРЬЕРНЫЕ И КОРОННЫЕ РАЗРЯДЫ – ГЕНЕРАТОРЫ ОЗОНА. – Бишкек:
Изд-во КРСУ, 2020. 230 с.

ISBN 978-9967-19-702-2

В монографии приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований, проводимых на кафедре «Физика и микроэлектроника» и в лаборатории «Плазменные технологии» Кыргызско-Российского Славянского университета.

Разработаны конструкции озонаторов и проведен теоретический анализ физических процессов, протекающих в плазмохимических реакторах озонаторов, работающих на основе барьерных, барьерно-поверхностных и коронных разрядов в кислороде и воздухе при атмосферном давлении. Рассмотрены вопросы, связанные с характеристиками синтеза озона в барьерно-поверхностных разрядах, реализуемых на поверхности диэлектриков из полимерных материалов. Показано, что барьерно-поверхностные разряды являются эффективными устройствами в технологиях получения озона высоких концентраций. Определены особенности теплообмена в озонаторе на поверхностном разряде с коронирующим электродом. Рассмотрены характеристики барьерного разряда в трансформаторе и определены параметры синтеза озона. Исследованы характеристики синтеза озона в коронных разрядах коаксиальной геометрии с высокотемпературным коронирующим электродом, в импульсных периодических и факельных коронных разрядах.

Монография предназначена для широкого круга научных работников, инженеров и технологов, занимающихся вопросами физики и химии газоразрядной плазмы, а также может быть полезна в качестве учебного пособия преподавателям, аспирантам и студентам старших курсов, специализирующимся по направлениям «Физика плазмы», «Физика газового разряда», «Теплофизика».

Л 1805040400-19

ISBN 978-9967-19-702-2

УДК 533.521 (575.2) (04)
ББК 26.23

© ГОУВПО КРСУ, 2020

© Лелевкин В.М., Токарев А.В., 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	7
Основные обозначения	9
ОЗОН, ЕГО СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ	10
1. Кратко об озоне	11
1.1. Открытие озона.....	11
1.2. Некоторые свойства озона	12
1.3. Озон в составе воздуха	13
1.4. Действие озона	16
1.5. Применение озона	16
2. Устройства для получения озона	17
2.1. Озонатор.....	17
2.2. Ионизатор.....	19
3. Электрические разряды – генераторы озона	19
3.1. Молния	19
3.2. Искра.....	20
3.3. Тлеющий разряд	20
3.4. Дуговой разряд	21
3.5. Высокочастотный индукционный электрический разряд	21
3.6. Сверхвысокочастотный (микроволновой) разряд	22
3.7. Оптический разряд.....	23
3.8. Коронный разряд	24
3.9. Барьерный разряд	27
1. БАРЬЕРНЫЙ РАЗРЯД – ГЕНЕРАТОР ОЗОНА.....	30
1.1. Барьерный поверхностный разряд с плазменным индукционным электродом	30
1.2. Синтез озона в комбинированных разрядах	38
1.3. Синтез озона в разряде на полимерных диэлектриках	45
1.4. Генератор озона с подвижным барьером	58
1.5. Гибридные озонаторы на основе барьерного разряда в трансформаторе.....	66
1.6. Синтез озона в высокочастотном барьерном разряде.....	77
1Т. ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА	85
1. Экспресс-стерилизация медицинского инструмента.....	85
1.1. Современные методы стерилизации.....	85
1.2. Технология экспресс-стерилизации.....	86
2. Барьерный разряд в технологии изделий из полимерных материалов	88
2.1. Плазменная модификация поверхности полимерных материалов.....	88
2.2. Возбуждение барьерного разряда на поверхность полимеров	90
3. Выбор параметров и материала диэлектрика для озонатора	96
3.1. Параметры, влияющие на образования озона	96
3.2. Выбор материала диэлектрика	98
4. Высоковольтные источники для синтеза озона.....	99
4.1. Источники питания озонаторных установок	99

4.2. Тиристорный источник питания в барьерном разряде	101
4.3. Квазирезонансный источник питания барьерного разряда	102
4.4. Квазирезонансный источник питания на коронном разряде.....	105
4.5. Источник импульсного периодического коронного разряда	105
2. КОРОННЫЙ РАЗРЯД – ГЕНЕРАТОР ОЗОНА.....	108
2.1. Синтез озона в коронных разрядах коаксиальной геометрии.....	109
2.2. Коронный разряд с высокотемпературным коронирующим электродом	112
2.3. Импульсный периодический коронный факельный разряд	126
2.4. Синтез озона в коронном факельном разряде.....	138
2.5. Линейный коронный факельный разряд	147
2.6. Синтез озона в линейном коронном факельном разряде.....	158
2.7. Моделирование линейного коронного факельного разряда	166
2.8. Взаимодействие линейного коронного факельного разряда с водой	177
2Т. ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ КОРОННОГО РАЗРЯДА	185
1. Импульсный коронный разряд для создания газовых лазеров.....	185
2. Ионизатор воздуха на коронном разряде	186
2.1. Экспериментальная установка.....	187
2.2. Методы измерений	189
2.3. Электрические характеристики	189
2.4. Определение концентрации аэроионов и озона	190
3. Синтез наноразмерных частиц золота в коронном разряде.....	192
3.1. Экспериментальная установка и методы исследования.....	192
3.2. Изменение структуры поверхности алюминия	194
3.3. Разложение перекиси водорода на алюминии	196
4. Газофазный синтез nanoоксида молибдена.....	199
4.1. Установка для синтеза оксида молибдена.....	199
4.2. Морфология оксида молибдена	199
5. Электроочистка газов в поле коронного разряда	202
5.1. Электрическая очистка газа.....	202
5.2. Линейный коронно-факельный разряд в запыленном газе	203
5.3. Сравнение эффективности очистки газов	205
6. Контроль состояния поверхности стальных канатов	205
6.1. Методика неразрушающего контроля	205
6.2. Датчик порывов проволок	206
6.3. Результаты измерений.....	206
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	210
ЛИТЕРАТУРА.....	214
1. Барьерный разряд	214
2. Коронный разряд	218
Reviewers.....	224
CONTENT.....	225
CONCLUSION.....	227

ПРЕДИСЛОВИЕ

В монографии представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований озона, проводимые в Кыргызско-Российском Славянском университете на кафедре «Физика и микроэлектроника» и в лаборатории «Плазменные технологии». В монографию включены разделы лекций по физике плазмы, читаемые студентам, магистрантам и аспирантам университета.

Проведен анализ физических и химических процессов, протекающих в плазмохимических реакторах, на основе барьерных, барьерно-поверхностных и коронных разрядов в кислороде и воздухе при атмосферном давлении. Рассмотрены вопросы, связанные с изменением характеристик синтеза озона в барьерно-поверхностном разряде, с применением диэлектриков из полимерных материалов и на поверхностном разряде с коронирующим электродом. Проведен анализ изменения характеристик горения барьерного разряда в трансформаторе, гибридных озонаторах и определены параметры синтеза озона. Разработаны озонаторы для синтеза озона в коронных разрядах коаксиальной геометрии с высокотемпературным коронирующим электродом. Исследованы особенности получения озона в импульсных периодических и факельных коронных разрядах.

Цель работы:

- привлечь внимание студентов, аспирантов и молодых ученых университета к уникальным свойствам озона, его получению и применению;
- обобщить результаты экспериментальных и теоретических исследований барьерных и коронных разрядов, проводимых на кафедре «Физика и микроэлектроника» и в лаборатории «Плазменные технологии» КРСУ;
- описать устройства (озонаторы), разработанные на основе коронных, барьерных, барьерно-поверхностных, гибридных, импульсно-периодических коронных разрядах, линейных коронных факельных разрядов и конструкции высоковольтных квазирезонансных источников питания, используемых для получения озона в учебных и практических целях;
- провести теоретический и экспериментальный анализ теплофизических процессов, протекающих в плазмохимических реакторах, с применением барьерных и коронных электрических разрядов и определить оптимальные режимы работы озонаторов в приложении к синтезу озона;
- рассмотреть возможные технологии применения барьерных и коронных разрядов в современных условиях в науке, технике и быту;
- предложить практические конструкции высоковольтных квазирезонансных источников питания для плазмохимических реакторов, применяемых для получения озона.

В *вводном разделе* приведены общие характеристики озона, его свойства, способы его получения и применения, которые в основном взяты из различных литературных источников, учебников и интернета.

В *главе 1* изложены результаты экспериментальных разработок озонаторов на основе различных типов барьерных разрядов.

В *главе 2* рассмотрены конструкции озонаторов с использованием коронных разрядов. Для оценок характеристик плазмы коронных разрядов и сравнения результатов

расчета с экспериментом разработаны упрощенные газодинамические модели – равновесная и двухтемпературная.

В *разделах 1Т и 2Т* описаны технологии применения барьерного и коронного разрядов, приведены результаты экспериментальных исследований озона, полученные при разработке конструкций озонаторов и технологий синтеза озона на основе барьерных и коронных разрядов. Использование результатов исследований, связанных с физикой горения барьерных и коронных разрядов, получением озона и развитием новых технологий, например, стерилизации медицинских инструментов, нанесения покрытий на полимерные материалы, обеззараживании питьевой воды, работы электрофильтров, синтеза наночастиц, ионизации воздуха, создании газовых лазеров и высоковольтных источников питания озонаторных установок, может представлять определенный интерес для специалистов.

Книга рассчитана на научных работников, инженеров, аспирантов и студентов, специализирующихся в области физики плазмы, плазменных технологий, получении и применении озона. Предлагаемые конструкции озонаторов на основе коронных, барьерных, барьерно-поверхностных, гибридных, импульсно-периодических, линейных факельных разрядов, а также анализ полученных результатов носят в ряде случаев поисковый характер. Некоторые выводы и результаты, возможно, не являются общепринятыми, а выражают точку зрения авторов и подлежат дополнительному обсуждению.

Авторы выражают благодарность ***В.И. Гибалову, Н.Ж. Кайрыеву, Э.Б. Кулумбаеву, Ю.А. Лебедеву, В.А. Юданову*** за участие в проводимых исследованиях и обсуждении полученных результатов.

Все замечания и предложения по содержанию монографии, просим направлять по адресу: 720000, Кыргызская Республика, г. Бишкек, ул. Киевская 44, КРСУ.
т. +(996 312) 431175, факс: +(996 312) 431169,
e-mail: krsu@krsu.edu.kg; lelevkin44@mail.ru; tokarev_andrean@mail.ru

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

БР – барьерный разряд

БПР – барьерный поверхностный разряд

БПРПЭ – барьерный поверхностный разряд с плазменным индукционным электродом

ВАХ – вольт-амперные характеристики

КЭР – комбинированный электрический разряд

ПНП – полиэтилен низкой плотности

ЭД – электростатический двигатель

ГО – гибридный озонатор

КФР – коронный факельный разряд

ИКР – импульсный периодический коронный факельный разряд

ЛКФР – линейный коронный факельный разряд

ИР – иницирующий разрядник

РУ – разрядный узел

ГДЭ – газодинамический электрофилтр



ОЗОН, ЕГО СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ

В настоящее время во многих ведущих научных и технологических центрах индустриальных стран мира проводятся исследования озона, изучаются его уникальные свойства, которые человечеству подарила сама природа. Еще в древности во время грозы была замечена удивительная связь между электрическими разрядами – молниями и свежим «божественным» воздухом.

Озон образуется в атмосфере Земли не только при воздействии электрических разрядов на кислород, но и при попадании солнечных лучей на капельки воды (рисунок 1). Характерный запах озона ощущается во время грозы, в сосновом лесу и в местах большого скопления воды, где содержание кислорода в воздухе велико, особенно у водопадов, по берегам горных рек, озер, морей и океанов.

Озон – сильнейший окислитель, который очищает воздух от микробов, вирусов, плесени и различных примесей, а сам при этом разлагается на полезные для жизни человека химические элементы: кислород и воду. Отметим, что большую роль озон играет в верхних слоях атмосферы на высотах 10–50 километров. Под действием излучения Солнца из молекул кислорода в результате фотохимических реакций в стратосфере образуется слой озона или, как его еще называют, – озоносфера, которая защищает биосферу Земли от губительного воздействия жесткого ультрафиолетового и космического излучений (рисунок 2). Международный день охраны озонового слоя отмечается с 1987 г., после подписания Монреальского протокола.

Широкое применение в нашей жизни озон получил благодаря научным исследованиям и новым техническим разработкам озонаторов – устройств для генерации озона. Сейчас во многих развитых странах серийно выпускаются различные конструкции устройств для озонирования воздуха, воды, продуктов питания и потребления. В этом направлении большую координационную работу проводит Международная озоновая ассоциация, которая регулярно в своих публикациях, на конгрессах и съездах представляет современные разработки и новейшие достижения, посвященные получению и применению озона, например, для озонирования воды, масел, продуктов питания, для дезинфекции и стерилизации помещений, лечения различных заболеваний и т. д.

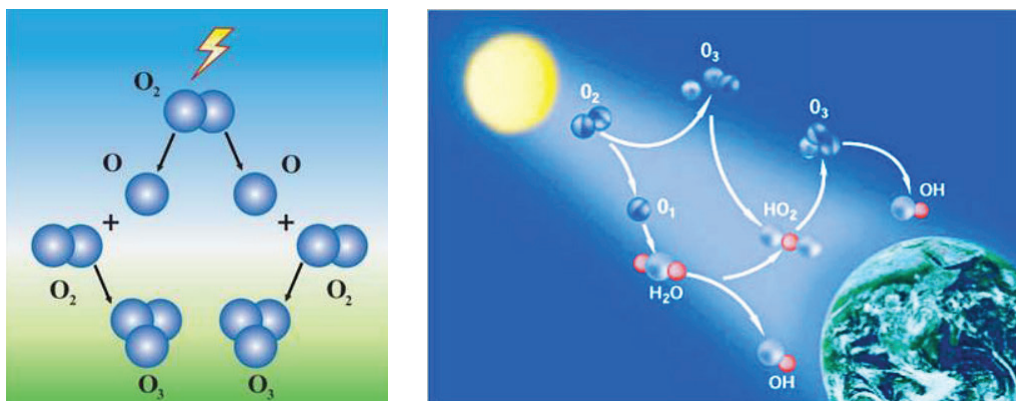


Рисунок 1 – Схемы образования озона в атмосфере Земли (взято из интернета)

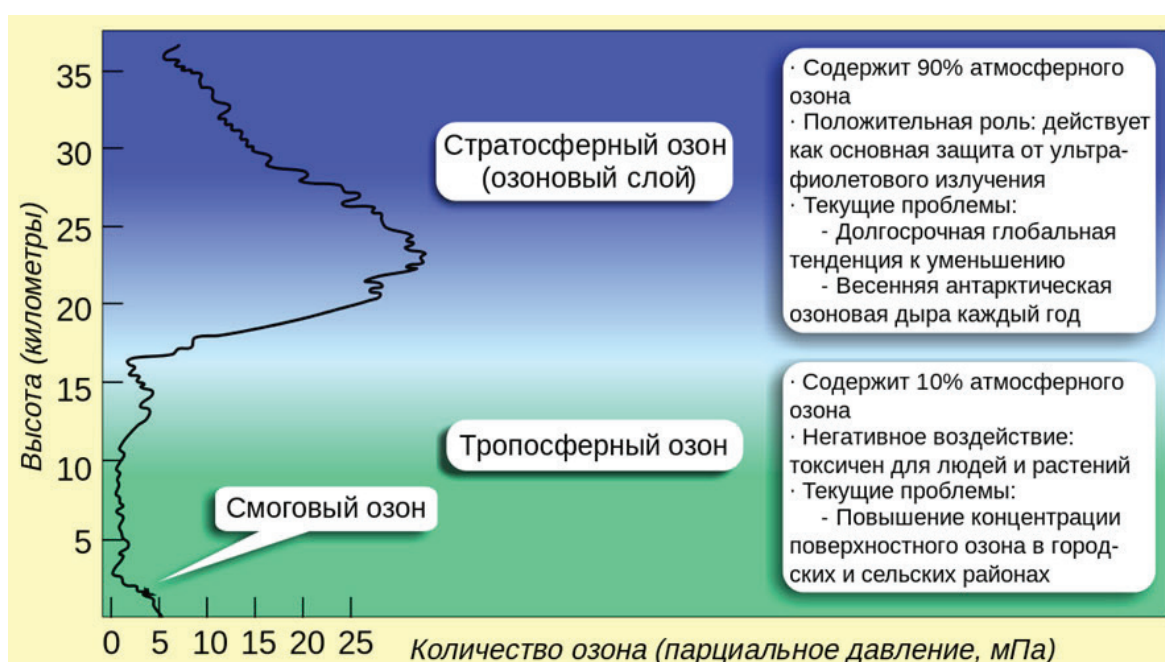


Рисунок 2 – Озон в атмосфере Земли (рисунок из Википедии)

1. Кратко об озоне

Озон (древнегреч. ὄζω, ozon, что означает «пахнуть») – это газ, состоящий из трёх-атомных молекул кислорода.

При нормальных условиях озон представляет собой газ голубого цвета. При сжигании газ озон превращается в жидкость тёмно-сине-фиолетового цвета, цвет индиго (рисунок 3). В твёрдом состоянии озон представляет собой тёмно-синие, практически чёрные кристаллы с фиолетовым отблеском (рисунок 3).

1.1. Открытие озона

История открытия озона и его свойства хорошо изложены во многих статьях, учебниках и монографиях [1–5]. Приведем некоторые основные исторические этапы.

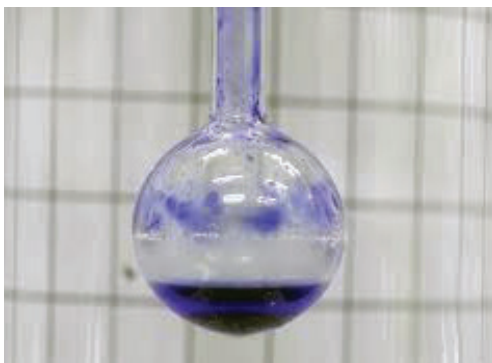


Рисунок 3 – Озон в жидком состоянии (слева в колбе) и в виде кристаллов (справа) (рисунок из Интернета)

В 1785 г. голландский физик Мартин Ван-Марум проводил опыты с электричеством, пропуская через воздух электрические искры (молнии в миниатюре). По характерному запаху он впервые обнаружил неизвестный газ с сильными окислительными свойствами, который, по его мнению, представлял особую «материю электричества».

В 1840 г. немецкий ученый химик Х.Ф. Шейнбейн при разложении воды на кислород и водород с помощью электрической дуги, повторно обнаружил газ со специфическим запахом, которому он и дал название «озон», что в переводе означает – «пахнущий».

В 1845 г. де Ларив и де Мориньяк показали, что газ озон – это тот же кислород, но находящийся в особом состоянии.

В 1865 г. Дж.Л. Сорет установил, что молекула озона состоит из трех атомов кислорода.

1.2. Некоторые свойства озона

Озон, химическая формула O_3 , является аллотропной модификацией кислорода (рисунок 4), содержащей в молекуле три атома кислорода (O). В естественных условиях озон образуется в воздухе из молекулярного кислорода (O_2) под действием электрических разрядов или при воздействии ультрафиолетового излучения Солнца. Исходным веществом для синтеза озона является молекулярный кислород, а сам процесс описывается реакциями, которые впервые были предложены С. Чепменом в 1930 г:

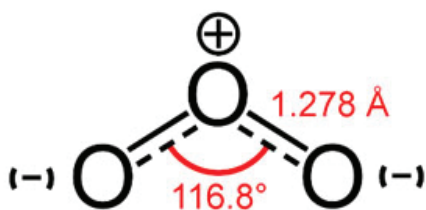
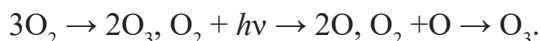
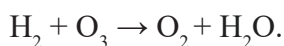


Рисунок 4 – Молекула озона, состоящая из трех атомов кислорода (рисунок из Википедии)

Исходным веществом для синтеза озона является молекулярный кислород, а сам процесс описывается реакциями, которые впервые были предложены С. Чепменом в 1930 г:



Образование озона является эндотермической легкообратимой реакцией. Естественный озон в воздухе самопроизвольно распадается на воду и активный атомарный кислород, который сам является сильнейшим окислителем. При взаимодействии озона с молекулами водорода образуются молекулы кислорода и воды:



Содержание озона в воздухе уменьшается в два раза уже через 10 мин, а в воде озон распадается на 50 % через 30 мин, образуя гидроксильную группу и воду. Отметим, что при больших концентрациях самопроизвольное разрушение озона может носить взрывной характер.

Запах озона резкий, специфический – «металлический», а запах «свежести» отчетливо чувствуется в атмосфере воздуха при незначительном содержании озона (менее 10 %) и ассоциируется, чаще всего, со свежим запахом грозы. На самом деле «аромат грозы» – это аромат озона, который образуется как следствие воздействия электрических разрядов молнии на молекулы воздуха или лучей солнца на капельки воды.

Озон тяжелее кислорода в 2,5 раза, его молярная масса 47,998 г/моль.

Молекула озона полярная, электрический дипольный момент 0,5337 Д.

В газообразном состоянии озон диамагнитен, а в жидком состоянии парамагнитен.

Растворимость в воде при 0 °С составляет ~0,394 кг/м³ или 0,494 л/кг, что в 10 раз выше по сравнению с кислородом.

Плотность:

газообразный озон при нормальных условиях – 0,0021445 г/см³,

жидкий озон при –188,0 °С (85,2К) – 1,59 г/см³,

твёрдый озон при –195,7 °С (77,4К) – 1,73 г/см³.

Температура:

кипения – 111,8 °С (161,3К),

плавления – 197,2 °С (75,9К).

Коэффициент диффузии – 0,157 см²/с.

Энергия ионизации молекулы – 12,52 эВ.

Молекулярная теплоёмкость – 85,354 Дж/(моль·К).

Диэлектрическая проницаемость – 1,0019.

1.3. Озон в составе воздуха

Рассмотрим изменение концентрации озона, атомарного кислорода и других компонент газов в составе воздуха в зависимости от температуры при атмосферном давлении. Для этого, с помощью программного комплекса ТЕРРА, проведем расчет состава воздуха.

Как видно на рисунке 5 и в таблицах 1, 2, при термическом нагреве воздуха происходит интенсивное образование молекул азота, кислорода, водорода, озона и других компонент газов, входящих в состав воздуха. При температурах выше 2000К происходит разложение молекул кислорода, что приводит к резкому увеличению концентрации озона и атомарного кислорода. Максимальная концентрация озона наблюдается при температурах ~3700К. При дальнейшем нагреве воздуха начинается процесс интенсивного разложения озона на составные части и при температурах выше 6000К концентрация озона в воздухе практически незначительна. Поэтому для эффективного синтеза озона необходимо поддерживать температуру воздуха при атмосферном давлении в интервале 2500–5500К.

Молекулярный кислород, озон, атомарный кислород относятся к электроотрицательным газам и легко присоединяют к себе свободные электроны. Образование и разложение электроотрицательной молекулы кислорода происходит практически в таком же интервале температур, что и молекулы озона.

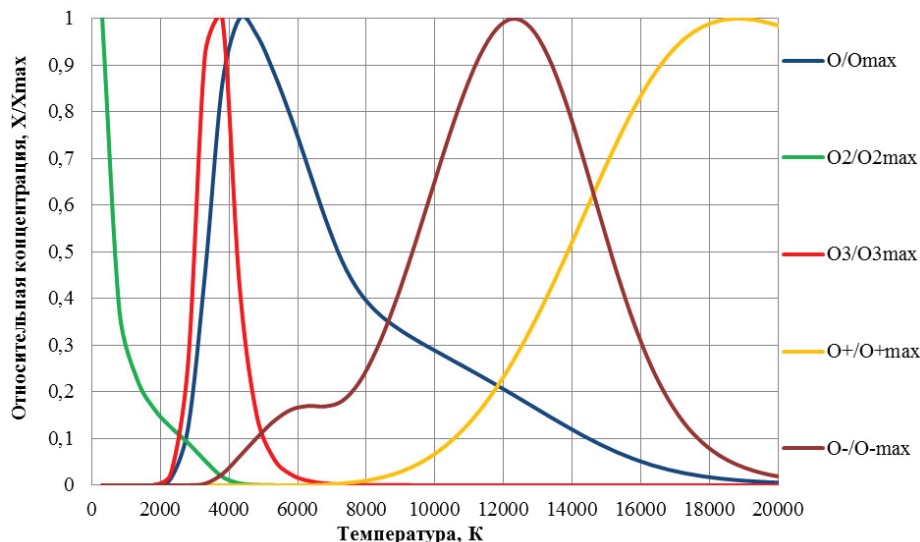


Рисунок 5 – Зависимость концентрации молекул, атомов и ионов кислорода от температуры:
 $O_{2\max} = 4,6 \cdot 10^{18}$, $O_{3\max} = 2,0 \cdot 10^9$, $O_{\max} = 4,6 \cdot 10^{17}$, $O^-_{\max} = 2,5 \cdot 10^{12}$, $O^+_{\max} = 3,3 \cdot 10^{16}$, см^3

Таблица 1 – Состав газовой фазы компонент кислорода, см^3

T, °K	O ₂	O	O ₃	O+	O-
300	4,5733E+18	0,0	0,0	0,0	0,0
800	1,715E+18	314797	0,0	0,0	0,0
1300	1,0543E+18	4,2905E+11	1277,09	0,0	0,0
1800	7,5409E+17	2,1191E+14	1113160	0,0	84,562
2300	5,6948E+17	6,6465E+15	48416600	0,0	2066470
2800	4,1518E+17	5,6247E+16	501879000	374,459	348296000
3300	2,4013E+17	2,0949E+17	1787050000	401226	9229430000
300	8,3732E+16	3,956E+17	1931450000	59233700	6,1299E+10
4300	1,9239E+16	4,5969E+17	831732000	2330740000	1,5647E+11
4800	4,4626E+15	4,4384E+17	291608000	3,9906E+10	2,5792E+11
5300	1,2242E+15	4,0686E+17	110541000	3,9403E+11	3,4871E+11
5800	3,8777E+14	3,625E+17	45199900	2,6123E+12	4,1123E+11
6300	1,344E+14	3,1309E+17	18918300	1,268E+13	4,3231E+11
6800	4,9557E+13	2,6291E+17	7950000	4,631E+13	4,298E+11
7300	1,996E+13	2,2019E+17	3548370	1,2479E+14	4,5979E+11
7800	9,2255E+12	1,9026E+17	1834060	2,602E+14	5,6396E+11
8300	4,8968E+12	1,7084E+17	1109840	4,7144E+14	7,4068E+11
8800	2,8709E+12	1,5719E+17	747285	7,9168E+14	9,7378E+11
9300	1,7944E+12	1,462E+17	534173	1,2577E+15	1,2468E+12
9800	1,1693E+12	1,3638E+17	393962	1,9061E+15	1,5419E+12
10300	7,8305E+11	1,2702E+17	294561	2,7713E+15	1,8385E+12
10800	5,3315E+11	1,1773E+17	220454	3,8834E+15	2,1123E+12
11300	3,6576E+11	1,0832E+17	163397	5,2645E+15	2,337E+12
11800	2,508E+11	9,8658E+16	118778	6,9263E+15	2,487E+12
12300	1,7063E+11	8,8744E+16	83920,0	8,8672E+15	2,5416E+12
12800	1,1441E+11	7,8654E+16	57153,3	1,1071E+16	2,49E+12
13300	7,5174E+10	6,8549E+16	37250,1	1,3504E+16	2,3348E+12
13800	4,817E+10	5,865E+16	23099	1,6117E+16	2,0931E+12
14300	2,9997E+10	4,9209E+16	13572,6	1,8839E+16	1,7939E+12
14800	1,8118E+10	4,047E+16	7541,09	2,1578E+16	1,4719E+12
15300	1,0609E+10	3,2633E+16	3963,09	2,4216E+16	1,1595E+12

15800	6031860000	2,583E+16	1976,0	2,6628E+16	8,809E+11
16300	3342080000	2,0114E+16	940,508	2,8701E+16	6,4917E+11
16800	1814720000	1,5457E+16	431,204	3,0357E+16	4,6717E+11
17300	972393000	1,1766E+16	192,534	3,1572E+16	3,3058E+11
17800	517955000	8,9067E+15	84,686	3,2369E+16	2,3152E+11
18300	276125000	6,7291E+15	37,0858	3,2804E+16	1,6138E+11
18800	148165000	5,0895E+15	16,314	3,2944E+16	1,1248E+11
19300	80370500	3,8626E+15	7,25866	3,2856E+16	7,8649E+10
19800	44205800	2,9464E+15	3,2826	3,2597E+16	5,5313E+10
20300	24702200	2,2616E+15	1,5137	3,2212E+16	3,919E+10

Таблица 2 – Состав газовой фазы электронов и компонент кислорода, см³

T, °K	e-	O ⁺⁺	O ₂ ⁺	O ₂ ⁻	N ₂ O ₃
300	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
800	0,0	0,0	0,0	0,0	354,858
1300	0,0	0,0	0,0	0,0	43059,3
1800	17391	0,0	0,0	1229,09	359726
2300	1,53E+08	0,0	6658,42	3178040	1141970
2800	1,53E+10	0,0	3415560	119338000	2047030
3300	3,5E+11	0,0	214028000	949108000	1892940
3800	3E+12	0,0	2824130000	1,885E+09	669479
4300	1,34E+13	0,0	12523300000	1,374E+09	115177
4800	4,07E+13	0,0	32851200000	726202000	18620,3
5300	9,74E+13	0,0	67125400000	370679000	3542,86
5800	1,95E+14	0,0	1,16222E+11	188092000	749,584
6300	3,41E+14	0,0	1,74261E+11	93078400	156,782
6800	5,54E+14	0,0	2,23167E+11	46521100	29,6573
7300	9,38E+14	0,0	2,37843E+11	26879600	5,14709
7800	1,72E+15	0,0	2,23439E+11	19503300	0,919548
8300	3,16E+15	0,579833	2,05573E+11	16535000	0,18606
8800	5,56E+15	9,88042	1,92099E+11	14970600	0,04345
9300	9,26E+15	124,205	1,81599E+11	13800700	0,0114919
9800	1,47E+16	1214,11	1,72259E+11	12681100	0,0033521
10300	2,21E+16	9590,33	1,62993E+11	11491100	0,0010503
10800	3,19E+16	63127,9	1,53182E+11	10195500	0,0003447
11300	4,41E+16	355202	1,42474E+11	8802250	0,0001156
11800	5,89E+16	1745410	1,30715E+11	7350170	0,0000388
12300	7,58E+16	7627820	1,17935E+11	5900880	0,0000127
12800	9,42E+16	30112000	1,04343E+11	4528640	3,98171E-06
13300	1,13E+17	108805000	90301500000	3305680	1,20421E-06
13800	1,32E+17	363815000	76277300000	2286220	1,09724E-06
14300	1,49E+17	1135410000	62773300000	1494880	9,98612E-07
14800	1,63E+17	3327560000	50256000000	924082	9,10529E-07
15300	1,75E+17	9193890000	39103300000	541361	8,34225E-07
15800	1,83E+17	24003700000	29570300000	302064	7,69788E-07
16300	1,88E+17	59320800000	21767100000	161722	7,16306E-07
16800	1,9E+17	1,39044E+11	15650900000	83854,9	6,72261E-07
17300	1,91E+17	3,09948E+11	11046900000	42541,8	6,35929E-07
17800	1,9E+17	6,59302E+11	7698680000	21329,6	6,05676E-07
18300	1,88E+17	1,34325E+12	5327820000	10663,4	5,80112E-07
18800	1,85E+17	2,63104E+12	3679740000	5354,31	5,58126E-07
19300	1,82E+17	4,97178E+12	2546600000	2715,19	5,38864E-07
19800	1,79E+17	9,09214E+12	1771180000	1395,96	5,21681E-07
20300	1,76E+17	1,61347E+13	1240480000	729,515	5,06089E-07

Отметим, что максимальная концентрация сильнейшего окислителя – атомарного кислорода несколько сдвинута в область высоких температур ($T \sim 4500\text{K}$) и, в отличие от озона, достаточно большие концентрации атомарного кислорода наблюдаются вплоть до температур $\sim 10000\text{K}$.

1.4. Действие озона

Озон вычищает воздух, обеззараживает его от микробов и вирусов, окисляет и устраняет находящиеся в воздухе примеси. Для человека благоприятна и безопасна невысокая концентрация озона в пределах 0,5–2,5 PPM (0,0001 мг/л). Норма содержания озона в атмосфере воздуха $\sim 0,16 \text{ мг/м}^3$, а среднесуточное содержание 0,03 мг/м³. Вода, рекомендованная для питья после озонирования, имеет слабощелочную реакцию $\text{pH} = 7,5\text{--}9,0$. После озонирования содержание кислорода в воде может увеличиваться почти в 12 раз.

Когда уровень озона в воздухе достигает 10 % и выше, то это становится опасным для здоровья человека. Появляются типичные признаки химического отравления, такие как головная боль, раздражение слизистых оболочек, головокружение. При концентрации газа выше 8–9 мкг/л у человека возможен отек легких, и даже его смерть. При больших концентрациях запах озона уже напоминает запах хлора.

Несмотря на атомарную близость к живительному кислороду, озон по степени своей потенциальной опасности для человека, превосходит боевые отравляющие вещества – хлор и синильную кислоту. Озон разрушает любую присутствующую в воздухе и воде патогенную микрофлору: бактерии, вирусы, микроорганизмы и грибки. Озон по бактерицидности занимает первое место среди таких веществ, как хлор или перекись марганца. Действие озона в смысле дезинфекции сходно с действием хлора, и используется в больницах и местах пребывания большого количества людей. Однако озон не имеет присущих хлору вредных побочных эффектов.

Бактерицидное действие озона связано с тем, что озон в воздухе самопроизвольно распадается и образует атомарный кислород, который является сильнейшим окислителем. Атомарный кислород губителен для одноклеточных паразитов и по своим свойствам уничтожения бактерий и вирусов в 2,5–6 раз эффективнее ультрафиолетовых лучей и в 300–600 раз эффективнее хлора.

1.5. Применение озона

Озон является сильным окислителем и его основное применение – это обеззараживание и дезинфекция воды, воздуха, продуктов питания, предметов быта [1–5]. В настоящее время 95 % питьевой воды в Европе обрабатывается озоном – она становится безопасной, прозрачной на вид и приятной на вкус. Применение озона по подготовке питьевой воды началось в 1898 г. в городе Сан Мор (Франция), где прошла испытание первая опытная промышленная установка. В 1901 г. в городе Висбаден фирмой «Сименс» была построена гидростанция с озонаторной установкой, а в 1907 г. стал работать завод по озонированию воды для нужд города Ниццы.

Сейчас во многих странах мира действуют более 1000 установок по озонированию питьевой воды, и идет постепенный процесс перевода с хлорирования воды на озонирование. Озонную подготовку проходит питьевая вода в Европе и США. В России,

например, действуют несколько крупных станций в Москве, Санкт-Петербурге, Нижнем Новгороде и других городах. Озон широко используется для очистки воды в аквариумах, на рыбных и креветочных фермах, при разливе бутилированной воды, а также для дезинфекции водоочистительных сооружений и бассейнов. В процессе реакций окисления озона образуется кислород, вода, оксиды других элементов, которые не загрязняют окружающую среду и не приводят к образованию канцерогенных веществ.

С помощью озона можно дезинфицировать любые предметы, одежду, продукты и вывести запах лакокрасочных материалов и табака. За несколько минут обувь избавляется от всех запахов, исчезает и грибок, который также является причиной запаха.

В медицине озон применяется в качестве антисептика для лечения гнойных ран, инфекций, туберкулеза и других заболеваний. Создано целое направление озонотерапии в медицине и косметологии. Озон – эффективный «убийца» бактерий и вирусов, который, частично разрушая их оболочку, прекращает процесс размножения и нарушает способность соединяться с клетками организма. Озонированное масло широко применяется при наружных и внутренних заболеваниях и повреждениях кожи, ранах, ожогах, для восстановления и заживления гастрита и язвы желудка.

Развиваются методы холодной озоновой стерилизации хирургических инструментов с микронной заточкой эндоскопического оборудования и катетеров, которые не выдерживают температурной обработки воздухом или паром под давлением. Технология озоновой стерилизации характеризуется низкой температурой газа (до ~50 °С), малым энергетическим потреблением (~120 Вт при объеме камеры 20 литров), не требует расходных материалов, подлежащих утилизации. Это тем более важно, что после окончания стерилизационного цикла озон превращается в кислород и воду. Разрабатываются оперативные методы стерилизации медицинского инструмента на основе совместного воздействия озона, ультрафиолетового излучения, атомарного кислорода и свободных гидроксильных радикалов.

Озон применяется в сельском хозяйстве: растениеводстве, животноводстве, рыбноводстве, кормопроизводстве и при хранении продуктов. С целью стимулирования жизнедеятельности живых организмов проводится озонная санация помещений животных и растений. Применение озона связано с подавлением жизнедеятельности вредных организмов, грибков и плесени. С помощью озона проводится обесцвечивание жидкостей или поверхностей твердых тел путем окисления органических и химических веществ.

2. Устройства для получения озона

Одним из широко распространенных способов получения озона для лабораторных, медицинских, бытовых, промышленных и других целей – это применение различных конструкций озонаторов и ионизаторов [1–5].

2.1. Озонатор

Озонатор (генератор озона) – *устройство для получения озона*. Впервые озонатор был предложен Сименсом в 1897 году. В настоящее время разработаны различные конструкции озонаторов на основе применения электрических разрядов. Результаты

исследований и обзор современного состояния устройств и теории озонаторов можно найти в работах [1–5].

Традиционно озон получают в озонаторах, работающих на барьерном или коронном типе разрядов. В озонаторах на барьерном разряде основная проблема сводится к созданию надежного и долговечного диэлектрического барьера, на котором происходит синтез озона. Однако в сильных переменных электрических полях диэлектрики быстро «стареют», что приводит к электрическому пробое и выходу озонатора из строя. В этом плане озонаторы на коронном разряде более надежны в работе, но отличаются большими габаритами за счет низкой удельной мощности разряда. Весьма существенным преимуществом озонаторов на коронном разряде является простота их конструкции, т. к. не требуется вводить в разрядный промежуток диэлектрический барьер (стекло, керамика, эмаль и т. п.).

В бытовых озонаторах озон вырабатывается в нужных концентрациях из воздуха с помощью электрических разрядов. При дыхании у человека появляется чувство свежести, легкости и вдыхать чистый воздух становится гораздо приятнее. Озон разрушает не только присутствующие в воздухе бактерии и вирусы, но и различные примеси, специфический запах, табачный дым, уничтожает моль и других насекомых. Сам озон быстро рассеивается в воздухе и распадается на безопасные соединения – кислород и воду, как в воздухе, так и в воде. Озонированный воздух в допустимых концентрациях не только безвреден, но и полезен, так как он более насыщен кислородом и не содержит вредных примесей и микробов.

В медицинских озонаторах озон вырабатывается из чистого кислорода. Озон подавляет вирусы и микроорганизмы, но не повреждает клетки человеческого организма, которые имеют естественную защиту от окисления. Действие озона избирательно по отношению к живым организмам и человеку. Озон усиливает потребление глюкозы тканями и органами человека, увеличивает насыщаемость кислородом плазмы крови, уменьшает степень кислородного голодания, улучшает микроциркуляцию. Озон оказывает положительное действие на метаболизм печени и почек, поддерживает работу сердечной мышцы, уменьшает частоту дыхания и увеличивает дыхательный объем.

В настоящее время ведутся разработки по созданию новых эффективных конструкций озонаторов на основе барьерных и коронных электрических разрядов [1–26]. Остановимся кратко на некоторых из них.

Озонатор на основе барьерного поверхностного разряда отличается от барьерного разряда наличием динамической емкости, обусловленной покрытием диэлектрика плазмой и большими концентрациями озона (более 200 г/м³) при минимальных энергетических затратах (~15 кВ*ч/кг).

Озонаторы на основе комбинированных разрядов объединяют в одну разрядную ячейку поверхностные, барьерные или другие виды разрядов. Отдельные компоненты этой системы являются независимыми элементами электрической цепи, соединенными последовательно по электрическому току или по потоку плазмообразующего газа. Комбинированные плазменные системы дают возможность их применения в качестве генераторов озона высоких и сверхвысоких концентраций.

Озонатор с вращающимся барьером повышает срок службы и надежности работы путем применения подвижных барьеров на основе жидких диэлектриков или при вращении барьера с помощью внешнего двигателя. При использовании высоковольтного

генератора постоянного напряжения и оптимизации коронирующих электродов относительно диэлектрика между электродом и диэлектриком возникает сила отталкивания, которая приводит к вращению диэлектрика относительно электродов. Озонатор создает выходную концентрацию озона до 15 г/м^3 и работает как электростатический двигатель.

Гибридный озонатор позволяет увеличить мощность установки и уменьшить его габариты. Трансформатор и разрядная ячейка не разделены в пространстве, а представляют собой единое целое. Межслойная изоляция вторичной высоковольтной обмотки трансформатора играет роль диэлектрического барьера разрядной ячейки. Озонаторная установка воздушного охлаждения работает на высоких частотах при энергетических затратах, идущих на синтез озона, порядка $18 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$ и концентрации озона 45 г/м^3 .

2.2. Ионизатор

Ионизатор – устройство для получения и насыщения воздуха озоном и отрицательными ионами. Ионизаторы, в отличие от озонатора, способствуют выработке незначительной концентрации озона и большого количества отрицательных ионов. Ионизатор не окисляет так интенсивно воздух в помещении, как озонатор, хотя по принципу работы схож с озонатором. Назначение работы ионизатора – это наполнение помещения «здоровым», живым воздухом. Ионизатор вырабатывает отрицательные ионы и улучшает качество воздуха за счет повышения концентрации электрических заряженных частиц аэроионов и незначительного количества озона.

3. Электрические разряды – генераторы озона

Электрические разряды в воздухе или кислороде являются одним из удобных и эффективных генераторов получения озона, как в естественных условиях, так и в лабораторных, медицинских и промышленных масштабах.

Рассмотрим физику горения некоторых типов электрических разрядов, способствующих образованию озона [24–30]. Начнем с молнии – самым наблюдаемым, грандиозным и таинственным явлением в нашей жизни. Несколько подробнее остановимся на барьерных и коронных электрических разрядах, как наиболее практичных и простых генераторов озона.

3.1. Молния

Молния – это мощный электрический разряд в воздухе, возникающий во время грозы (рисунок 6). Разряд молнии сопровождается яркой вспышкой света и громом. Молнии наблюдаются при извержении вулканов, в центрах торнадо и т. д. Средняя интенсивность электрических разрядов на Земле порядка ~ 100 молний в секунду. Сила тока, протекающего по каналу молнии, составляет $\sim (10\text{--}400)$ тысяч ампер, напряжение доходит до миллиарда вольт. Протяженность молнии может быть более 100 км, длительность протекания электрического разряда наблюдается от 0,01 сек до нескольких секунд, температура в канале молнии достигает $\sim (10\text{--}30)10^3 \text{ К}$, давление порядка нескольких атмосфер.

Под действием сильных пробойных электрических полей, наблюдаемых во время грозы, происходит интенсивное ускорение заряженных частиц (в основном электронов) с последующей ударной диссоциацией и ионизацией молекул и атомов воздуха.



Рисунок 6 – Мощный электрический разряд – молния

Из возникающих и распространяющихся электронных лавин образуются светящиеся разветвленные каналы – стримеры, которые дают начало ступенчатому лидеру. Лидер движется с большей скоростью, достигающей ~ 500 км/с, и по ионизированному каналу через островки концентраций заряженных частиц прокладывает оптимальный путь в атмосфере для протекания электрического тока основного разряда. Наличие молекулярного и атомарного кислорода, ударная ионизация и термический нагрев газа в области разряда до температур ~ 5000 К, а также ультрафиолетовое, возможно, и рентгеновское излучения и другие факторы способствуют интенсивному образованию озона.

3.2. Искра

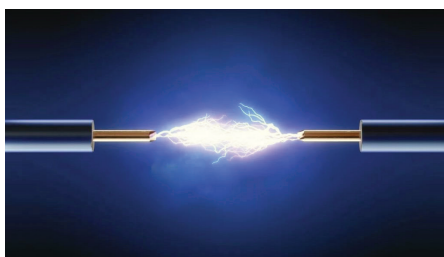


Рисунок 7 – Искровой электрический разряд

Несмотря на малые размеры искры, сила тока в искровом канале может достигать ~ 100 кА, а температура ~ 10000 К. Физика формирования и распространения искрового разряда, как и химия и образование озона, протекают практически аналогичным образом, как и при разряде молнии во время грозы, но только в малых масштабах.

3.3. Тлеющий разряд

Тлеющий разряд возникает в трубке или колбе, наполненной воздухом или кислородом при низких давлениях, под действием электрического поля между электродами – катодом и анодом (рисунок 8). В электрическом поле электроны, эмитирующиеся с поверхности катода, ускоряются, кинетическая энергия увеличивается до значений достаточных, чтобы при ударе о молекулу кислорода разложить её на атомарное состояние.

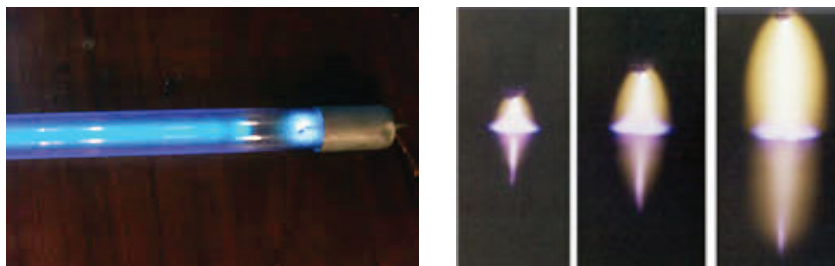


Рисунок 8 – Тлеющий электрический разряд: в цилиндрической трубке, при различных расстояниях между электродом и поверхностью воды (получен в лаборатории КРСУ)

Далее в результате химических реакций атомарного кислорода с молекулами кислорода в положительном столбе плазмы образуется озон.

3.4. Дуговой разряд

Дуговой разряд – самостоятельный электрический разряд в газах, поддерживаемый термоэлектронной или автоэлектронной эмиссией электронов с поверхности катода (рисунок 9). Дуговой разряд характеризуется большой плотностью тока и высоким катодным падением потенциала вблизи электрода. В створе электрической дуги под действием электрического поля электроны ускоряются, соударяются с молекулами, атомами и ионами, увеличивая их кинетическую энергию и, соответственно, температуру. В плазме дугового разряда происходит интенсивная диссипация электромагнитной энергии в тепловую, – так называемый «джоулев нагрев».

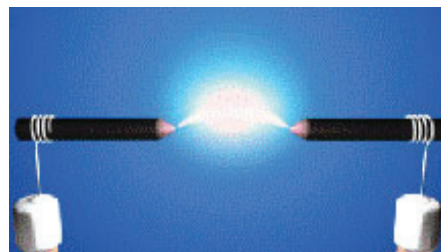


Рисунок 9 – Дуговой электрический разряд, горящий между горизонтально расположенными электродами

При больших электрических токах проводимости заметную роль в физике горения электрической дуги и образовании потоков плазмы играют собственные электромагнитные силы, сжимающие токопроводящий канал дуги (пинч-эффект) и ускоряющую плазму от электродов. В результате пинч-эффекта увеличивается плотность электрического тока, растет число соударений частиц в плазме, возрастает температура дуги, давление и интенсивность излучения плазмы. Из-за высокой температуры образование озона в дуге идет, в основном, вдоль токопроводящей поверхности разряда и вблизи электродов.

3.5. Высокочастотный индукционный электрический разряд

Высокочастотный индукционный электрический разряд (ВЧИ) зажигается в газе при воздействии электромагнитных полей с частотами (1–1000 МГц). Плазма в канале ВЧИ разряда поддерживается за счет диссипации токами поляризации энергии электромагнитного поля, создаваемого катушкой соленоида (индуктора) при протекании электрического тока высокой частоты (рисунок 10). Переменное магнитное поле, направленное вдоль оси, индуцирует поддерживающее разряд вихревое электрическое поле, концентрическое с витками индуктора. В центральном сечении области индуктора формируется тороидальное ядро разряда с высокой температурой вблизи стенок камеры. Под действием собственных электромагнитных сил плазма ускоряется в центральном

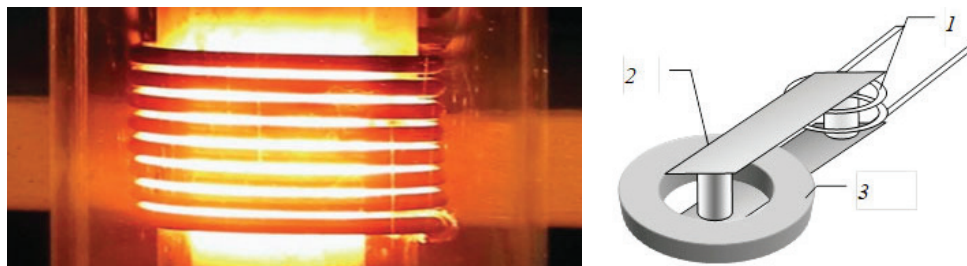


Рисунок 10 – Высокочастотный индукционный электрический разряд (слева) и трансформаторный разряд (справа): 1 – первичная обмотка трансформатора, 2 – магнитопровод, 3 – камера вторичной обмотки

сечении из области тороидального ядра к оси, соударяется и растекается в аксиальном направлении к торцевым поверхностям канала, образуя вихревую картину течения. Потoki плазмы сталкиваются с подводимым в канал плазмотрона газом и смещают его к стенкам канала. Из-за высокой температуры плазмы в области разряда образование озона идет вдоль его поверхности.

С увеличением расхода газа, подводимого в канал в область индуктора, возрастает динамическое давление газа на плазму и реализуется режим протекания газа через осевую область ВЧИ разряда. Конвективное охлаждение центральной области разряда приводит к понижению его температуры и к увеличению концентрации озона.

Трансформаторный разряд. Плазма нагревается за счет «джоулева тепла» замкнутых индукционных токов (рисунок 10), образующих вторичный виток в разрядной камере (3), связанный магнитопроводом (2) с первичной обмоткой (1) трансформатора. Плазма термически неравновесная по сечению разрядной камеры: максимумы температуры электронов и тяжелых частиц смещены к центру кривизны тора. Благодаря действию электромагнитных сил, окружающий газ всасывается через внутренние отверстия тороидальной камеры плазмотрона, и прокачиваются сквозь его сечение. Под действием температуры разряда происходит диссоциация кислорода и путем последующих химических реакций на выходе из канала генерируется озон, который через внешние отверстия поступает в окружающую среду.

3.6. Сверхвысокочастотный (микроволновой) разряд

Сверхвысокочастотный (микроволновой) разряд (СВЧ) – это электрический разряд в газах, горящий в переменном электрическом поле с частотой 1–1000 ГГц (рисунок 11). Подводимая к плазме электромагнитная волна частично отражается от неё, часть волны проходит через плазму, а оставшаяся часть «диссипирует» в плазме. Под действием осциллирующего электрического поля электромагнитной волны, в плазме возникают колебания заряженных частиц (ток поляризации), которые в результате соударений с другими частицами передают им кинетическую энергию, полученную от электромагнитного поля, в результате чего происходит термический нагрев газа.

СВЧ разряды имеют высокий ресурс работы, генерируют спектрально чистую плазму с температурой не выше 6000К. При низких давлениях СВЧ разряд представляет собой пучок светящихся стримеров (рисунок 11), что делает его удобным инструментом для получения озона.

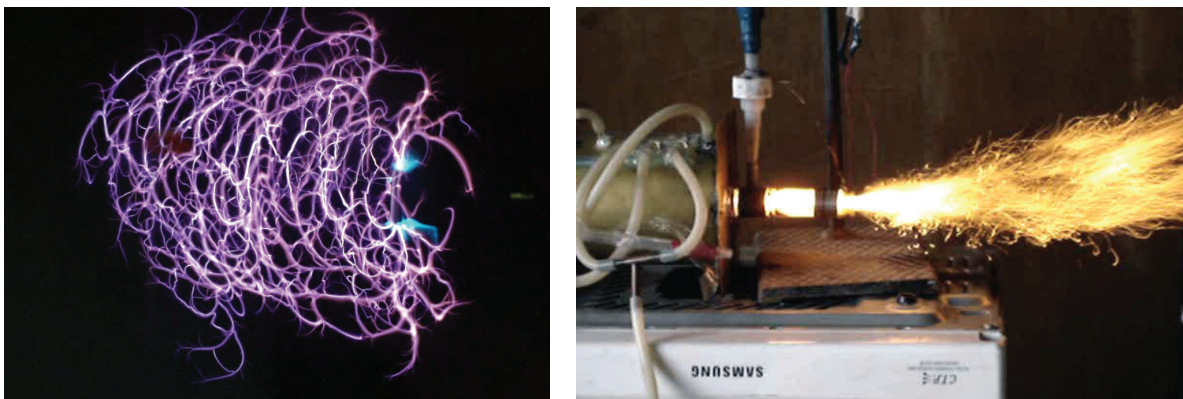


Рисунок 11 – СВЧ разряд, состоящий из разветвленной высокотемпературной (~5000K) сети стримерных каналов (слева, МРТИ РАН) и СВЧ плазматрон (справа)

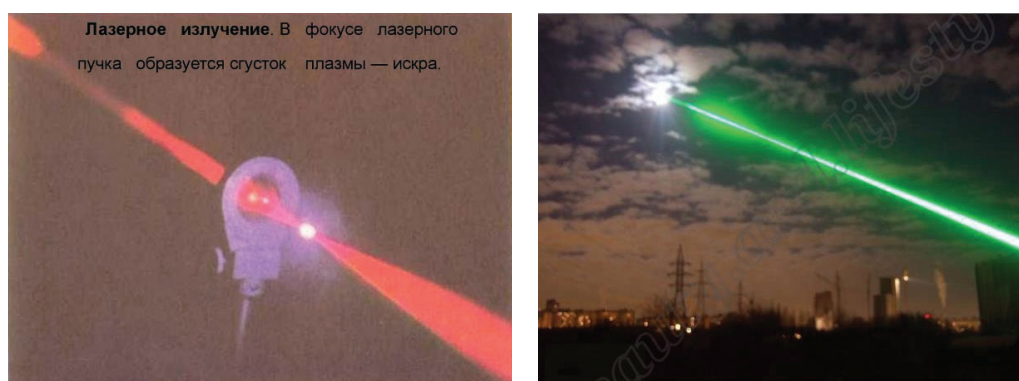


Рисунок 12 – Оптический пробой (лазерная искра, слева) и (справа) непрерывный оптический разряд (рисунки из интернета)

3.7. Оптический разряд

Оптический разряд – это высокочастотный разряд в газах, инициируемый мощным лазерным излучением от дальнего инфракрасного излучения до жесткого ультрафиолетового. При фокусировке линзой лазерного луча в области фокуса наблюдается формирование плазменной искры. Плазма образуется в результате усиления интенсивности лазерного излучения, как при электрическом пробое газа в разрядном промежутке между электродами. Оптический пробой воздуха происходит при значениях электрического поля световой волны выше порогового ~ 1 МВ/см.

Существуют два вида оптических разрядов (рисунок 12):

- 1) оптический пробой (лазерная искра плазмы);
- 2) непрерывный оптический разряд, когда плазма поддерживается энергией непрерывного лазерного излучения.

По сравнению с другими электрическими разрядами, оптический разряд обладает рядом особенностей: высокой температурой и стерильностью плазмы, малыми пространственными размерами, возможностью перемещения разряда в пространстве. Стабилизация оптического разряда проводится потоком газа, изменением мощности лазерного излучения, фокусировкой луча или пересечением двух и более лазерных лучей. Высокая температура плазмы оптического разряда и малые размеры ядра приводят к образованию

озона вдоль его поверхности. Непрерывный оптический разряд позволяет создавать и поддерживать плазму на значительном удалении от источника излучения, что дает возможность, например, устранять озоновые дыры в стратосфере путем перемещения оптического разряда в озоносферу и генерации там озона.

3.8. Коронный разряд

Коронный разряд – это самостоятельный слаботочный электрический разряд постоянного или переменного тока, возникающий в газе при атмосферном давлении у электродов с большой кривизной поверхности и огромными электрическими полями (рисунок 13). Во время грозы воздух и окружающие предметы настолько сильно наэлектризованы, что происходит интенсивное стекание электрических зарядов (коронный или электрический ветер) и образование факела или короны около проводов высоковольтных линий, громоотводов, на верхушках деревьев, мачтах кораблей (рисунок 13 – огни святого Эльма) и даже на кончиках пальцев.

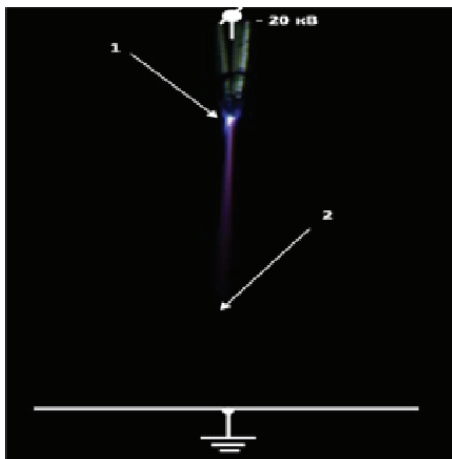
Начало количественным исследованиям гидродинамических явлений, связанных с коронным разрядом, положил Аррениус (1897 г.). Он измерил силы, действующие на острие, с которого стекают электрические заряды или «коронный ветер» в разных газах и давлениях. Первую теорию «коронного ветра» дал Чатток (1899 г.), который получил уравнения, связывающие перепад давлений, создаваемых «коронным ветром», с плотностью тока и подвижностью зарядов.

В неоднородных электрических полях под действием электрических сил заряженные частицы ускоряются, приобретают кинетическую энергию достаточную, чтобы при ударе с молекулами кислорода произошла диссоциация молекул и ионизация атомов кислорода. В результате химических реакций в коронном разряде идет интенсивное образование озона. Электрический ток коронного разряда определяется объёмным зарядом, который создаётся в области ионизации вблизи электродов и заполняет всю внешнюю область. Поэтому в коронном разряде условно выделяются две области (рисунок 13):

1) **внутренняя область** от электродов или область ионизации, в которой происходят процессы диссоциация молекул газа, ионизация атомов и свечения газа вокруг электрода (корона) вследствие рекомбинации заряженных частиц. Образование электронов посредством электронной ионизации преобладает над процессами прилипания электронов к O_2 ;

2) **внешняя область** или темная область расположена на удалении от электродов, в которой осуществляется перенос заряда ионами и электронами, практически нет свечения газа, и кинетической энергии заряженных частиц недостаточно для ударной ионизации и диссоциации газа. Прилипание электронов к электроотрицательным газам преобладает над процессами ионизации, а концентрация электронов, как и напряженность электрического поля, с удалением от электрода постепенно уменьшается.

Отрицательная корона. Если коронирующий электрод соединен с отрицательным полюсом источника питания, то возникает *отрицательный коронный разряд*. Основным процессом, поддерживающим ток в отрицательной короне, является эмиссия электронов с поверхности катода и дальнейшее лавинное размножение. Вторичные электроны образуются:

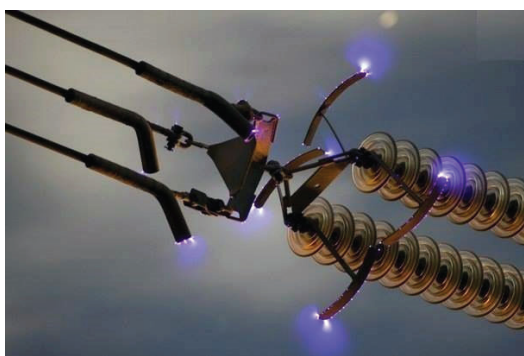


1



2

Коронный разряд у электрода отрицательной полярности: 1 – область ионизации, 2 – внешняя область; коронный разряд на мачтах корабля (огни святого Эльма, рисунок из интернета)



1

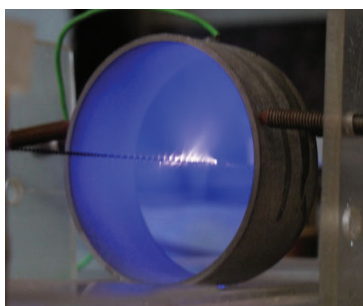


2

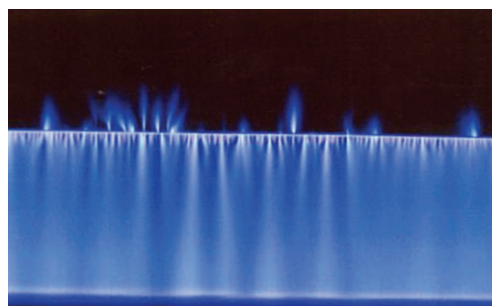
Виды коронных разрядов: 1 – на высоковольтных линиях электропередач (рисунок из интернета), 2 – в сферической колбе



1



2



3

Коронный факельный разряд: 1 – с поверхности диска, 2 – в цилиндрической трубе, 3 – линейный коронный факельный разряд (получен в лаборатории КРСУ)

Рисунок 13 – Разновидности коронных разрядов

- 1) за счёт удара положительных ионов о поверхность катода;
- 2) путем фотоионизации газа.

В коронирующей плазме кинетической энергии ионов (~0,01–0,1 эВ) недостаточно, чтобы выбить электрон с поверхности электрода. Фотоны, излучаемые в активной зоне коронного разряда, имеют энергию достаточную для ионизации частиц газа и вырывания электронов с поверхности электрода. Работа выхода электрона с поверхности металла (4–5 эВ) меньше, чем энергия ионизации молекул, например, кислорода (12,06 эВ) или азота (15,6 эВ). Поэтому число фотоэлектронов с поверхности электрода будет больше, чем электронов при ударной ионизации или диссоциации газа. Количество фотоэлектронов зависит от длины волны фотонов и от работы выхода материала разрядного электрода.

В работах Ю.П. Райзера [47] приводится критерий зажигания отрицательной короны:

$$\int_0^{x_1} [\alpha(x) - \beta(x)] dx = \ln(1 + \gamma^{-1}),$$

где α – коэффициент ионизации; β – коэффициент прилипания электронов; γ – эффективный коэффициент вторичной эмиссии.

Положительная корона. При горении положительной короны коронирующая плазменная область совпадает с областью ионизации. Электроны, появляющиеся в межэлектродном пространстве, ускоряются электрическим полем по направлению к положительному электроду. В области ионизации у коронирующего электрода электроны, при столкновении с молекулами газа образуют вторичные электроны и положительные ионы (например, в воздухе O_2^+ , O_2^- , N_2^+). Вторичные электроны образуются при фотоионизации молекул газа фотонами, возникающими при рекомбинации частиц. Под действием электрического поля вторичные электроны порождают дальнейшую ионизацию газа, которая часто переходит в лавинный процесс образования электронов.

В качестве критерия зажигания положительной короны Ю.П. Райзер [47] предложил условие возникновения светящихся разрядов-стримеров, которое в случае неоднородного поля имеет следующий вид:

$$\int_0^{x_1} [\alpha(x) - \beta(x)] dx \approx 18 - 20.$$

В отличие от ровного свечения отрицательной короны, ионизационная область положительной короны проявляется как слабое голубое свечение у поверхности электрода с появляющимися стримерами, светящимися нитевидными разрядами, разбегающимися от электрода [47, 49]. Нестационарное горение сопровождается тихим потрескиванием разряда, слабой пульсацией стримеров и вспышками света.

Во внешней области напряжённость электрического поля недостаточна для образования вторичных электронов. Поэтому электроны прилипают к молекулам газа, образуют отрицательные ионы и движутся к положительному электроду.

Ультра корона возникает при горении положительного разряда, в котором свечение однородное, а электрический ток (стримеры) пульсирует с высокой частотой.

Факельный разряд представляет собой аномальную разновидность положительной короны и соответствует коронному разряду диффузного свечения высокочастотного разряда (рисунок 13). Факельный разряд частично или полностью заполняет разрядный

промежуток и существует при напряжениях на разрядном контуре ~ 150 кВ, а электрический ток факельного разряда в 50 раз больше тока обычного коронного разряда.

Линейный коронный факельный разряд состоит из импульсной короны и положительной «классической» короны, которые горят в разрядном промежутке и сменяют друг друга под действием искрового инициирующего разрядника (рисунок 13). Линейный коронный факельный разряд увеличивает ионизационную область короны на весь разрядный промежуток. Разряд практически квазистационарен во времени и реализуется при различных конфигурациях разрядного контура: проволочка над плоскостью, проволочка в цилиндре, две и более параллельных проволочек.

Биполярная корона постоянного тока возникает в случае, если на оба электрода малого радиуса кривизны, например, на тонкие провода подаётся высокое напряжение. В зависимости от знака приложенного напряжения на электродах, реализуются различные коронные разряды. Перенос заряда в области ионизации осуществляется ионами разных знаков, заряд которых взаимно компенсируется во внешней (центральной) области разряда.

Коронный разряд переменного тока часто возникает во время грозы на высоковольтных линиях электропередач. Отличительными особенностями внешней области короны является существенная роль тока смещения, а также изменения во времени и в пространстве распределения объёмного заряда.

Высокочастотная корона возникает в случае приложения к коронирующему электроду переменного напряжения частотой от нескольких килогерц и выше.

Импульсные коронные разряды наблюдаются, когда ионизационная область короны увеличивается на весь разрядный промежуток путем организации наносекундного коронного разряда с применением высоковольтных импульсных генераторов. Импульсные коронные разряды разделяются на две группы:

- 1) электрические разряды, возникающие при наложении кратковременных импульсов напряжения;
- 2) электрические разряды, состоящие из коронного и импульсного разрядов.

3.9. Барьерный разряд

Барьерный разряд возникает между двумя плоскими электродами (рисунок 14), внутренняя сторона которых покрыта диэлектрическим материалом. Питание разряда осуществляется источником переменного тока с напряжением 5–20 кВ. В большинстве случаев источниками питания служат повышающие трансформаторы промышленной частоты или специальные высокочастотные преобразователи. На поверхности диэлектрических обкладок с ростом напряжения накапливаются электрические заряды вплоть до пробойных значений. Под действием электрического поля свободные электроны в разрядном промежутке инициируют безэлектродный пробой газа, протекающий в виде микроразрядов в те промежутки времени, когда напряжение между обкладками равно или превышает пробойное. Микроразряды, представляющие собой подобие стремненных лавин искрового разряда, развиваются, расширяются по поверхности диэлектрика и в итоге формируют поверхностный разряд. Разряд горит между диэлектриком и электродом или между двумя диэлектриками в цепи переменного электрического тока высокого напряжения.

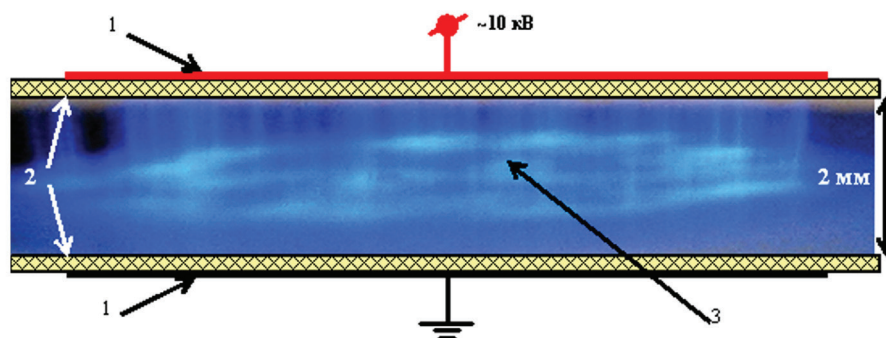


Рисунок 14 – Барьерный разряд (вверху): 1 – металлические электроды, 2 – диэлектрический барьер, 3 – плазма

Диэлектрик ограничивает величину заряда в микрозарядах и распределяет их по всей своей площади. Вследствие соударений частиц происходит нагрев газа до температур ~ 4000 К. В разряде образуются ионы, возбуждённые атомы и молекулы кислорода, которые способствуют эффективному синтезу озона.

Барьерный поверхностный разряд отличается от барьерного разряда наличием динамической ёмкости, обусловленной покрытием диэлектрика плазмой. Разряд переменного тока зажигается между обкладками конденсатора, в котором оба электрода соприкасаются с диэлектриком. Коронирующие электроды выполнены в виде провода или полосок, лежащих на поверхности диэлектрика, а индукционный электрод расположен на противоположной стороне диэлектрика. На электроды подается переменное напряжение и на поверхности диэлектрического барьера в плазме наблюдается периодическое образование стримеров. Разряд возникает в виде непрерывной светящейся полосы, охватывающей краевую кромку разрядных электродов и состоящий из множества равномерно расположенных светящихся стримеров, направленных перпендикулярно поверхности электрода. С повышением напряжения число элементарных разрядов увеличивается, усиливается интенсивность свечения и образование озона.

Из краткого обзора физических процессов, протекающих при образовании и горении молнии, искры, коронного, барьерного, дугового, высокочастотного и оптического разрядов видно, что при воздействии электрических разрядов на кислород или воздух, основную роль в образовании озона играют следующие процессы:

1. Интенсивное ускорение электронов в электрическом поле, образование стримеров, лидеров и последующая ударная диссоциация молекул кислорода, и ионизация атомов.

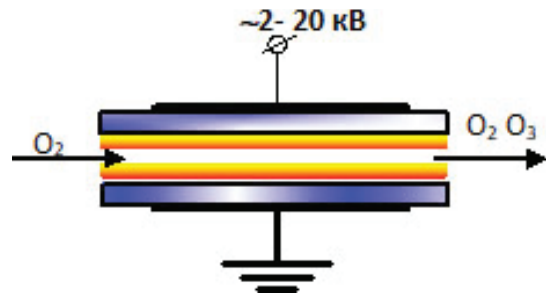
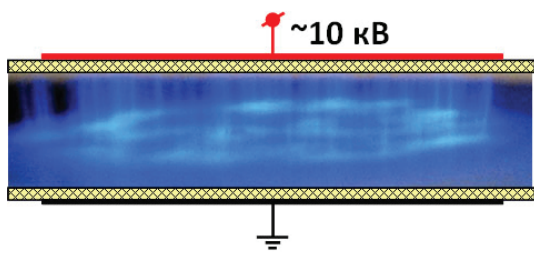
2. Термический нагрев воздуха или кислорода в результате диссипации электромагнитной энергии в плазме электрических разрядов в тепловую энергию, с выделением «джоулева тепла».

3. Ультрафиолетовое и, возможно, рентгеновское излучение, возникающее при торможении электрона с большой кинетической энергией в поле иона или атома.

Поэтому при практическом использовании данных электрических разрядов для синтеза озона наиболее удобными и перспективными генераторами озона из кислорода и воздуха являются коронные и барьерные разряды. В коронных и барьерных электрических разрядах реализуются благоприятные условия образования озона: минимальные энергетические затраты при нагреве газа до температур $2500\text{--}5500\text{K}$ (максимум

образования при $\sim 3700\text{K}$), большие «пробойные» электрические поля и наличие свободных электронов. Под действием электрического поля электроны ускоряются до энергии, соответствующей энергии диссоциации молекул кислорода, в результате соударений частиц происходит образование атомарного кислорода и последующий синтез озона.

В настоящее время большое значение имеют исследования по разработке и усовершенствованию озонаторов на основе барьерных и коронных разрядов. В настоящее время синтез озона в плазмохимических реакторах с использованием данных электрических разрядов, осуществляется в лабораторных и промышленных масштабах. Разрабатываются новые технологии получения озона, методы озонирования и разложения органически материалов в воде, воздухе и в других средах. Рассматриваются практические конструкции высоковольтных квазирезонансных источников питания плазмохимических реакторов, используемых для синтеза озона.



1. БАРЬЕРНЫЙ РАЗРЯД – ГЕНЕРАТОР ОЗОНА

1.1. Барьерный поверхностный разряд с плазменным индукционным электродом

В работе [24] описана разработка озонаторов на основе барьерного поверхностного разряда (БПР) и барьерного поверхностного разряда с плазменным индукционным электродом (БПРПЭ).

1.1.1. Формирование барьерного поверхностного разряда. Барьерный поверхностный разряд переменного тока частотой 100 кГц зажигается между обкладками газового конденсатора, в котором оба электрода соприкасаются с диэлектриком. Коронирующие электроды выполнены в виде полосок (рисунок 1.1):

- в случае плоской конфигурации они лежат на поверхности диэлектрика (рисунок 1.2);
- для цилиндрической геометрии они наполовину вставлены в керамическую поверхность (рисунок 1.2).

Индукционный электрод расположен на противоположной стороне диэлектрика. На электроды подается переменное напряжение порядка 10 кВ. В плазме БПР наблюдается большое число стримеров, «стекающих» по поверхности диэлектрического барьера.

Существуют различные конструкции разрядных ячеек БПР. Рассмотрим модификацию БПР путем организации подвода мощности к диэлектрическому барьеру не через металлический электрод, а с помощью газоразрядной плазмы низкого давления [35]. Это расширяет возможности регулировки характеристик разряда. Наличие двух электрических разрядов, расположенных последовательно по электрической цепи, является существенным отличием барьерно-поверхностного разряда с плазменным индукционным электродом от обычного барьерного разряда. Вторым разрядом, расположенным последовательно по электрической цепи, может быть классический барьерный разряд или другие типы разрядов.

Барьерно-поверхностный разряд с плазменным индукционным электродом формируется с помощью разработанного разрядного узла (рисунок 1.3). Узел располагается коаксиально во внешней охлаждаемой водой трубке 1, и состоит из двух стеклянных трубок: наружной 2 и внутренней 3, между которыми прокачивается кислород. Во внутреннюю трубку 3 герметично вводится трубчатый металлический электрод 4, подключенный к вакуумной системе, позволяющей контролировать и изменять давление воздуха

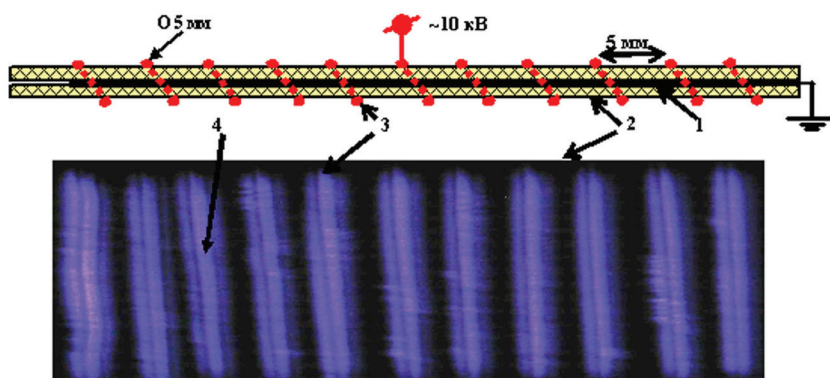


Рисунок 1.1 – Барьерный поверхностный разряд: 1 – металлический (индукционный) электрод, 2 – диэлектрический барьер, 3 – коронирующий электрод, 4 – плазма

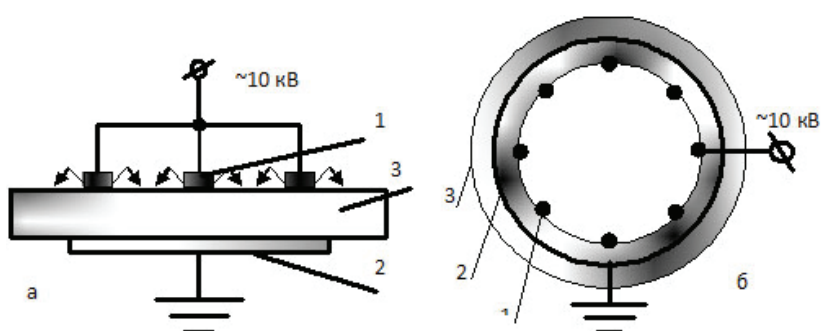


Рисунок 1.2 – Конфигурация плоского (а) и цилиндрического (б) электродов барьерного поверхностного разряда: 1 – верхний электрод, 2 – нижний электрод, 3 – диэлектрик

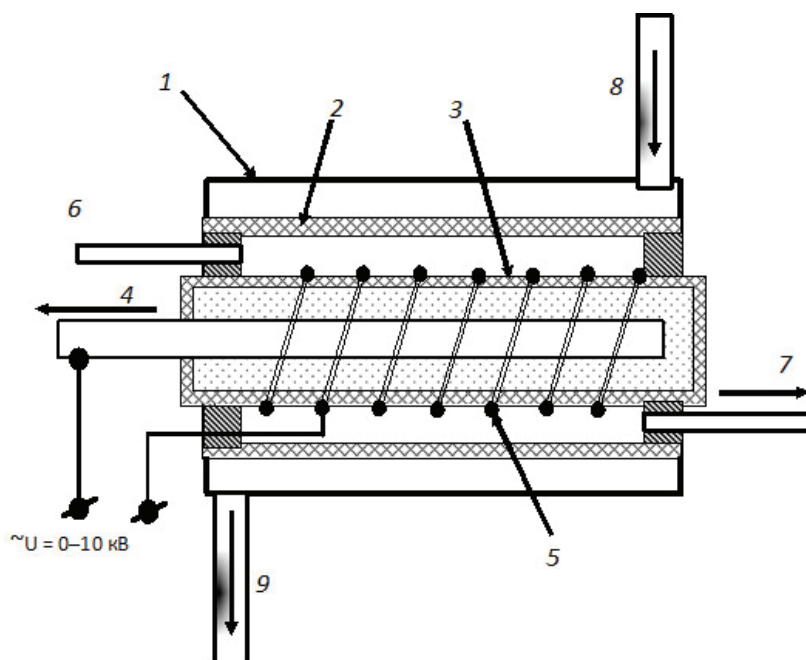


Рисунок 1.3 – Схема газоразрядного узла для реализации барьерного поверхностного разряда с плазменным индукционным электродом

в трубке 3. На поверхность внутренней трубки наматывается коронирующий электрод 5 в виде спирали из провода (нихром диаметром 0,2 мм) с заданным шагом. Кислород, осушенный с помощью силикагеля до точки росы ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), подается через штуцер 6. Полученная озон-кислородная смесь выводится из разрядного узла через штуцер 7. Вода поступает и отводится через патрубки 8, 9.

При подключении озонатора к водопроводной сети, кроме поверхностного барьерного разряда, загорается барьерный разряд между разрядным электродом и внешним стеклянным цилиндром, охлаждаемым водой. Водопроводная вода является заземленным электродом. Для полной диэлектрической развязки охлаждающей рубашки и устранения побочного разряда, в систему охлаждения введены капельные разрывы воды – входной и выходной.

Измерение концентрации озона осуществляется оптическим озонометром «Медозон 254/3». По известной концентрации озона, расходу кислорода и мощности разряда находятся энергетические затраты, идущие на синтез озона. Мощность разряда определяется как произведение эффективных значений тока и напряжения. Сигналы с делителя напряжения, шунта и измерительного конденсатора подаются на осциллограф или через устройство согласования на компьютер, который оснащен программным обеспечением регистрации и обработки электрических сигналов в развертке времени (рисунок 1.4). По данным мгновенного значения тока, напряжения и заряда, протекающего через разрядный промежуток, рассчитываются параметры разряда: средний ток и напряжение; полная активная и реактивная мощность; коэффициент мощности установки.

Переменное напряжение до 10 кВ, частотой 50 Гц подается на электроды 4 и 5 (рисунок 1.3). При достижении пробойного напряжения внутри трубки зажигается объемный барьерный разряд, который регистрируется по изменению хода вольт-амперной характеристики и по слабому сиреневому свечению внутри трубки. При дальнейшем повышении напряжения между витками коронирующего провода возникает поверхностный барьерный разряд, регистрируемый по слабому свечению, появлению озона и характерным изменениям осциллограмм электрического тока. Таким образом, два разряда соединяются в электрическую цепь последовательно.

Для переменного тока поверхностный (скользящий) разряд возникает как слабая корона вокруг проволоки. При увеличении напряжения каналы стримеров удлиняются, ток возрастает и появляется заметное свечение. Отрицательный полупериод напряжения на проволоке вызывают стримеры, направленные к катоду, а при положительном полупериоде напряжения стримеры направлены к аноду. Происходит контракция разряда и переход его в скользящую форму. На осциллографических кривых тока смещения возникают импульсы активного тока, как и для барьерного разряда. По внешнему виду свечения видно, что разряд прижимается к поверхности. По данным [36], активная форма электрического тока выступает в виде микрозарядов длительностью $\sim 10\text{ нс}$, и по порядку величины соответствует длительности формирования канала в барьерном разряде.

1.1.2. Статические и динамические характеристики разряда. Статические вольт-амперные характеристики (ВАХ) БПР имеют вид двух пересекающихся прямых [37]. Для БПРПЭ характеристики состоят из трех отрезков, каждый из которых представляет практически прямую линию (рисунок 1.5, а, б):

1. В интервале до 500 В протекает электрический ток смещения, обусловленный малой емкостью электродов разряда.

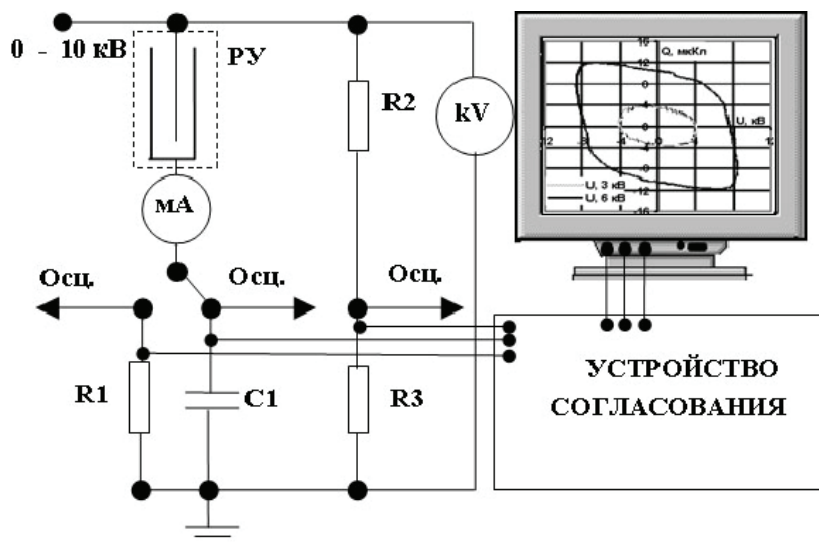


Рисунок 1.4 – Схема экспериментальной установки

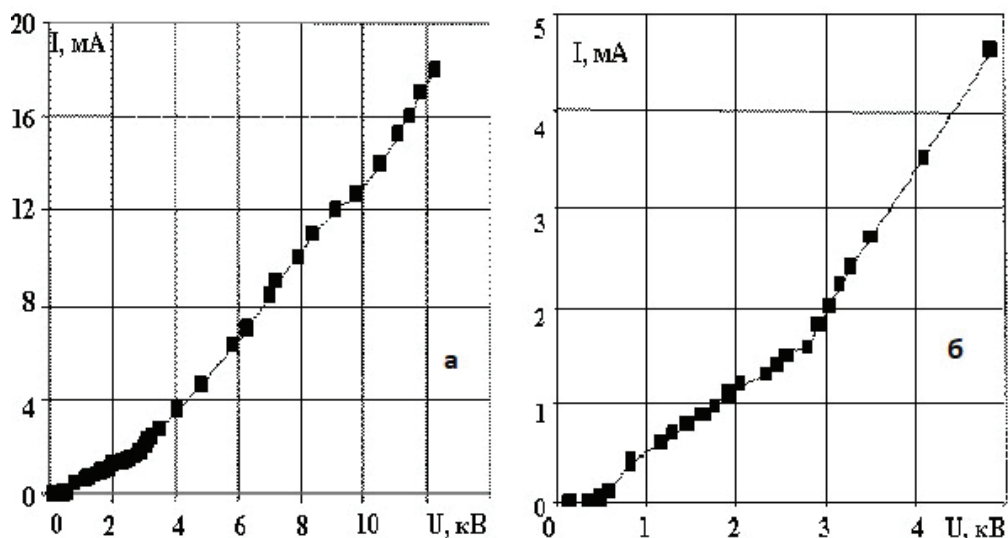


Рисунок 1.5 – Статические вольт-амперные характеристики поверхностного разряда с плазменным индукционным электродом: а – общий вид, б – начальный участок

2. При напряжении более 500 В происходит увеличение электрического тока за счет роста общей емкости разрядного промежутка при зажигании вакуумного разряда.

3. При напряжении 2,7 кВ наблюдается перелом ВАХ, связанный с развитием барьерно-поверхностного разряда с плазменным индукционным электродом. Напряжение зажигания БПРПЭ составляет 1,8 кВ.

По площади циклограммы определяется активная мощность разряда. Циклограмма классического барьерного разряда имеет вид параллелограмма [38]. На рисунке 1.6 видно, что при напряжении 6 кВ циклограмма похожа на параллелограмм. Однако при напряжениях ~ 3 кВ она больше соответствует эллипсу. Это объясняется тем, что при $U = 3$ кВ динамическая емкость, возникающая при расплзании плазмы по поверхности

диэлектрика, сопоставима по порядку величины с собственной емкостью электродов. При увеличении напряжения плазма заполняет диэлектрический промежуток между витками провода, динамическая емкость перестает возрастать, и циклограмма приобретает вид, близкий к параллелограмму.

Для классического барьерного разряда напряжение горения является постоянной величиной. В случае БПРПЭ из вольт-кулоновских характеристик для эффективных напряжений на разрядном контуре 3 и 6 кВ (рисунок 1.6) следует, что напряжение горения зависит не только от прикладываемого напряжения, но и от расхода воздуха (рисунок 1.7). При напряжениях, превышающих 8 кВ, кривая напряжения горения выходит на постоянный уровень в области 3,5 кВ. Влияние расхода воздуха на напряжение горения разряда объясняется образованием озона, который, как более электроотрицательный газ, чем воздух, захватывает свободные электроны из зоны разряда, и для протекания заданной силы тока требуется приложить более высокое напряжение.

Осциллограммы тока и напряжения на озонаторе симметричны относительно оси абсцисс (рисунок 1.8) с периодом колебаний $T = 0,02$ с. Наблюдается незначительный сдвиг фаз между током и напряжением (рисунок 1.8), что соответствует влиянию активной емкостной нагрузки БПРПЭ. Наблюдаются отличия форм тока и напряжения от синусоиды. Искажение формы напряжения определяется большим выходным сопротивлением трансформатора. Искажение тока зависит от моментов зажигания разряда и появления активной составляющей тока, что говорит о присутствии омического сопротивления в цепи барьерного разряда [39]. На осциллограммах наблюдается присутствие высокочастотной составляющей тока, где отдельные импульсы трудно различимы. Это, по-видимому, соответствует формированию и распространению стримеров по поверхности диэлектрика.

При увеличении напряжения коэффициент мощности уменьшается по линейному закону (рисунок 1.9). Это означает, что с повышением U падает активная мощность, а реактивная мощность увеличивается. Поэтому экономически эффективно использовать БПРПЭ в области напряжений 3–5 кВ. При дальнейшем повышении напряжения коэффициент мощности снижается за счет того, что растет сдвиг фаз между амплитудами тока и напряжения и увеличивается динамическая емкость разрядного узла.

1.1.3. Параметры разрядного контура. Установлено (рисунки 1.10, 1.11), что изменение тока разряда от давления внутри трубки плазменного индукционного электрода и от шага навивки коронирующего электрода имеет сложный нелинейный характер. На рисунке 1.10 видно, что для шага навивки $d = 1,1$ мм и 2,2 мм при $P = 50$ тор наблюдается минимум тока. При давлениях 120–150 Тор и тех же d имеется область небольшого повышения тока. При увеличении шага навивки эта область постепенно сглаживается и для $d = 40$ мм зависимость носит почти линейный характер. При низком давлении длина свободного пробега электрона внутри трубки плазменного индукционного электрода велика, поэтому на пути к электродам он набирает энергию, достаточную для ионизации газа. Носителей зарядов в разряде становится все больше, а плазма приобретает диффузный характер. Динамическая емкость при этом возрастает, сопротивление разрядного узла уменьшается и растет величина протекающего тока.

При повышении давления происходит резкое изменение структуры разряда, он повторяет форму проводника, навитого на стеклянную трубку. Вследствие этого

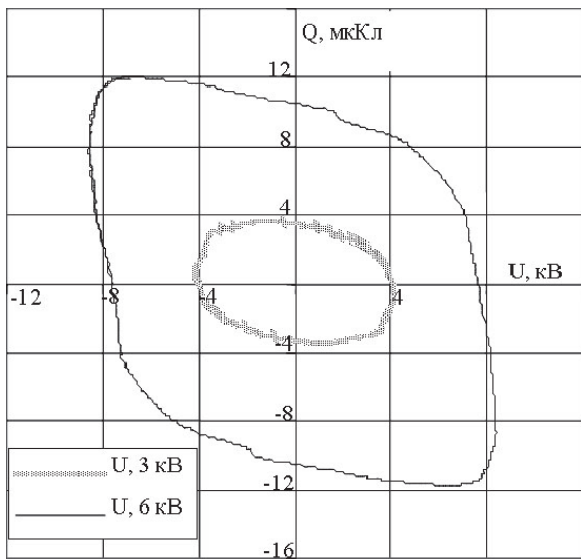


Рисунок 1.6 – Вольт-кулоновские характеристики БПРПЭ для эффективных напряжений 3 и 6 кВ

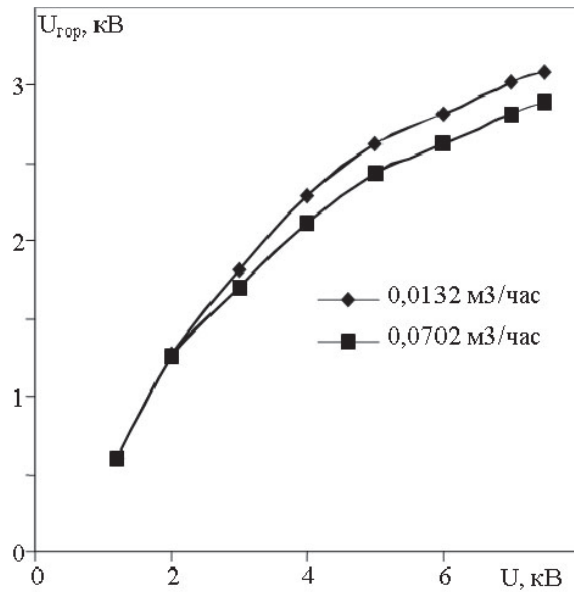


Рисунок 1.7 – Зависимость максимального напряжения горения от напряжения на разрядном промежутке

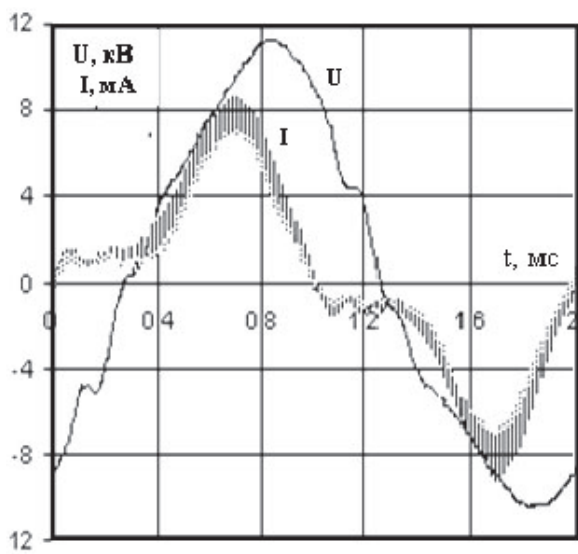


Рисунок 1.8 – Осциллограммы тока и напряжения БПРПЭ

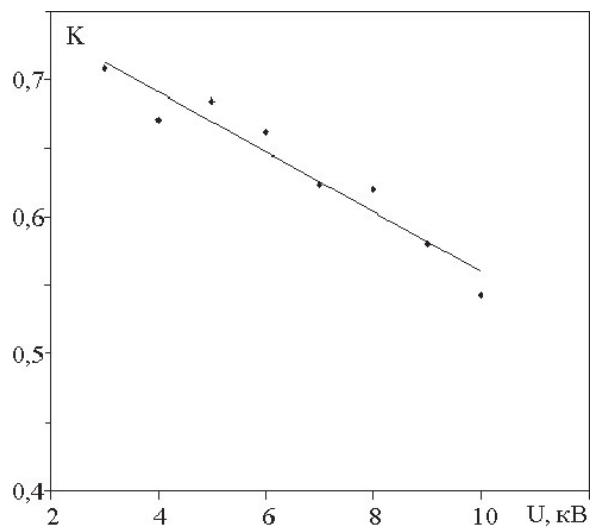


Рисунок 1.9 – Зависимость коэффициента мощности от напряжения

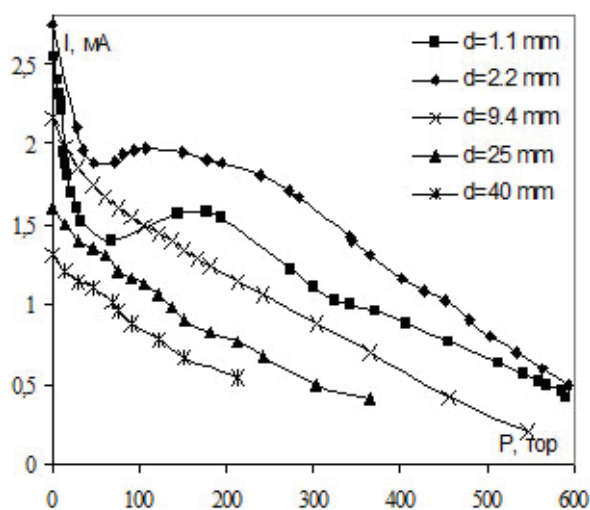


Рисунок 1.10 – Зависимость тока от давления для разных шагов навивки коронирующего электрода

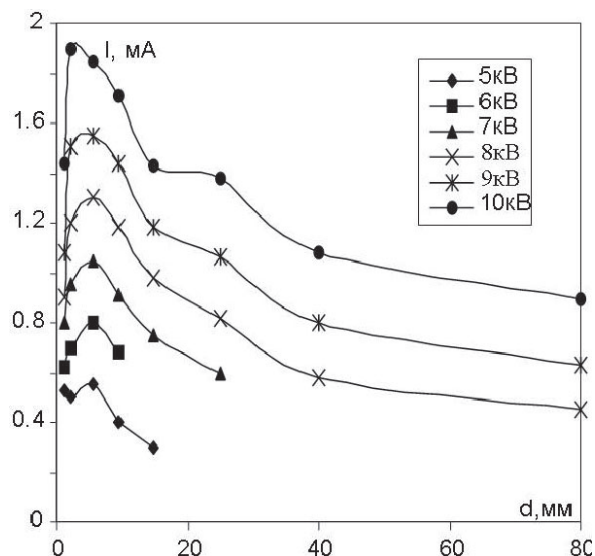


Рисунок 1.11 – Зависимость тока от шага навивки коронирующего электрода, для различных напряжений

сопротивление разрядного узла растет и ток уменьшается. Экстремум электрического тока реализуется в области давлений 120–150 Тор для шага навивки 1,1 мм и 2,2 мм.

В зависимости от шага навивки коронирующего электрода (рисунок 1.11), в разряде реализуется область с резким повышением тока, что объясняется экранировкой соседних витков коронирующего электрода. При малом шаге навивки, соседние витки коронирующего электрода экранируют горизонтальную составляющую напряженности электрического поля, и разряд не может распространяться на всю свободную поверхность трубки. Это приводит к тому, что динамическая емкость и электрический ток уменьшаются. При увеличении шага навивки между витками экранировка уменьшается и при $d = 4-5$ мм плазма поверхностного разряда полностью занимает площадь трубки, что соответствует максимальному току. При дальнейшем повышении шага навивки величина горизонтальной составляющей напряженности электрического поля уменьшается, а плазма не заполняет все расстояние между соседними витками коронирующего электрода. Поэтому динамическая емкость разрядного узла падает, сопротивление возрастает, а ток разряда уменьшается.

1.1.4. Синтез озона в барьерном поверхностном разряде. В традиционных поверхностных разрядах мощность к диэлектрическому барьеру подводится через металлический некоронирующий электрод. Если заменить металлический электрод плазмой разряда низкого давления, то расширяются возможности регулировки характеристик поверхностного барьерного разряда [35]. Подвод мощности к барьеру с помощью плазменного электрода позволяет сократить затраты на синтез озона по сравнению с классическим поверхностным барьерным разрядом.

Исследование характеристик БППЭ при синтезе озона в кислороде проводится для шага навивки коронирующего электрода $d = 1,1$ мм при напряжении на коронирующем электроде 2–10 кВ. На рисунке 1.12 видно, что концентрация озона возрастает с повышением напряжения. Увеличение давления в разрядной трубке с 0,001 до 80 кПа приводит

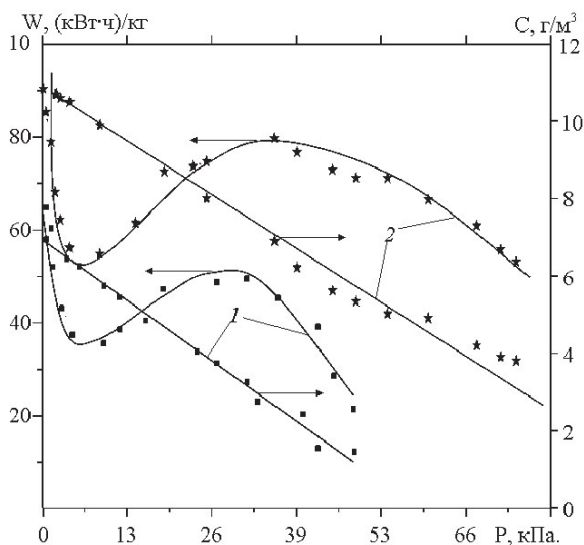


Рисунок 1.12 – Зависимость концентрации озона (C) и удельных энергетических затрат (W), от давления в разрядной трубке (P) при напряжениях на коронирующем электроде 7 (1) и 10 (2) кВ

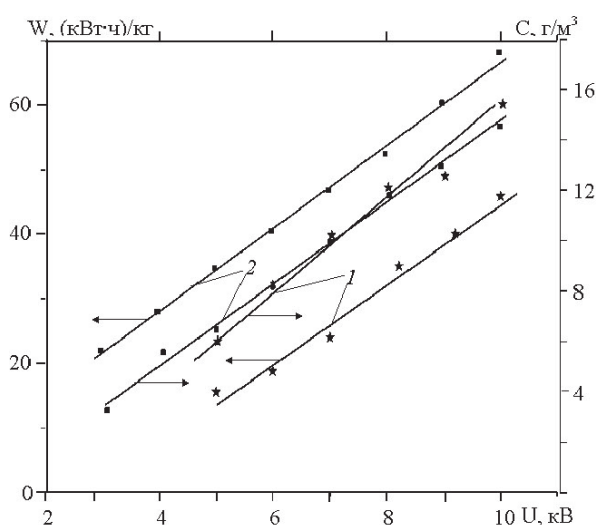


Рисунок 1.13 – Зависимость концентрации озона (C) и удельных энергетических затрат (W) от напряжения (U) в поверхностных барьерных разрядах с плазменным (1) и классическим (2) электродами

к линейному уменьшению концентрации озона во всем интервале напряжений. Например, при напряжении на коронирующем электроде 10 кВ концентрация уменьшается с 11 до 2 $\text{г}/\text{м}^3$. При напряжениях 5–10 кВ минимум энергетических затрат наблюдается при $P = 6,65$ кПа (рисунок 1.12), а при дальнейшем увеличении давления наблюдается максимум. Увеличение шага навивки с 1,1 до 80 мм приводит к постепенному исчезновению максимума в зависимости энергетических затрат от давления.

При заполнении разрядного электрода водопроводной водой (вода является некоронирующим электродом) реализуется классический поверхностный барьерный разряд. Это позволяет сравнить характеристики синтеза озона в двух разрядах при одинаковых условиях.

На рисунке 1.13 видно, что в данных разрядах образуются близкие значения концентраций озона в интервале напряжений на коронирующем электроде 5–10 кВ при шаге навивки 1–2 мм. При напряжении 10 кВ энергетические затраты, идущие на синтез озона для плазменного электрода, в два раза меньше, чем для классического разряда. Это связано с тем, что в разряде с плазменным электродом емкость диэлектрического барьера мала по сравнению с емкостью классического разряда. Поэтому средний ток и полная мощность, потребляемая разрядным узлом, уменьшаются.

Наиболее эффективно в БПРПЭ синтез озона идет при давлении газа в разрядной трубке 6,65 кПа (рисунок 1.14). Максимум силы тока наблюдается при шагах навивки $d = 2,2$ –5,6 мм. С ростом шага навивки электрический ток монотонно уменьшается. При 10 кВ максимум концентрации озона приходится на $d = 25$ мм, а при снижении напряжения он смещается в сторону меньших d . Концентрация озона уменьшается вследствие увеличения шага навивки, уменьшения силы тока разряда и мощности. При $d = 25$ мм разряд имеет диффузную структуру и с увеличением шага навивки на поверхности

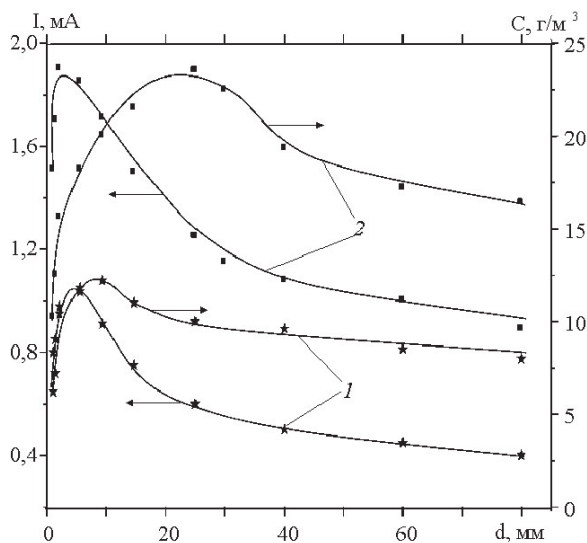


Рисунок 1.14 – Изменение силы тока разряда (I) и концентрации озона (C) от шага навивки электрода (d): давление в разрядной трубке 6,65 кПа, напряжение: 7 (1) и 10 (2) кВ

трубки появляются ярко светящиеся микроразряды, наличие которых способствует термическому разложению озона. Удельные энергетические затраты, идущие на синтез озона, в зависимости от шага навивки изменяются нелинейно (рисунок 1.14). Оптимальный режим для синтеза озона соответствует шагу навивки 25 мм. При давлении 6,65 кПа в интервале $d = 1-80$ мм зависимости концентрации озона от удельной мощности имеют возрастающий характер.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

- статические характеристики БППЭ отличаются от аналогичной зависимости для барьерного и поверхностного разрядов тем, что в них появляется еще одно изменение в районе 600–700 В, которое соответствует зажиганию тлеющего разряда в вакуумной

трубке. При напряжении порядка 1,8–1,9 кВ зажигается исследуемый БППЭ;

- из динамических характеристик следует, что порядка 70 % тока разряда приходится на высокочастотную составляющую;
- коэффициент мощности в БППЭ больше, чем у классического барьерного и поверхностного разрядов за счет большого вклада высокочастотного тока в активную мощность;
- зависимость тока от давления и шага навивки коронирующего электрода определяются структурной перестройкой разряда в зависимости от давления и взаимной экранировкой соседних витков коронирующего провода [6].

Плазменный электрод, благодаря изменению электрических характеристик поверхностного барьерного разряда, позволяет повысить энергетическую эффективность синтеза озона. В разрядной трубке для напряжений (2–10 кВ) давление 6,65 кПа является оптимальным с точки зрения удельных энергетических затрат и получения максимальной концентрации озона. Установлено, что для синтеза озона наиболее эффективным является шаг навивки коронирующего электрода 25 мм [7, 20].

1.2. Синтез озона в комбинированных разрядах

1.2.1. Электрический разряд комбинированного типа. Рассмотрим закономерности синтеза озона в комбинированных газовых разрядах типа барьерного и поверхностного, объединенных в одну разрядную ячейку. Отдельные компоненты этой системы рассматриваются как независимые элементы электрической цепи, соединенные последовательно по электрическому току и по потоку плазмообразующего газа. Интерес к комбинированным плазменным системам обусловлен возможностью их применения в качестве генераторов озона высоких и сверхвысоких концентраций.

Разработано устройство, включающее барьерный и поверхностный разряды (БПКР). Электрический разряд комбинированного типа зажигается в разрядной ячейке (рисунок 1.15), представляющей собой систему из стеклянных трубок 1–3, расположенных коаксиально друг относительно друга. Корпусом установки является стеклянная трубка 3, длиной 1 метр. Диаметры трубок равны соответственно: $D_1 = 25,65$ мм, $D_2 = 30,4$ мм, $D_3 = 37,6$ мм. Центральная трубка 1 является основным охлаждаемым электродом разрядной ячейки, в которую подается проточная вода из водопровода. Второй электрод (4) представляет собой спираль из провода (нихром, диаметром 0,2 мм), навитую на стеклянную трубку диаметром D_2 с шагом навивки 1 см. При подаче на электроды 4 и 5 переменного напряжения до 10 кВ с частотой 50 Гц, между первой и второй трубкой загорается барьерный разряд, а по поверхности трубки 2 развивается поверхностный разряд.

Конструкция озонатора позволяет прокачивать кислород через последовательно соединенные разряды и выводить озонную и кислородную смесь через патрубков 6. Концентрация озона, синтезируемая на участке до 20 г/м³, определяется при помощи озонметра (Медозон 254/3), а при высоких концентрациях – с помощью йодометрического метода.

1.2.2. Статические и динамические характеристики разряда. Вольт-амперные характеристики БПКР (рисунок 1.16) для различных расходов кислорода по характеру изменения практически не отличаются от характеристик классического барьерного разряда. Участок АВ соответствует зависимости среднего тока от эффективного напряжения при отсутствии разряда на поверхности трубки и между барьерами. Наклон участка АВ определяется общей емкостью разрядной ячейки. При зажигании и развитии комбинированного электрического разряда изменяется наклон характеристики (участок ВС), что связано с увеличением емкости разрядной ячейки. Изменение расхода кислорода практически не влияет на наклон второго участка ВАХ.

Увеличение шага навивки коронирующего электрода с 2 до 20 мм для различных напряжений (5, 7 и 10 кВ) на разрядном промежутке (рисунок 1.17), приводит к уменьшению разрядного тока в два раза. Это объясняется повышением емкостного сопротивления за счет уменьшения емкости разрядного контура при увеличении шага коронирующего электрода.

Осциллограммы тока и напряжения регистрируются синхронно на двухлучевом осциллографе С1-83. Кривые тока и напряжения на озонаторе симметричны относительно оси абсцисс (рисунок 1.18). Видно, что сдвиг фаз между током и напряжением составляет около $\pi/2$, что соответствует, в основном, емкостной нагрузке ЭРКТ. Деформация

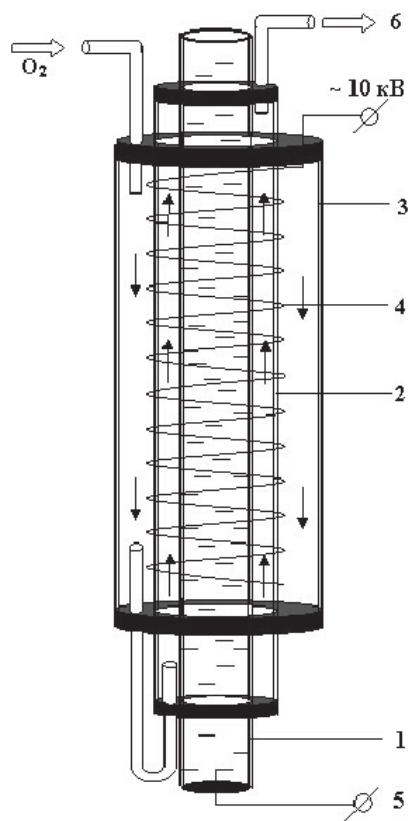


Рисунок 1.15 – Схема разрядной ячейки БПКР: 1 – центральная труба, 2 – промежуточная труба, 3 – корпус установки, 4 – высоковольтный электрод, 5 – заземленный электрод, 6 – патрубков для вывода озона

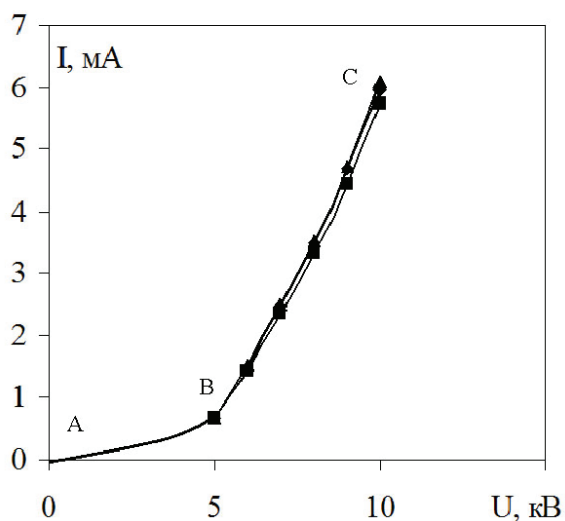


Рисунок 1.16 – Вольт-амперная характеристика разрядной ячейки для расхода кислорода в диапазоне 0,043–0,072 м³/ч

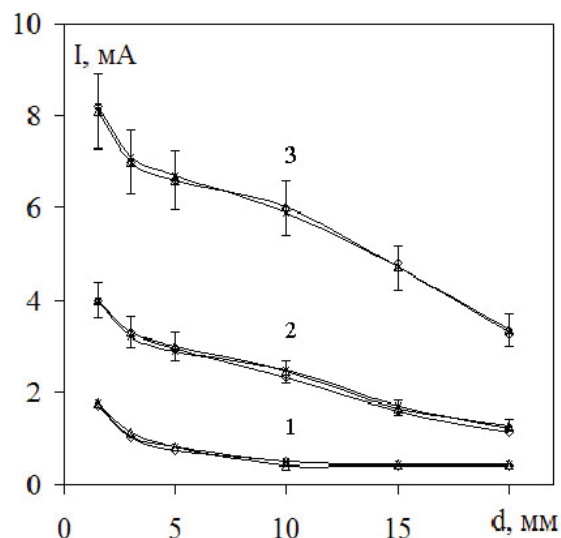


Рисунок 1.17 – Зависимость эффективного тока от шага навивки коронирующего электрода при напряжениях: 5 (1), 7 (2) и 10 (3) кВ

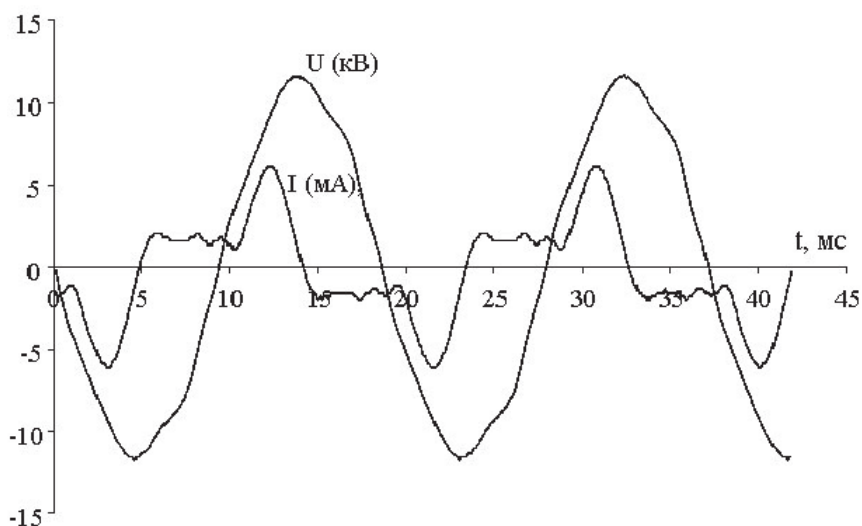


Рисунок 1.18 – Осциллограммы тока и напряжения БПКР при $U_{эф} = 8,2$ кВ и шаге навивки коронирующего электрода $d = 10$ мм

формы тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ от синусоиды соответствует наличию активного сопротивления в цепи БПКР [40, 41].

Из осциллограмм тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ определяются следующие величины: средний ток I_{cp} , полная N , активная W и реактивная N_p мощности:

$$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} |I(t)| dt, \quad N = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} |I(t)U(t)| dt, \quad W = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I(t)U(t) dt,$$

$$N_p = \sqrt{N^2 - W^2}, \quad N_p = I_{cp}^2 R_c = \frac{I_{cp}^2}{2\pi\nu C}.$$

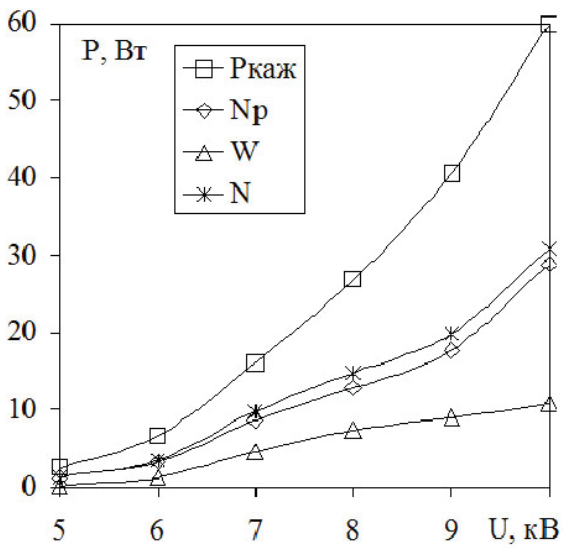


Рисунок 1.19 – Зависимость полной N , активной W , реактивной N_r мощностей от напряжения при шаге навивки $d = 10$ мм

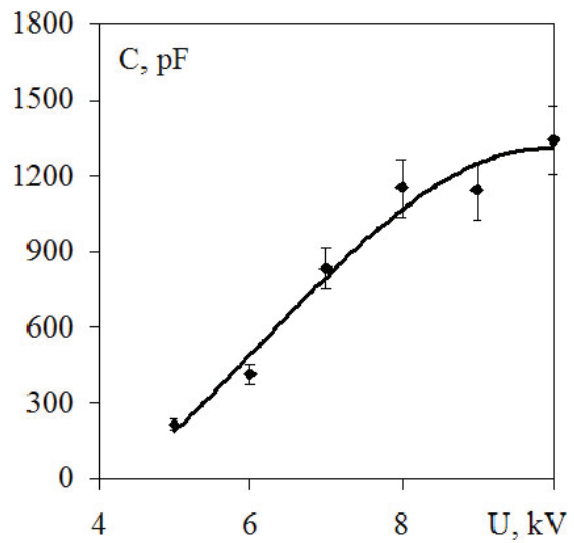


Рисунок 1.20 – Зависимость динамической емкости C от эффективного напряжения при шаге навивки $d = 10$ мм

По динамическим характеристикам БПКР находятся полная, активная и реактивная мощности (рисунок 1.19), а из реактивной – общая емкость озонатора C , где R_c – емкостное сопротивление (рисунок 1.20). Подводимая от источника тока активная мощность при напряжении 10 кВ не превышает 11 Вт, а при меньших напряжениях она принимает значения от 0,2 до 7 Вт. Для полной и реактивной мощностей кривые практически параллельны друг другу, а небольшое различие связано с тем, что большая часть энергии снова возвращается к источнику тока, и лишь незначительная часть полной мощности переходит в активную. Активная мощность расходуется на синтез озона и на джоулево тепловыделение в разрядной ячейке.

Емкость озонатора меняется в зависимости от стадии развития поверхностного и барьерного разрядов в озонирующей ячейке. Для динамической емкости озонатора (рисунок 1.20) с повышением напряжения характерен плавный выход к определенному значению емкости 1,2–1,3 нФ, что характеризуется заполнением межвиткового пространства плазмой. Дальнейшее увеличение эффективного напряжения приводит к установлению динамической емкости разрядного контура, но вероятен пробой барьерного диэлектрика и выход из строя всей разрядной ячейки. Динамическая емкость в момент зажигания равна 215 пФ и соответствует емкости озонатора без разряда. Максимальная емкость составляет 1200 пФ при напряжении 10 кВ.

На основе экспериментальных данных по полной и активной мощностям находится коэффициент мощности (рисунок 1.21), который играет важную роль при определении параметров озонатора и при выборе оптимального электрического режима его работы. Как видно на рисунке 1.21, коэффициент мощности принимает различные значения и достигает максимума (~0,5) при эффективном напряжении 8 кВ. Коэффициент мощности определяет пределы для напряжений, при которых происходит максимально возможное использование полной мощности и переход её в активную мощность с наибольшим вкладом электрической энергии в разряд. Для данной разрядной ячейки оптимальные

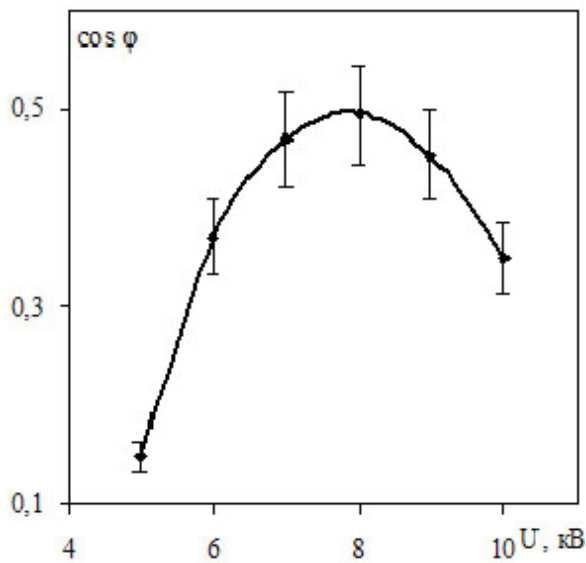


Рисунок 1.21 – Зависимость коэффициента мощности от эффективного напряжения

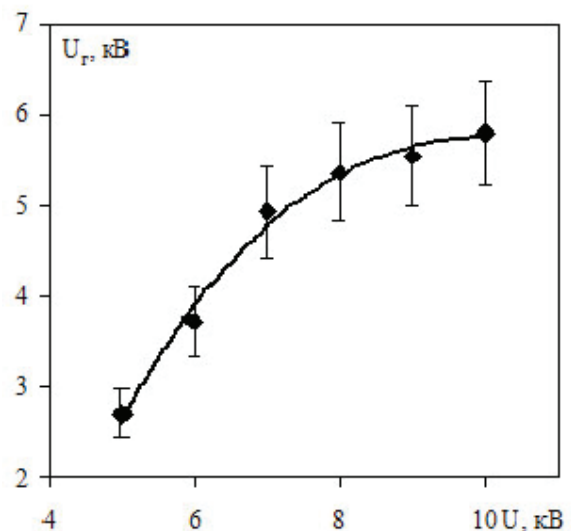


Рисунок 1.22 – Зависимость напряжения горения от эффективного напряжения, шаг навивки $d = 10$ мм

значения эффективного напряжения реализуются в пределах 7–9 кВ. Дальнейшее увеличение эффективного напряжения приводит к увеличению энергетических затрат, идущих на синтез озона.

Вольт-кулоновские характеристики БПКР (циклограммы) регистрируются на двулучевом осциллографе С1-83. По площади циклограммы определяется активная мощность W и напряжение горения разряда. Зависимость напряжения горения БПКР от эффективного напряжения при шаге навивки $d = 10$ мм показана на рисунке 1.22. Напряжение горения нелинейно возрастает с 2,5 до 6 кВ при увеличении эффективного напряжения с 5 до 10 кВ. Увеличение напряжения приводит к расплыванию плазмы по поверхности трубки от соседних витков спирали во встречном направлениях, что приводит к росту напряжения горения. При значении напряжения $U_{эф} \approx 8$ кВ практически вся поверхность диэлектрика покрыта плазмой разряда. Дальнейшее повышение напряжения питания не приводит к увеличению протяженности разряда и напряжения горения.

1.2.3. Синтез озона в разряде комбинированного типа. Кинетика синтеза озона в электрическом разряде комбинированного типа зависит от параметров разрядного контура: шага навивки коронирующего электрода, толщины диэлектрического барьера, материала диэлектрика, расхода плазмообразующего газа, напряжения на разрядном контуре, толщины коронирующего электрода. Определение оптимальных режимов работы озонатора производится на основе анализа экспериментальных данных выхода озона и удельных энергетических затрат, идущих на его синтез от шага навивки коронирующего электрода, расхода кислорода и напряжения на разрядном промежутке.

Как показали результаты измерений (рисунки 1.23–1.25), наблюдаются нелинейные зависимости концентрации озона от напряжения на разрядном промежутке при различных расходах кислорода и от шага навивки коронирующего электрода. Для небольших шагов навивки с ростом напряжения реализуются большие скорости образования озона (рисунки 1.23, 1.24, 1). Для шага 1,5 мм это составляет 6,5 кВ (рисунок 1.23, 1)

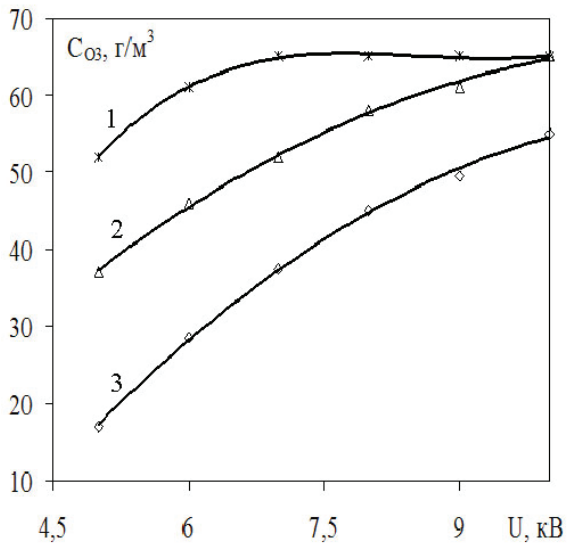


Рисунок 1.23 – Зависимость концентрации озона от напряжения для шага навивки коронирующего электрода 1,5 мм и расхода кислорода: 1 – 0,0132; 2 – 0,046; 3 – 0,072 м³/час

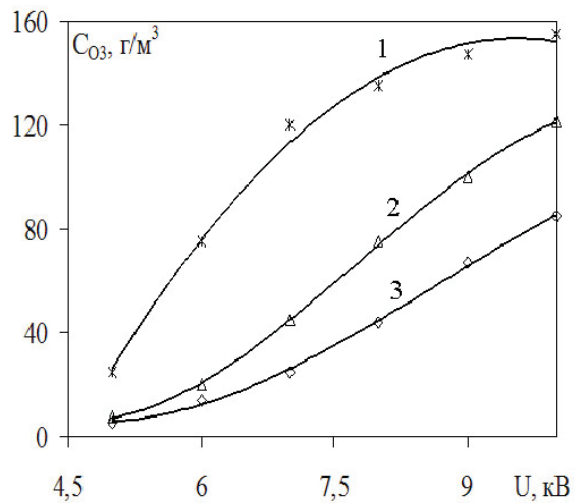


Рисунок 1.24 – Зависимость концентрации озона от напряжения для шага навивки коронирующего электрода 10 мм и расхода кислорода: 1 – 0,0132; 2 – 0,046; 3 – 0,072 м³/час

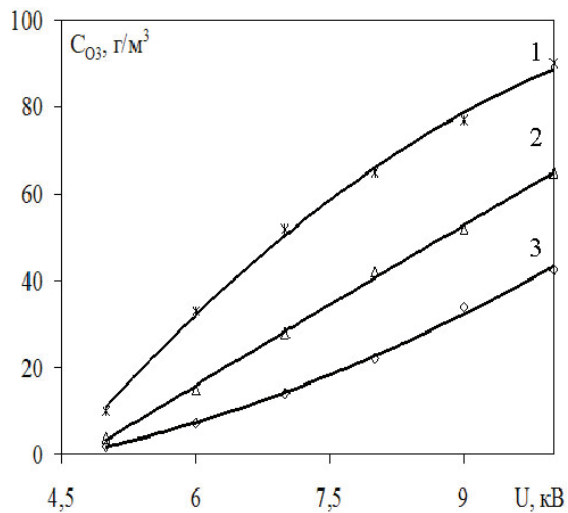


Рисунок 1.25 – Зависимость концентрации озона от напряжения для шага навивки электрода 20 мм и расхода кислорода: 1 – 0,0132; 2 – 0,046; 3 – 0,072 м³/час

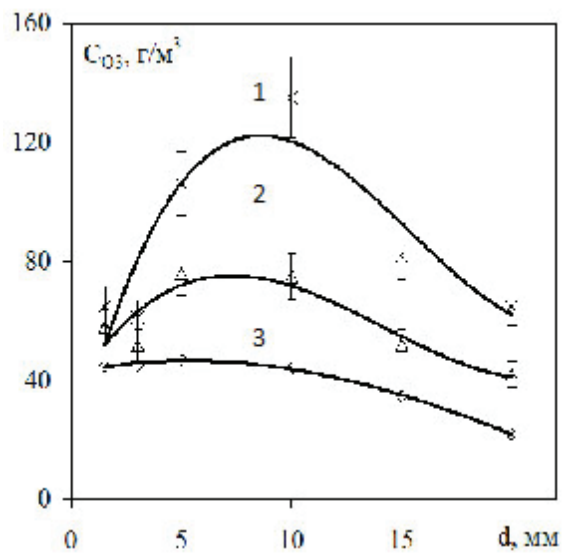


Рисунок 1.25 – Зависимость концентрации озона от напряжения для шага навивки электрода 20 мм и расхода кислорода: 1 – 0,0132; 2 – 0,046; 3 – 0,072 м³/час

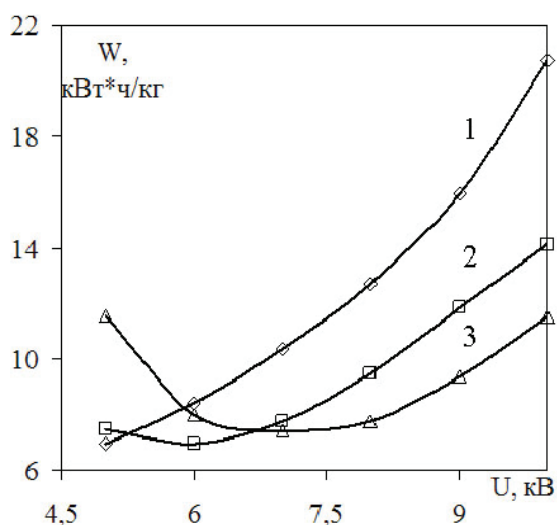


Рисунок 1.27 – Зависимость энергетических затрат от напряжения: расход кислорода 0,072 м³/час, шаг навивки: 1–1,5, 2–5, 3–10 мм

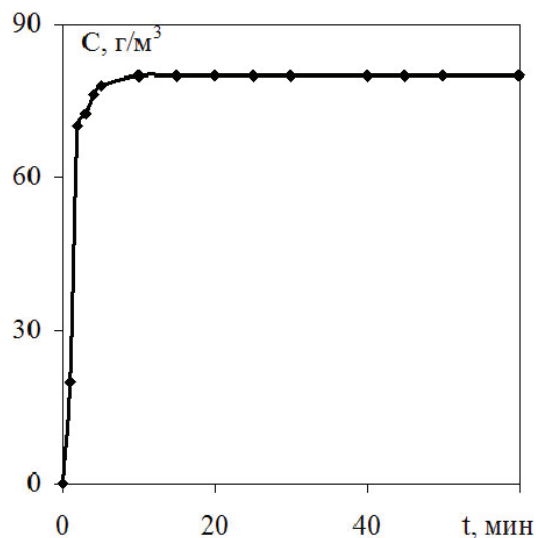


Рисунок 1.28 – Зависимость концентрации озона на выходе озонатора от времени работы

и увеличивается до 12 кВ при шаге навивки 20 мм. С увеличением шага навивки (рисунок 1.25, 1) концентрация образования озона снижается. Максимальные концентрации озона (до 160 г/м³) образуются при напряжениях ~9 кВ (рисунок 1.24, 1) и расходе кислорода 0,0132 м³/час.

Полученные результаты (рисунки 1.23, 1.24) показывают, что наиболее оптимальный режим синтеза высоких концентраций озона происходит при напряжении на БПКР 8 кВ. Для данного напряжения зависимость концентрации озона от шага навивки коронирующего электрода и от расхода кислорода проходит через максимум (рисунок 1.26) в диапазоне шагов навивки 5–10 мм.

Показателем эффективности синтеза озона является энергетический выход озона или удельные энергетические затраты. Как показано на рисунке 1.27, при шаге навивки 1,5 мм удельные энергетические затраты возрастают во всем диапазоне напряжений. Использовать данную конструкцию для синтеза озона энергетически невыгодно. При увеличении шага навивки коронирующего электрода энергетические затраты, идущие на синтез озона, в диапазоне напряжений 6–8 кВ проходят через минимум (~8 кВт*ч/кг) (рисунок 1.27, 2, 3).

Характеристики разрядной ячейки в режиме длительной работы при напряжении на разряде 10 кВ и расходе кислорода 0,072 м³/ч, практически не изменяются. В начальные моменты времени (рисунок 1.28) наблюдается быстрый рост концентрации озона – до 80 г/м³ на выходе озонатора. В течение дальнейших 60 минут работы озонатора концентрация озона практически не изменяется. Наиболее эффективно вклад энергии в комбинированном разряде происходит при шаге навивки коронирующего электрода 10 мм, и при подаче эффективного напряжения в пределах 7–9 кВ. Максимальное значение коэффициента мощности в данном случае ~ 0,5 [9, 10].

Таким образом, экспериментально установлено, что электрический разряд комбинированного типа по своим электрическим характеристикам похож на классический барьерный разряд.

Отличительными особенностями БПКР являются:

1) отсутствие постоянства напряжения горения как у классического барьерного разряда, происходит лишь незначительное его возрастание при увеличении подаваемого напряжения;

2) общая емкость озонатора нелинейно растет с увеличением эффективного напряжения, так как плазма комбинированного барьерного поверхностного разряда постепенно заполняет разрядный промежуток, увеличивает емкость разрядного контура от 215 до 1340 пФ и изменяет напряжение горения на разрядном промежутке.

1.3. Синтез озона в разряде на полимерных диэлектриках

Рассмотрим конструкции, используемые для синтеза озона с модификацией поверхности полимерами в озонаторных установках и в плазмохимических реакторах на барьерном, коронном и импульсно-периодическом коронном разрядах.

Для модификации пленочных материалов и синтеза озона широкое распространение получили системы на основе барьерного разряда с импульсной формой выходного напряжения источников питания [42–45]. Рабочая частота преобразователя источника питания подбирается равной резонансной частоте колебательного контура, образованного емкостью электродов и индуктивностью вторичной обмотки высоковольтного трансформатора [1].

1.3.1. Ресурс работы диэлектрического барьера в озонаторе. В настоящее время разработаны высокопроизводительные озонаторы на основе высокочастотного барьерного и поверхностного разрядов [38, 46–49]. Озон является сильным окислителем и в озонаторе происходит интенсивный износ его элементов. Первым из строя выходит диэлектрический барьер разрядной ячейки, которая кроме воздействия озона, испытывает разрушения, обусловленные микроразрядами и влиянием высокочастотного электрического поля. Совместное действие этих факторов приводит к пробое диэлектрического барьера и короткому замыканию разрядного промежутка. Если разряд в озонаторе горит устойчиво однородно и параметры барьера (материал, геометрия и размеры) подобраны правильно, то озонатор работает практически долго.

В данной работе представлена конструкция озонатора, в котором диэлектрический барьер выполнен из современного и высокотехнологичного материала – гамма облученного полиэтилена низкой плотности (ПНП), устойчивого к агрессивным средам различного вида. В отличие от полиэтилена высокой плотности, ПНП представляет собой прочный, очень гибкий и слегка упругий термопласт, мягкий, легко формуемый и выдавливаемый. Данный материал находит широкое применение в производстве покрытий, упаковочных материалов и изделий, изготавливаемых методом литьевого формования. Основное свойство ПНП – способность изменять свой диаметр, сжиматься под воздействием высокой температуры (от 70 до 300 °С). Во время усадки трубка плотно охватывает предмет, на котором происходит усадка, повторяя его контуры и обеспечивая механическую и электрическую защиту. Процесс усадки, как правило, происходит быстро, достаточно лишь нагреть трубку до нужной температуры.

1.3.2. Характеристики разряда на поверхности гамма облученного полиэтилена. Рассмотрим две конструкции разрядной ячейки, отличие которых заключается

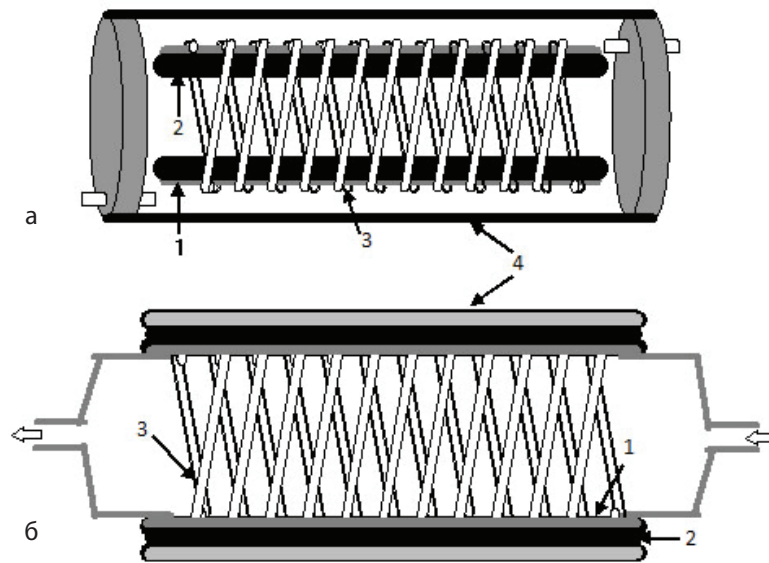


Рисунок 1.29 – Схемы разрядных узлов установки: а – первой, б – второй конструкции: 1 – диэлектрический барьер из полиэтилена низкой плотности, 2 – металлический электрод, 3 – спираль из нихрома (электрод), 4 – внешний кожух

в расположении разрядной зоны. Диэлектрическим барьером является термоусадочная трубка из ПНП.

В первой конструкции (рисунок 1.29, а) синтез озона осуществляется на внешней стороне ПНП длиной 1 м, диаметром 10 мм и толщиной стенки 1 мм. Усадка трубки производится на металлический электрод 2 диаметром 8 мм. Диаметр ПНП подбирается таким образом, чтобы после усадки она плотно обжимала металлический электрод. На поверхность диэлектрика наматывается электрод 3 в виде спирали из нихрома, диаметром 0,8 мм, с шагом навивки 10 мм. Полученный разрядный контур помещается в стеклянный кожух 4, через который прокачивается плазмообразующий газ. При подаче на электроды переменного напряжения до 10 кВ, частотой 50 Гц, зажигается барьерный поверхностный разряд.

Во второй конструкции (рисунок 1.29, б) синтез озона осуществляется на внутренней поверхности трехслойного барьера 1 из ПНП длиной 1 м, толщиной равной толщине барьера 1 мм. Коронирующий электрод 2 в виде спирали из нихрома, диаметром 0,8 мм и шагом навивки 10 мм размещается без зазора на внутренней поверхности диэлектрического барьера. Второй электрод 3 из тонкой фольги располагается на наружной части термоусаживаемой трубки. Рабочий газ прокачивается через полость трубки. В качестве плазмообразующего газа используется кислород, осушаемый до точки росы ($-55\text{ }^{\circ}\text{C}$). Расход кислорода регулируется ротаметрами, а концентрация озона определяется на выходе при помощи озонметра (Медозон 254/3). Питание разрядных ячеек осуществляется от трансформатора ТГ-1020 в интервале напряжений $0\div 10$ кВ.

По известным значениям расхода кислорода, концентрации озона и мощности разряда определяются энергетические показатели синтеза озона. Вольт-амперная характеристика разряда (рисунок 1.30) близка к линейной зависимости для обеих модификаций разряда. Значения тока практически не зависят от расхода плазмообразующего

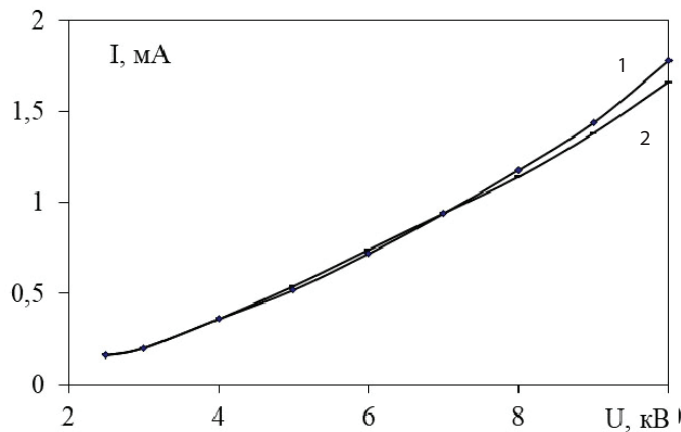


Рисунок 1.30 – Вольт-амперная характеристика разряда: 1 – внутри, 2 – снаружи полиэтилена низкой плотности

газа, хотя с увеличением скорости потока можно заметить общую тенденцию, направленную на уменьшение тока.

Максимальное значение эффективного тока разряда составляет 1,78 мА при напряжении 10 кВ. Экстраполируя линейную зависимость до пересечения с осью абсцисс, определяется напряжение зажигания разряда U_z [2]. Для разряда снаружи трубки U_z оно близко к значению 2,2 кВ, а для разряда на внутренней поверхности равно 2,3 кВ. Экспериментально зафиксированное напряжение зажигания для обоих случаев одинаково и составляет 2,2 кВ.

При низких напряжениях значение электрического тока для разряда снаружи (первая конструкция) совпадает с током разряда на внутренней поверхности трубки (вторая конструкция). С увеличением напряжения наблюдается расхождение значений. Ток разряда внутри трубки возрастает быстрее (рисунок 1.30, кривая 1). Разница для токов при одинаковых прочих параметрах определяется различной концентрацией озона в разряде.

Напряженность электрического поля находится по способу Максвелла. Для этого строятся электрические поля двух точечных зарядов, силовые линии которых выходят из центра и, пересекаясь в пространстве, образуют сетку четырехугольных ячеек, большая диагональ которых равна геометрической сумме напряженности полей. Соединяя соответственные углы ячеек сетки, получается картина результирующего поля. В случае неоднородной диэлектрической среды, силовые линии переходят из одной диэлектрической среды – воздуха с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1 = 1$, в другую среду – полиэтилен с $\epsilon_2 = 3,2$. Нормальная составляющая напряженности поля, уменьшается во столько раз, во сколько увеличивается диэлектрическая проницаемость среды. Вследствие этого изменяется длина силовых линий [48].

Экспериментальная разрядная ячейка (рисунок 1.29, а) разбивается на большое количество элементарных областей, и в каждой области проволочный электрод представляется как точечный заряд, лежащий на диэлектрической подложке, за которым находится проводящая плоскость – другой электрод. Электрическое поле одиночного провода над плоскостью вдоль прямой линии, соединяющей провод с плоскостью, находится из выражения [27]:

$$E(s) = \frac{U}{s \cdot \ln(2L / r_0)},$$

где U – напряжение; $r_0 = 0,04$ см – радиус проволочного электрода; s – расстояние вдоль силовой линии от центра электрода до рассматриваемой точки; L – расстояние вдоль силовой линии от центра электрода до другого электрода. Для разряда, горящего снаружи термоусадочной трубки, полученные значения напряженности поля представлены на рисунке 1.31, 1).

Для разряда внутри термоусадочной трубки элементарная область (рисунок 1.29, б) имеет несколько отличный характер от элементарной области разряда, расположенного вне трубки (рисунок 1.29, а). Расстояние от коронирующего электрода, лежащего на диэлектрическом барьере до диаметрально противоположной стенки барьера, за которой расположен другой электрод, сравнительно мало, и между электродами возникает электрическое поле. Элементарную область разрядной ячейки можно разделить на две части: 1) полностью соответствует элементарной области первой конструкции разряда; 2) состоит из коронирующего электрода, неоднородного барьера (воздуха и ПНП) и второго электрода. Распределение напряженности электрического поля в этом случае определяется согласно принципу суперпозиции полей: 1) для системы коронирующий электрод – барьер – другой электрод; 2) коронирующий электрод – воздух – барьер – другой электрод (рисунок 1.31, 2). Как видно на рисунке 1.31, напряженность электрического поля для первой конструкции разрядной ячейки значительно выше ~25 % напряженности электрического поля второй конструкции.

При низких напряжениях значение тока для разряда снаружи полиэтилена низкой плотности совпадает с током разряда на внутренней поверхности трубки. С увеличением напряжения наблюдается расхождение значений. Ток разряда внутри трубки возрастает быстро (рисунок 1.30, кривая 1). Разница для токов при одинаковых прочих параметрах определяется различной концентрацией озона в разряде.

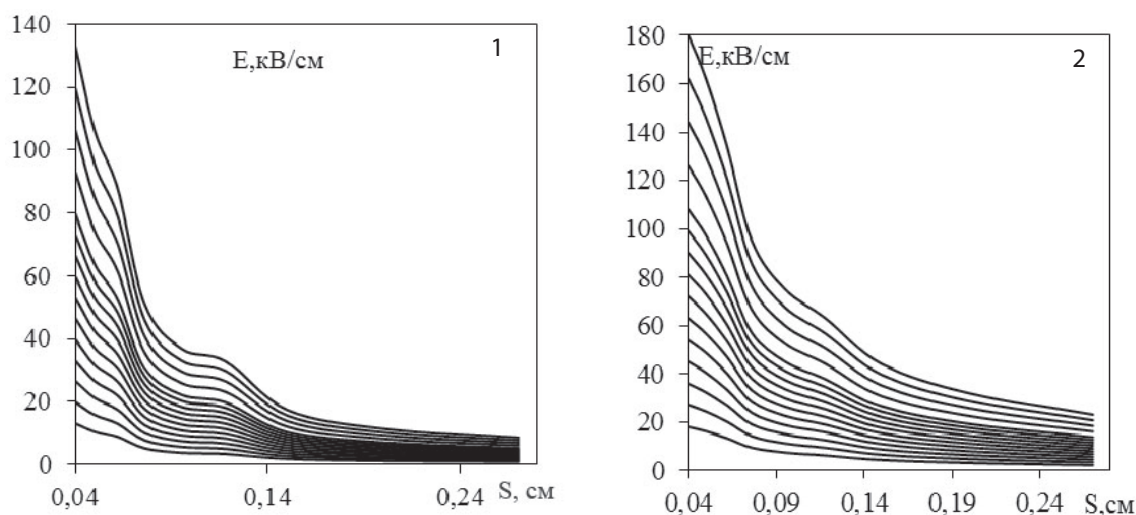


Рисунок 1.31 – Распределение напряженности электрического поля в барьерном поверхностном разряде: 1 – снаружи, 2 – внутри полиэтилена низкой плотности

1.3.3. Синтез озона в разряде на поверхности полиэтилена. Зависимость концентрации озона от расхода плазмообразующего газа имеет характер, аналогичный результатам, полученным на других подобных конструкциях озонаторов [35, 18]. Концентрация озона уменьшается с увеличением расхода плазмообразующего газа. Концентрация озона (рисунок 1.32) и наработка (расход) озона (рисунок 1.33) растут с напряжением, причем их значения в разряде, горящем снаружи полиэтилена низкой плотности, на 35 % выше, чем для разряда внутри. Разница в производительности озона, по-видимому, связана с конструктивными особенностями исполнения разрядной ячейки и распределением электрического поля на поверхности.

Напряженность электрического поля влияет на развитие микрозарядов, в которых происходит электросинтез озона. В первом варианте исполнения разрядной ячейки уменьшение электрического поля не происходит, и развитие микрозарядов ничего не ограничивает. Во втором варианте при малых напряжениях уменьшение электрического поля незначительно и доминирующую роль играет напряженность поля на поверхности диэлектрика, непосредственно соприкасающегося с коронирующим электродом (как и в первом случае). Количество токовых каналов в первой и второй конструкциях разрядной ячейки равны, что и дает эквивалентные значения силы тока и сравнительно близкий результирующий выход концентрации озона. С увеличением напряжения силовые линии искажаются, а напряженность поля на поверхности контактирующего диэлектрика уменьшается, что препятствует развитию микрозарядов. Поэтому для развития микрозарядов на внутренней поверхности требуется большее напряжение. Это приводит к тому, что при одинаковых напряжениях и геометрических параметрах разрядной камеры, концентрация и наработка озона в разрядной ячейке первого типа выше, чем для второго [19].

При технологическом использовании озона первостепенное значение имеет энергетический выход ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{кгO}_3$), на который влияют геометрические параметры разряда

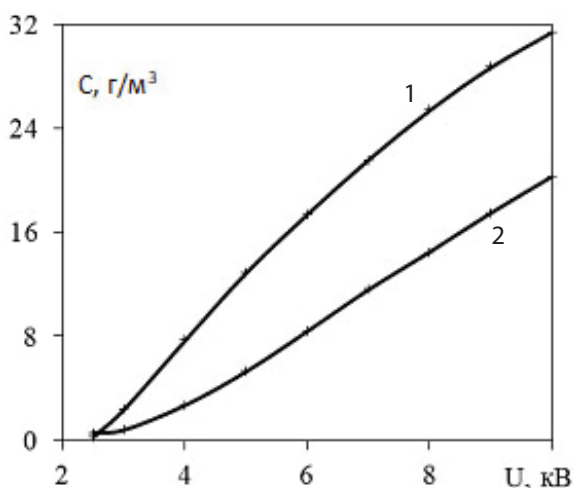


Рисунок 1.32 – Концентрация озона в разряде на полиэтилене низкой плотности: 1 – снаружи; 2 – внутри трубки

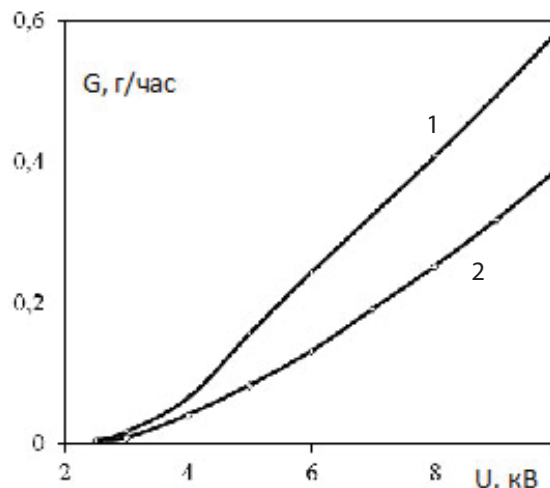


Рисунок 1.33 – Нарработка озона в разряде на полиэтилене низкой плотности: 1 – с наружи; 2 – внутри трубки

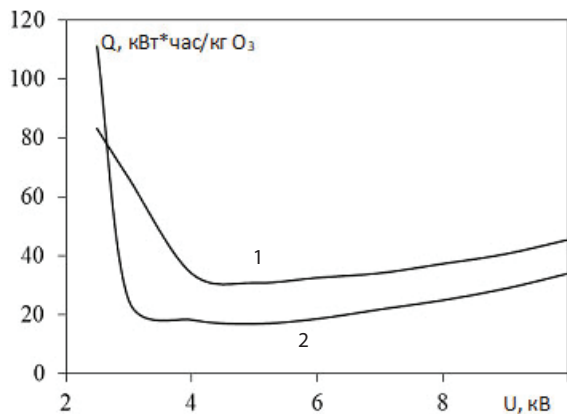


Рисунок 1.34 – Энергетические затраты на синтез озона в разряде на полиэтилене низкой плотности: 1 – снаружи трубки, 2 – внутри трубки

и конструктивные особенности разрядной камеры. Зависимости энергетических затрат от напряжения для разряда на полиэтилене низкой плотности представлены на рисунке 1.34. Минимум энергетических затрат, идущих на синтез озона, приходится на эффективное напряжение 4–5 кВ и составляет 20 кВт*ч/кгO₃ для первой конструкции разрядной ячейки и 35 кВт*ч/кгO₃ – для второго варианта разрядной ячейки. Расход плазмообразующего газа на энергетические затраты сказывается незначительно, при варьировании расхода от 0,2 л/мин до 1 л/мин максимальный разброс составляет 13 %. В целом энергетические затраты входят

в предел допустимых значений и для данного типа диэлектрика они являются оптимальными.

Таким образом, озонаторная установка первой конструкции с барьером из полиэтилена низкой плотности, исполненного в виде термоусадочной трубки, позволяет получать высокие концентрации озона при низких токах и незначительных энергетических затратах. Учитывая низкую себестоимость материала диэлектрического барьера, простоту исполнения устройства и возможность быстрой замены поврежденных участков, предложенную конструкцию озонаторной ячейки можно рекомендовать для различных практических целей.

1.3.4. Поверхностный разряд с коронирующим электродом. В обычных озонаторах диэлектрическим барьером является стекло – материал непрочный и требующий особой осторожности в обращении [1, 35]. В озонаторах [18–21, 48, 49] используется доступный и недорогой диэлектрик – поливинилхлорид, выполненный в виде трубки. Озонатор прост в изготовлении, надежный и безопасный в эксплуатации, позволяет получать высокие концентрации озона и относительно не дорогой.

Конструкция разрядной ячейки (рисунок 1.35) представляет собой диэлектрическую трубку из поливинилхлорида (1), внешний диаметр 15 мм, толщина стенок 2,5 мм, вдоль оси трубки прокачивается рабочий газ (кислород или воздух). Диэлектрическая трубка помещается в плотно закрывающуюся металлическую ёмкость (2).

Ёмкость заполняется проточной водой. Подача (3) и отток (4) воды происходит через трубки, закрепленные на крышке емкости. Охлаждение диэлектрической трубки необходимо для предотвращения термического разложения озона в результате перегрева разрядной области. Внутри диэлектрической трубки помещается коронирующий электрод (5) в форме спирали из нихромовой проволоки диаметром от 0,2 до 2 мм, с заданным шагом. В экспериментах шаг коронирующего электрода варьировался от 0,15 до 3 см. Для реализации барьерно-поверхностного разряда расстояние между спиралью и трубкой не должно быть большим. Рассматриваются случаи, когда спираль находится на расстоянии 1 мм от стенки трубки или плотно прилегает к стенкам трубки. Блок питания подает напряжение от 500 до 10000 В, с частотой 50 Гц на коронирующий спиральный электрод

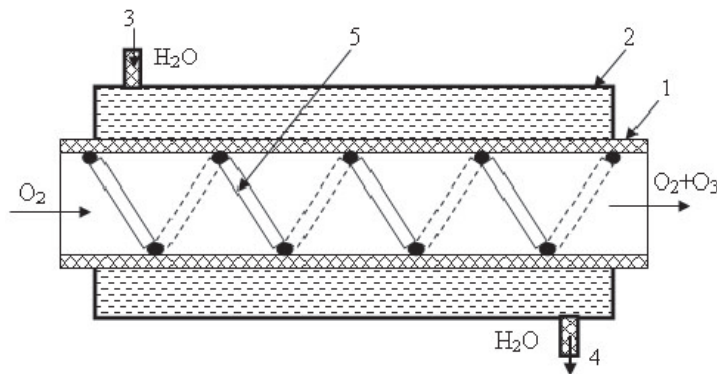


Рисунок 1.35 – Конструкция разрядной ячейки: 1 – трубка из поливинилхлорида, 2 – металлическую ёмкость, 3 и 4 – патрубки подачи и отвода охлаждающей воды, 5 – коронирующий электрод

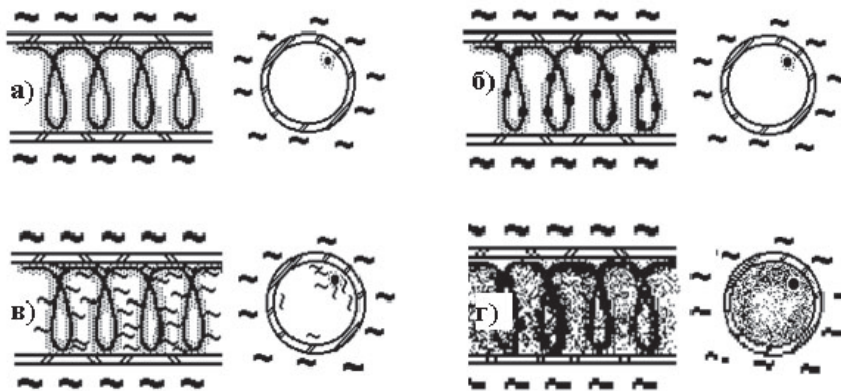


Рисунок 1.36 – Форма барьерного поверхностного разряда в диэлектрической трубке с металлической спиралью при напряжении: а – $U = 2,5$; б – $3,0$; в – $5,0$; г – $9,0$ кВ

внутри трубки и индукционный электрод, роль которого выполняет вода. Рабочим газом являлись осушенный кислород или воздух.

С повышением напряжения в процессе эволюции формы разряда выделяются три основных этапа:

- 1) разряд возникает в виде слабой короны вокруг проволоочки (рисунок 1.36, а);
- 2) с увеличением напряжения возрастает поляризация диэлектрика и напряженность поля у его поверхности, становятся различимы отдельные токовые каналы – стримеры, устремляющиеся на поверхность диэлектрика, вследствие чего разряд переходит в скользящую – поверхностную форму (рисунок 1.36, б);

3) при напряжениях больше $U = 7$ кВ, разряд покрывает не только поверхность трубки, но и распространяется в объеме трубки перпендикулярно ее поверхности (рисунок 1.36, в), так как из-за конструктивных особенностей разрядной ячейки напряженность поля увеличивается у поверхности диэлектрической трубки и в ее внутренней полости.

1.3.5. Синтез озона в разряде с коронирующим электродом. Экспериментально установлено, что с увеличением длины диэлектрической трубки, возрастает разрядная область озонатора, увеличивается мощность, количество микроударов и время

пребывания газа в разряде. До определенного момента это сказывается положительно на синтезе озона. Далее, с увеличением размеров реакционной зоны (длина диэлектрической трубки), концентрация озона проходит через максимум, приходящийся на длину 5 метров (рисунок 1.37). Это связано с наличием двух процессов, влияющих на конечный выход озона – его образование и разложение. Для размеров реакционной зоны больше 5 метров, по-видимому, начинают преобладать процессы разложения, вызванные, по крайней мере, двумя факторами:

- с увеличением времени нахождения газа в разрядной области большой процент наработанного озона попадает в зону микрозарядов, где и происходит его деструкция;
- рост температуры внутри разрядной области приводит к термическому разложению озона.

Если значения тока и мощность разряда практически не зависят от диаметра проволоки спирали, то концентрация нарабатываемого озона ведет себя нелинейным образом (рисунок 1.38). Концентрация озона с увеличением диаметра проволоки проходит через максимум, приходящийся на $d = 0,8$ мм.

При изменении шага навивки коронирующего электрода концентрация озона и активная мощность имеют максимум на шаге $S = 1,5$ см, для напряжения $U = 10$ кВ (рисунок 1.39). Увеличение расхода кислорода приводит к уменьшению концентрации озона для всех исследуемых шагов спирали. При малых шагах концентрации озона образуется меньше из-за ограничения разрядной области, в результате наложения электрических полей соседних витков спирали друг на друга. Влияние полей не позволяет формироваться токовым каналам, в которых происходит синтез озона. При увеличении межэлектродного расстояния влияние полей уменьшается, длина микрозарядов увеличивается, что ведет к росту концентрации озона. При шагах спирали порядка 1,5 см влияние полей становится незначительным и формируются каналы микрозарядов, размеры которых оптимальны для электросинтеза озона. Синтез озона происходит эффективно в лавинах, а не в каналах мощных стримеров из-за высокой температуры плазмы. Уменьшение концентрации озона (рисунок 1.39), по-видимому, связано с развитием мощных стримеров.

Для барьерного поверхностного разряда в диэлектрической трубке с металлической спиралью энергетические затраты, идущие на синтез озона, увеличиваются с уменьшением расхода газа и увеличением длины реакционной зоны. При длине разрядной зоны до 5 метров энергетические затраты растут незначительно до 10 кВт*час/кг. Общий разброс энергетических затрат приходится на область от $3,5 \div 12 (\pm 0,5)$ кВт*час/кг O_3 . При дальнейшем увеличении длины реакционной зоны, энергетические затраты резко возрастают до 80 кВт*час/кг O_3 (рисунок 1.40).

Зависимости энергетических затрат от напряжения для различных шагов навивки коронирующего электрода приведены на рисунке 1.41. Энергетические затраты уменьшаются с изменением напряжения до минимума при $U = 6$ кВ, после чего увеличиваются. При низких напряжениях наблюдается тенденция роста энергетических затрат с увеличением шага спирали, при напряжении в 6 кВ энергетические затраты изменяются в пределах $3,6 \div 4,5$ кВт*час/кг O_3 .

В результате экспериментальных исследований было установлено, что для конструирования энергетически выгодного плазмохимического реактора синтеза озона на основе барьерного поверхностного разряда необходимо: 1) чтобы коронирующий электрод

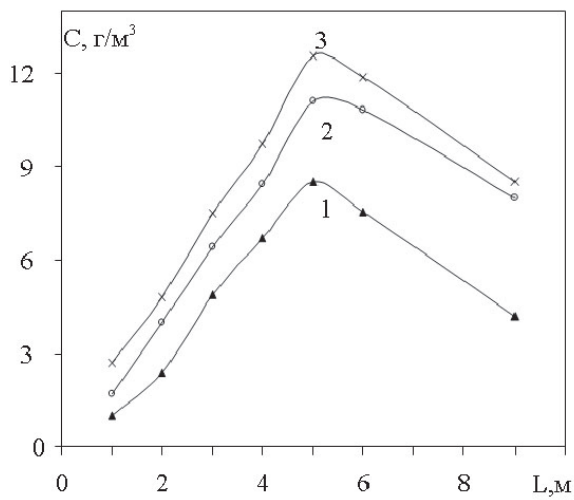


Рисунок 1.37 – Зависимость концентрации озона от длины трубки и расхода газа: 1 – 1; 2 – 0,6; 3 – 0,2 л/мин

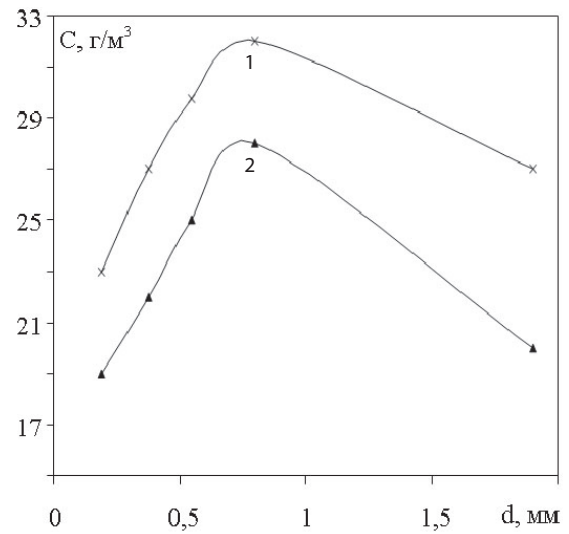


Рисунок 1.38 – Зависимость концентрации озона от диаметра коронирующего электрода и напряжения: 1 – 3; 2 – 10 кВ

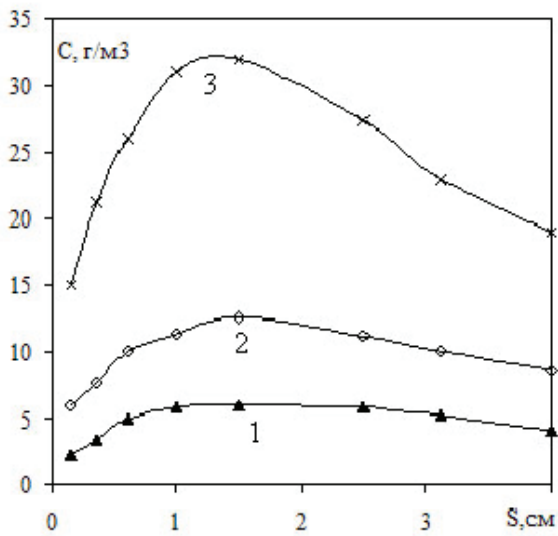


Рисунок 1.39 – Зависимость концентрации озона от шага спирали и расхода кислорода: 1 – 1; 2 – 0,6; 3 – 0,2 л/мин

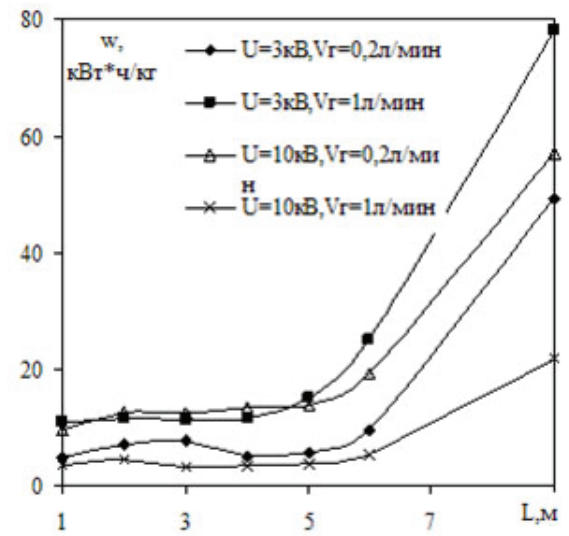


Рисунок 1.40 – Зависимость энергетических затрат от длины разрядной зоны

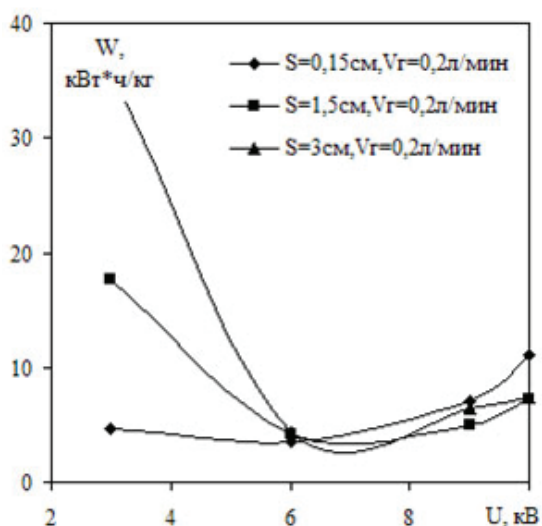


Рисунок 1.41 – Зависимость энергетических затрат от напряжения

лежал на поверхности диэлектрика; 2) длина реакционной зоны разряда не превышала 5 метров; 3) шаг навивки коронирующего электрода соответствовал 1,5 см; 4) диаметр проволоки составлял 0,8 см. Тогда данный озонатор будет вырабатывать концентрацию озона в пределах 150 г/см³ при наработке около 5 г/час и энергетических затратах до 10 кВт*ч/кгО₃ [18–21, 48, 49].

1.3.6. Теплообмен в озонаторе на разряде с коронирующим электродом. Поиск оптимальных режимов работы озонатора, оценка эффективности его работы, определение энергетических затрат на образование озона в значительной степени определяются тепловыми и электрическими характеристиками разрядного узла [50]. В ряде работ пред-

лагается наклеивать термопары по длине озонатора на наружную поверхность внешнего электрода, либо использовать секционированные озонаторы.

Рассмотрим интегральные теплофизические характеристики барьерно-поверхностного разряда с коронирующим электродом (рисунок 1.42). Диэлектрический барьер разрядной ячейки выполнен из поливинилхлоридной трубки, внутри которой располагается коронирующий электрод в виде спирали из нихрома. Интерес к плазменным реакторам такого типа обусловлен возможностью их применения в качестве генераторов озона высоких и сверхвысоких концентраций.

1. Эксперимент. В теплоизолированном корпусе (1) располагается диэлектрический барьер толщиной 2,5 мм из поливинилхлоридной трубки (2) длиной 12 м. Внутри трубки с минимальным зазором размещен коронирующий электрод (3) в виде спирали, с шагом навивки $\delta = 10$ мм, из нихромового провода толщиной 0,8 мм. На электрод подается эффективное напряжение до 10 кВ с частотой 50 Гц. Охлаждение барьера производится проточной водой являющейся вторым электродом (4).

Для проведения калориметрических измерений установка снабжена входными и выходными датчиками температуры воды t_1, t_2 и кислорода t_3, t_4 . По известным температурам, расходам воды и кислорода, вложенной электрической мощности определяется распределение мощностей, выводимой из озонатора потоком озono-кислородной смеси и водой. Схемотехнические решения и методология измерения электрических характеристик поверхностного разряда в полной мере отражены в работах [33, 82].

2. Результаты. Для анализа экспериментальных данных рассмотрим температурное поле в системе газ – стенка – вода (рисунок 1.43). Тепловая энергия, выделяющаяся в зоне разряда 3, повышает температуру газа, и тепло через цилиндрическую стенку 2 передается охлаждающей воде 1. Перепады температур $\Delta t_{газа}$ и $\Delta t_{стенки}$ определяются из равенства тепловых потоков, которые передаются от газа к стенке за счет конвективного теплообмена и теплового потока, проходящего через цилиндрическую стенку за счет теплопроводности. Эффективность теплообмена определяется коэффициентом теплопроводности λ барьера и коэффициентом теплоотдачи α от газового потока к стенке.

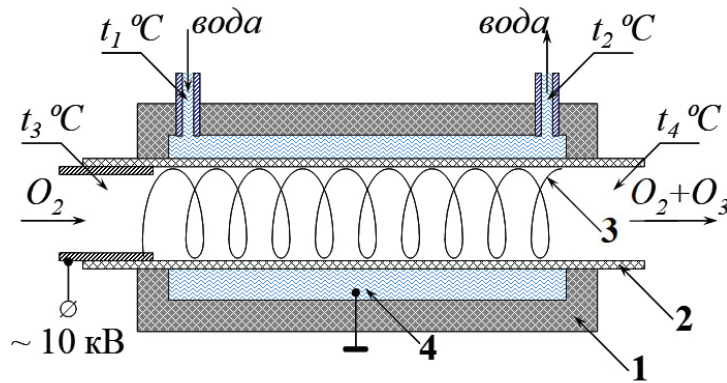


Рисунок 1.42 – Схема экспериментальной установки: 1 – теплоизолированный корпус; 2 – диэлектрическая трубка; 3 – коронирующий электрод; 4 – вода – заземленный электрод; t_1, t_2, t_3, t_4 – входные и выходные датчики температуры воды и кислорода

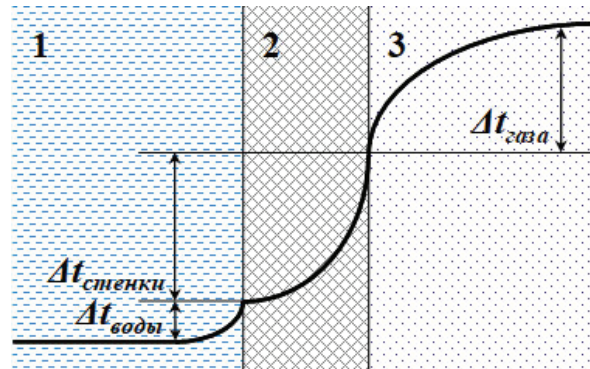


Рисунок 1.43 – Изменение температуры в системе газ – стенка – вода: 1 – вода; 2 – диэлектрический барьер; 3 – кислород

Экспериментально измеряется температура кислорода, проходящего через озонатор в зависимости от расхода при фиксированной мощности разряда 140 Вт (рисунок 1.44). Нелинейный характер зависимости определяется временем нахождения кислорода в разрядной зоне (рисунок 1.45). С увеличением времени нахождения газа в зоне разряда, возрастает его температура. Исходя из степени нагрева газа и расхода кислорода, определяется мощность, выносимая газовым потоком из озонатора:

$$Q_1 = V \rho \cdot c_p \Delta t_1 / \Delta \tau, \quad (1.1)$$

где Q_1 – тепловая мощность, выносимая из зоны разряда кислородом; V – объем газа, прокачанного через озонатор за единицу времени; ρ – плотность кислорода; Δt_1 – разность температур на входе t_3 и выходе t_4 из озонатора; c_p – удельная теплоемкость кислорода при постоянном давлении; $\Delta \tau$ – период времени проведения измерения.

Синтез озона сопровождается эндотермическими реакциями:

$$Q_2 = rGC, \quad (1.2)$$

где r – теплота образования озона, равная 3 МДж/кг; G – расход кислорода через озонатор; C – концентрация озона на выходе из озонатора. Вычисления показывают, что для

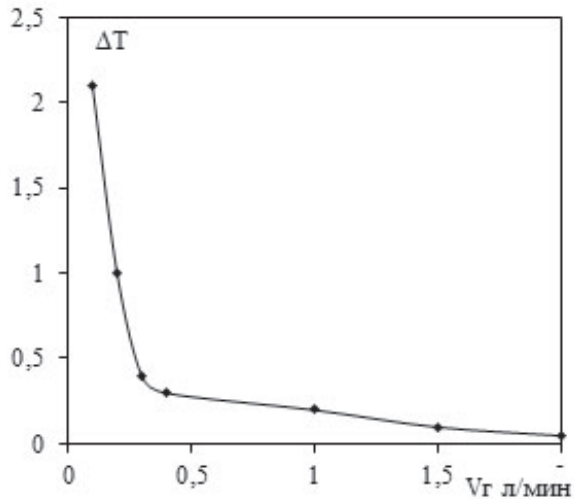


Рисунок 1.44 – Зависимость нагрева газа ΔT от расхода V_g

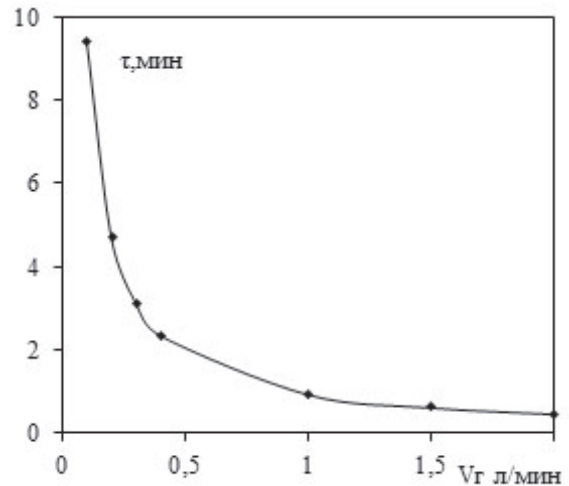


Рисунок 1.45 – Зависимость времени нахождения газа в зоне разряда τ от расхода V_g

всех расходов газа доля выносимой мощности Q_1 составляет $\sim 3\%$ от активной мощности в разряде $N_{акт}$. Мощность Q_2 , поглощаемая в эндотермических химических реакциях и идущая на синтез озона, составляет $\sim 3\%$ от активной мощности. Оставшаяся часть подводимой мощности

$$Q_3 = N_{акт} - Q_1 - Q_2 \quad (1.3)$$

передается тепловым потоком через стенку коаксиального цилиндра охлаждающей воде теплопроводностью:

$$Q_3 = 2\pi\lambda l \Delta t_{стенки} / \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right), \quad (1.4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; l – длина трубки; $\Delta t_{стенки}$ – перепад температур в стенке трубки; d_2 и d_1 – внешний и внутренний диаметры трубки. Перепад температуры в стенке трубки вычисляется из выражения:

$$\Delta t_{стенки} = Q_3 \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) / 2\pi\lambda l. \quad (1.5)$$

Учитывая, что коэффициент теплоотдачи от воды к стенке в 60–100 раз превосходит коэффициент теплоотдачи от газа, то температура наружной части стенки принимается за температуру охлаждающей воды:

$$t_{вн.ст.} = t_{воды} + \Delta t_{стенки}. \quad (1.6)$$

Коэффициент теплоотдачи α определяется из закона Ньютона–Рихмана с учетом температуры кислорода на выходе из озонатора t_4 :

$$\alpha = \frac{Q_3}{S(t_4 - t_{вн.ст.})}, \quad (1.7)$$

где S – площадь внутренней поверхности трубки. При постоянной подводимой мощности, сравнивая вычисленное значение коэффициента теплоотдачи 1 с аналогичным

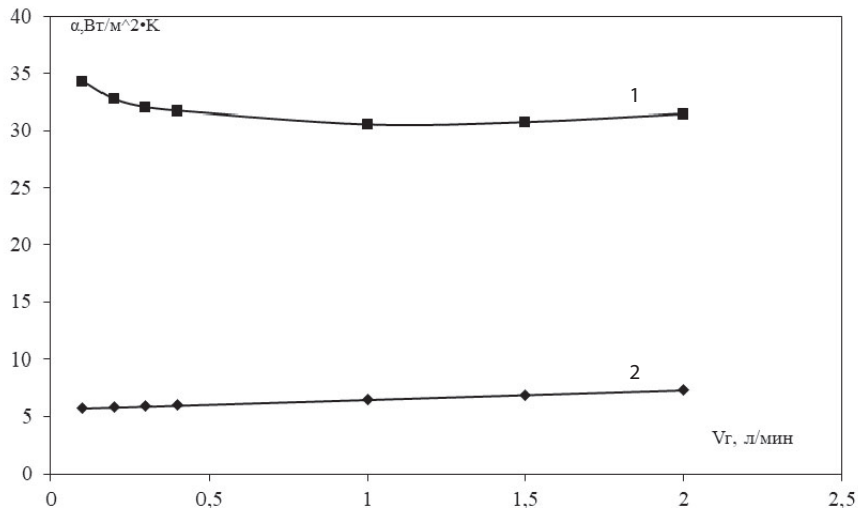


Рисунок 1.46 – Зависимость коэффициента теплоотдачи α от расхода газа: 1 – с разрядом; 2 – в отсутствие разряда

расчетом при отсутствии разряда 2, отметим (рисунок 1.46), что коэффициент теплоотдачи α при наличии разряда в 6–7 раз больше, чем в его отсутствии во всем диапазоне рассматриваемых расходов газа.

Из выражения для коэффициента теплоотдачи α между газом и гладкой поверхностью

$$\alpha = 5,6 + 4w \quad (1.8)$$

находится скорость электрического ветра w , которая составляет величину порядка 6–7 м/с. Продольная скорость движения газа, определяемая объемным расходом, протекающим через сечение трубки, изменяется в интервале 0,021–0,42 м/с. Поток газа и электрический ветер, сопровождающий разряд, оказывают заметное влияние на процесс теплоотдачи (рисунок 1.46). Наличие электрического ветра в диэлектрической трубке приводит к формированию системы тороидальных вихрей вблизи спиральных коронирующих электродов. Характерные размеры вихрей около $d_3 = 5$ мм определяются шагом коронирующего электрода и внутренним диаметром трубки. Частота вращения тороидальных вихрей ν оценивается по формуле:

$$\nu = \frac{w}{\pi \cdot d_3} \quad (1.9)$$

С увеличением расхода газа полученные значения изменяются в пределах 380–460 Гц. В отсутствие электрического ветра создание того же теплового потока через стенку к охлаждающей воде потребует в 4–6 раз больше перепадов температур между стенкой и газом. Расчет показывает, что при этом температура газа внутри трубки должна составлять величину 60–73 °С. При такой высокой температуре синтез озона в озонаторе практически прекращается.

Таким образом, в озонаторе 94 % подводимой мощности передается через диэлектрический барьер, 3 % выводится из системы газовым потоком, а остальное – составляют неучтенные потери энергии эндотермических реакций образования озона и окислов азота. Интенсивный теплообмен в озонаторе и образование озона происходит, в основном,

за счет электрического ветра, возникающего в зоне разряда [51]. Коэффициент теплопередачи α увеличивается по сравнению с ламинарным течением в 6–7 раз, за счет создания электрическим ветром турбулентных потоков газа. Поверхностный разряд в диэлектрическом теплообменнике способствует интенсификации теплообмена.

1.4. Генератор озона с подвижным барьером

1.4.1. Электростатический двигатель, как источник получения озона. Одним из путей решения проблемы ресурса и надежности работы озонаторных установок является переход к подвижным барьерам, реализация которых возможна при использовании жидких диэлектриков. В качестве вращающихся элементов применяются электроды озонаторной камеры. Однако широкого распространения такие устройства не получили. Большинство факторов, приводящих к выводу из строя диэлектрического барьера, связано со свойствами материала, состоянием его поверхности и поверхностного слоя.

Рассмотрим пластинчатый озонатор (рисунок 1.47), содержащий два металлических электрода 1 и 2. Электроды подключены к высоковольтному источнику переменного напряжения 6 и образуют газоразрядный промежуток 3, в котором расположен диэлектрический барьер, состоящий из твердого диэлектрика 4 и слоя жидкого диэлектрика, представляющего собой емкость с жидкостью. Емкость с жидким диэлектриком образована твердым диэлектрическим барьером и электродом 2, к которому прилежит жидкий слой 5. Емкость с жидким диэлектриком через замкнутую магистраль подсоединена к насосу 7 для обеспечения циркуляции и обновления жидкого слоя барьера 5. В магистраль 10 включены: фильтр 8 и теплообменник 9.

Озонатор работает следующим образом. С помощью насоса 7 через магистраль 10 осуществляется непрерывная прокачка диэлектрической жидкости. Переменное напряжение от высоковольтного источника 6 подается на электроды 1 и 2. В зазоре 3 возникает объемный барьерный электрический разряд. Если в зазор 3 поступает кислород газ, то осуществляется синтез озона. Жидкий диэлектрик, протекая через емкость 5, загрязняется и нагревается. Фильтр 8 и теплообменник 9, включенные в магистраль 10,

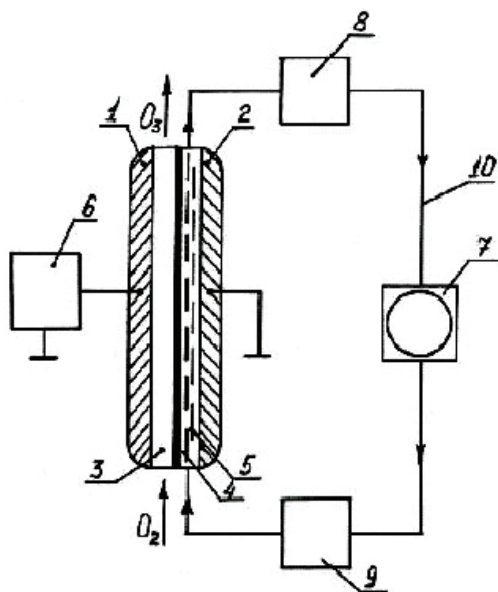


Рисунок 1.47 – Схема озонатора с двухслойным барьером: 1, 2 – металлические электроды; 3 – газоразрядный промежуток; 4,5 – твердый и жидкий слои барьера; 6 – источник питания озонатора; 7 – масляный насос; 8 – фильтр; 9 – теплообменник; 10 – магистраль

осуществляют очищение и охлаждение жидкого диэлектрика. Синтез озона осуществляется как в классическом озонаторе с твердым диэлектрическим барьером.

На рисунке 1.48 представлена принципиальная конструктивная схема озонатора с вращающимся барьером [52]. Установка озонирования содержит диэлектрический барьер 1 в форме диска, кольцевые электроды 2 и 3, расположенные по обеим сторонам барьера, и высоковольтный источник 4 переменного напряжения, к которому подключены электроды 2 и 3. Диэлектрический барьер 1 приводится во вращение с помощью электродвигателя 5. Переменное напряжение от высоковольтного источника подается на электроды 2, 3, в зазорах между диэлектрическим барьером и электродами возникает объемный барьерный электрический разряд, в котором осуществляется синтез озона. За счет принудительной подачи кислорода или воздуха обеспечивается поступление озона к обрабатываемому объекту. Вращение барьера частично, а в отдельных случаях полностью устраняет факторы, способствующие локализации разрядных процессов, которые в итоге приводят к разрушению барьера и выходу из строя озонаторных камер. Следовательно, вращение барьера приводит к увеличению ресурса озонаторов и повышению надежности их работы.

Уникальной особенностью озонаторов с вращающимся барьером является возможность использования в качестве источника питания высоковольтного генератора постоянного напряжения. С этой целью перестраивается система металлических электродов. Рассмотрим схему конструкции установки озонирования, питающейся от постоянного напряжения (рисунок 1.49). Установка содержит диэлектрический барьер 1 в форме диска, электроды 2 и 3, расположенные по обеим сторонам барьера 1 и образующие между собой четные пары противоположащих электродов (на рисунке 1.49 число пар равно четырем). К высоковольтному источнику постоянного напряжения 4 подключены пары электродов 2 и 3. Причем каждая последующая пара подключена к источнику с чередующей полярностью.

Постоянное напряжение от высоковольтного источника подается с чередующейся полярностью на каждую из пар частичных электродов 2 и 3. Возникает объемно-поверхностный барьерный разряд, в котором осуществляется синтез озона. Длительность

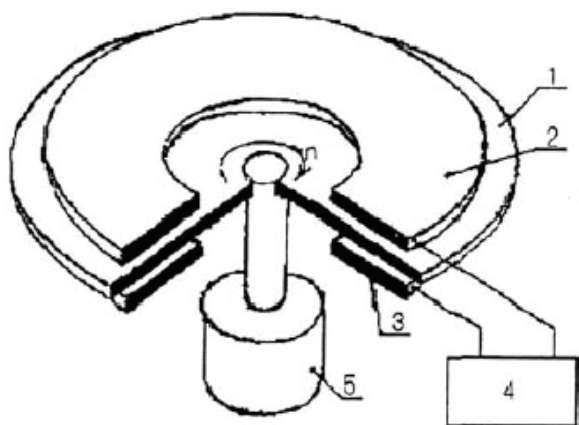


Рисунок 1.48 – Схема озонатора с вращающимся барьером: 1 – диэлектрический барьер, 2, 3 – кольцевые электроды, 4 – высоковольтный источник, 5 – электродвигатель

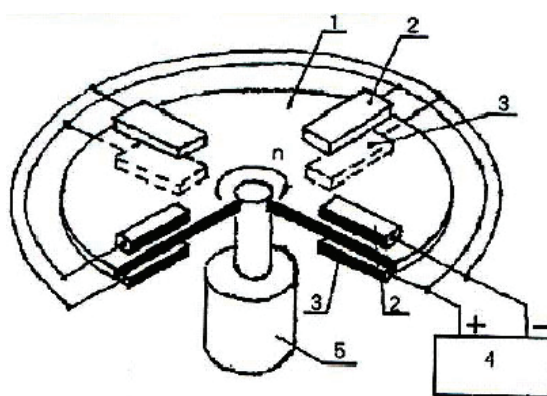


Рисунок 1.49 – Схема озонатора на постоянном токе: 1 – диэлектрический барьер, 2, 3 – электроды, 4 – высоковольтный источник постоянного напряжения, 5 – электродвигатель

разряда при неподвижном диске ограничена напряжением горения и процессом заряда емкости диэлектрического барьера, которая определяется толщиной барьера, его диэлектрической проницаемостью и площадью разряда. По мере зарядки емкости напряжение в области разряда падает, становится меньше напряжения горения и разряд прекращается.

В предлагаемом устройстве каждая пара электродов 2 и 3 выполняет двойную функцию: в первом случае – как объект синтеза озона, во втором – как перезарядное устройство. Выход озона пропорционален количеству разрядных областей, т. е. числу пар электродов 2 и 3. Увеличивая число пар электродов и скорость вращения, можно увеличить производительность выработки озона, соизмеримой с производительностью высокочастотных озонаторов. Число пар электродов лимитируется размерами диэлектрического барьера и электрической прочностью между соседними парами.

При соответствующем положении коронирующих электродов относительно диэлектрика возникает электрическая сила отталкивания между диэлектриком и электродами. С использованием данной конфигурации конструктивных частей разрядного блока создается вращение диэлектрика относительно коронирующих электродов. Реализуется электростатический двигатель (ЭД) [53], состоящий из ротора, покрытого тонкой диэлектрической пленкой, и установленных с внешней стороны двух или нескольких электродов (рисунок 1.50). Диэлектрическая плёнка, покрывающая один или оба электрода, стабилизирует электрический разряд [54].

Электростатический двигатель, в котором происходит синтез озона, работает на основе барьерного разряда. Для вращающегося диэлектрического барьера электрический разряд между коронирующими электродами становится непрерывным. Из-за чередующейся полярности для подключения высоковольтного источника к парам электродов, осуществляется непрерывная перезарядка емкостей. К очередной паре электродов подходит заряд на поверхности диэлектрического барьера, который остается от перезарядки емкостей предыдущей пары электродов. Полярность такого заряда определяется предыдущей парой электродов и противоположна полярности приложенного напряжения к последующей паре, что создает благоприятные условия для горения и поддержания барьерного разряда. Процесс повторяется от одной пары электродов к другой.

Устройство представляет собой простейший конденсатор, емкость которого тем больше, чем тоньше диэлектрическая пленка. Оно работает как на переменном, так и на постоянном токе. При подаче высокого напряжения разряд с электродов идет на поверхность, при этом на пленку оседают заряды. Заряды на поверхности пленки имеют тот же знак, что и данный электрод. Поэтому между электродами и зарядами на пленке возникают кулоновские силы отталкивания, которые приводят во вращение ротор. Чем больше напряжение питания, тем больше величина тока и тем больше скорость вращения ротора [55].

1.4.2. Характеристики электростатического двигателя. Исследования особенностей синтеза озона в электростатическом двигателе проводили на экспериментальной установке, содержащей регулируемый высоковольтный источник питания, электростатический двигатель и приборы для определения электрических характеристик. Определение концентрации озона, получаемого в электростатическом двигателе, производили оптическим озонометром «Медозон 235». По известным значениям концентраций озона, мощности двигателя и расходу кислорода (через двигатель) рассчитывались энергетические характеристики синтеза озона.

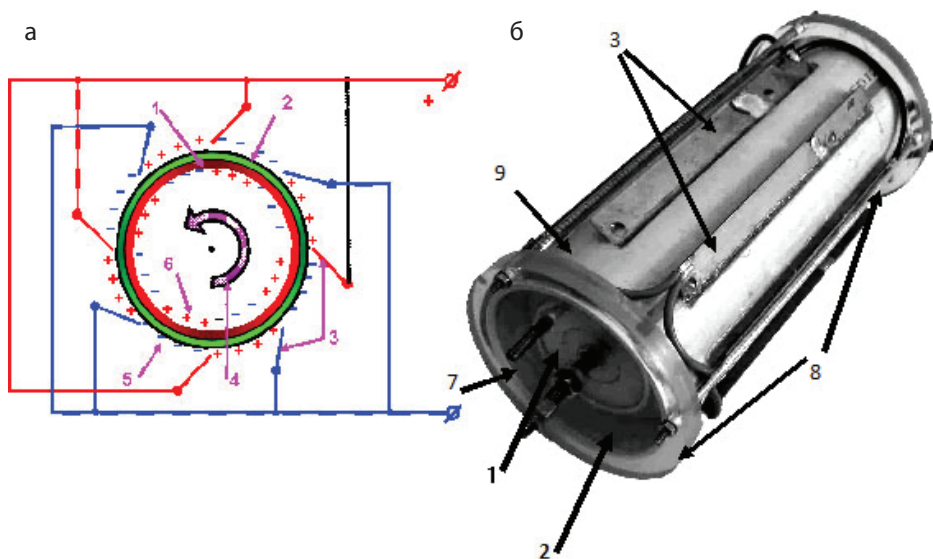


Рисунок 1.50 – Электростатический двигатель: а – принципиальная схема устройства, б – внешний вид экспериментальной модели: 1 – металлический ротор; 2 – диэлектрическое покрытие ротора; 3 – коронирующие электроды; 4 – направление вращения ротора; 5 – поверхностные заряды на диэлектрике; 6 – индуцированные заряды в металлическом роторе; 7 – патрубок входа кислорода; 8 – диэлектрические фланцы для герметизации и центровки ротора; 9 – статор

Электростатический двигатель (рисунок 1.50) состоит из металлического ротора 1, покрытого диэлектриком 2, вокруг которого расположены коронирующие электроды 3, закрепленные на статоре 9. На электроды в чередующемся порядке подается высокое напряжение. Диэлектрические фланцы 8 производят герметизацию устройства и центровку ротора относительно диэлектрического статора. Кислород с известным расходом подается в ЭД через патрубок 7. Озон-кислородная смесь выводится из ЭД через патрубок, расположенный на втором фланце. Коронирующие электроды (длина 140 мм) выполнены в виде ножей из нержавеющей стали, заточенная сторона которых обращена в сторону ротора. Конструкция позволяет изменять углы установки ножей и расстояние между острой кромкой и ротором. Частота вращения ротора ЭД определяется с помощью фотодатчика, подключенного к частотомеру. Мощность ЭД рассчитывается по измеренному току и напряжению.

Работает двигатель следующим образом. При подаче высокого напряжения (от 6 кВ и выше) с коронирующих электродов начинают стекать электрические заряды, которые оседают на диэлектрик. Они притягиваются к диэлектрику электрическими силами, т. к. с противоположной стороны от диэлектрика в металле собираются заряды противоположного знака. Заряды на диэлектрике своей полярности начинают отталкиваться от коронирующих электродов и притягиваться к коронирующим электродам противоположной полярности. При этом возникает вращающий момент, который сдвигает ротор на некоторый угол. У электродов противоположной полярности заряд с диэлектрика собирается в коронирующий электрод, и на его место осаждается заряд другого знака. Таким образом, ротор начинает разгоняться до тех пор, пока электростатические силы не уравниваются силами трения в подшипниках и сопротивления ротора о воздух.

Для упрощения сегмент ротора изображен на рисунке 1.51, а в виде пластины, и показаны два коронирующих электрода электростатического двигателя противоположной полярности. Направление вращения ротора указано стрелкой.

Рассмотрим действие электрических сил в электростатическом двигателе:

F_1 – это сила притяжения зарядов, осевших на диэлектрик к индуцированному в металле заряду с противоположной стороны диэлектрика;

F_2 – сила притяжения отрицательных зарядов к положительному электроду;

F_3 – сила отталкивания положительных зарядов от положительного электрода;

F_4 – сила притяжения положительных зарядов к отрицательному электроду;

F_5 – сила отталкивания отрицательных зарядов от отрицательного электрода.

Индукцированный заряд для наглядности показан с нижней части металлической пластины (рисунок 1.51), а в действительности он находится в промежутке между металлом и диэлектриком. Если сила $F_1 = const$, то F_2, F_3, F_4, F_5 зависят от расстояния до коронирующих электродов.

На частоту вращения ротора оказывают влияние следующие параметры: толщина диэлектрика d , диэлектрическая проницаемость ϵ , расстояние от коронирующей кромки до движущегося диэлектрика h , радиус кривизны коронирующей кромки r , расстояние между коронирующими электродами противоположной полярности L , поверхностная проводимость диэлектрика $R_{нов}$, угол наклона коронирующих проводников β относительно нормали к поверхности ротора, напряжение, прикладываемое к электродам ΔU , химический состав и влажность газа, в котором работает двигатель, направления вращения ротора, трение в подшипниках $\eta_{подш}$ и коэффициент сопротивления при вращении ротора о газ $\eta_{газ}$.

К электростатическому двигателю, с точки зрения внешнего наблюдателя, подводится постоянное напряжение, а с точки зрения наблюдателя, находящегося на поверхности диэлектрика ротора, к этой поверхности двигателя подводится переменное напряжение с частотой

$$v_n = v_p \cdot n,$$

где v_p – частота вращения ротора; n – число электродов одинаковой полярности.

Рассмотрим в динамике, как изменяется знак заряда и его величина в зависимости от движения ротора вблизи коронирующих электродов слева направо (рисунок 1.51, б). Если участок диэлектрика, несущий отрицательный заряд, находится далеко от коронирующего электрода положительной полярности, то его заряд остается неизменным. В этом случае сила притяжения со стороны индуцированных зарядов F_1 превосходит силу притяжения со стороны электрода положительной полярности F_2 . На некотором расстоянии от положительного электрода эти силы уравниваются: $F_1 = F_2$ и далее, по мере движения диэлектрика, складываются условия $F_1 < F_2$. При этом электроны перемещаются к коронирующему электроду положительной полярности и на некотором расстоянии X_1 отрицательный заряд полностью исчезает. Затем, из-за действия электрических сил, электроны срываются с молекул диэлектрика и на расстоянии X_2 от точки равновесия сил $F_1 = F_2$, положительный заряд на поверхности диэлектрика достигает максимального значения и остается неизменным до тех пор, пока соблюдается условие $F_1 > F_4$. По мере приближения к электроду отрицательной полярности вначале силы уравниваются $F_1 = F_4$, а затем в области, где $F_1 < F_4$ электроны, стекающие с коронирующего

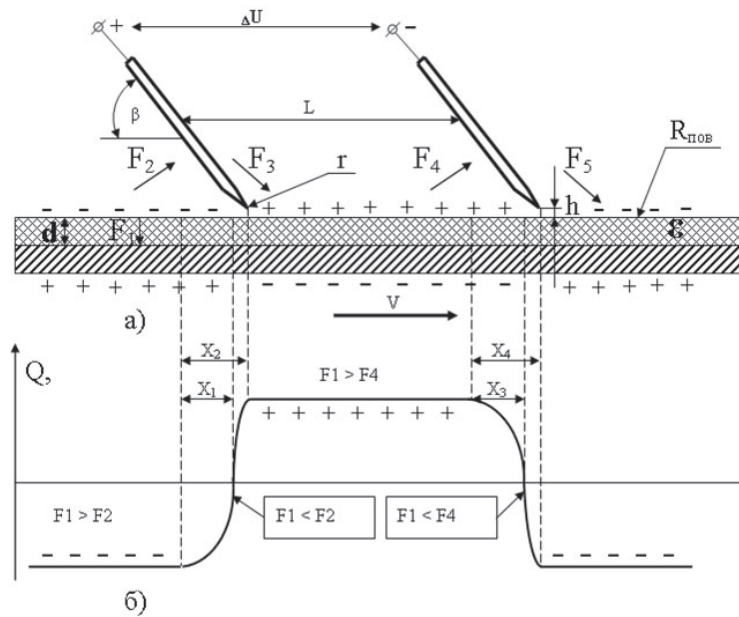


Рисунок 1.51 – Поверхность электростатического двигателя: а – переменные величины, влияющие на частоту вращения электростатического двигателя; б – распределение электрического заряда по поверхности диэлектрика в промежутке между двумя электродами противоположной полярности

электрода, нейтрализуют положительный заряд на расстоянии X_3 от точки равновесия сил, а далее на расстоянии X_4 поверхность диэлектрика заряжается до максимального потенциала. В промежутке между электродами ситуация повторяется.

Установлено, что с коронирующих электродов дует «электрический ветер». Его влияние на частоту вращения ротора неоднозначно. Визуальные наблюдения показали, что свечение разряда с коронирующей кромки «заползает» на диэлектрик навстречу вращения ротора. Это объясняется тем, что «электрический ветер» дует навстречу вращения ротора и замедляет частоту его вращения. Когда коронирующие электроды расположены радиально, то частота вращения ротора оказывается заметно ниже, чем в случае, если они расположены под углом. Наиболее вероятным направлением увеличения частоты вращения ротора ЭД является увеличение числа коронирующих электродов. Однако при расстояниях меньше пробойного, между коронирующими электродами происходит искровой пробой. Для устранения этого эффекта необходимо между коронирующими электродами устанавливать диэлектрические вставки.

Внешние характеристики электростатического двигателя для различных расстояний между коронирующим электродом и ротором показаны на рисунке 1.52. Зависимости тока от напряжения (рисунок 1.52, а) носят линейный характер. Минимальные значения электрического тока соответствуют самопроизвольному началу вращения ротора, а максимальные токи лимитируются пробоем между коронирующими электродами. Причём с увеличением d возрастает напряжение, при котором электрический ток, потребляемый электростатическим двигателем, принимает одинаковые значения. Увеличение d в общем случае уменьшает работу электрической машины, так как для поддержания прежней мощности необходимы большие напряжения. Поэтому для реализации максимальной

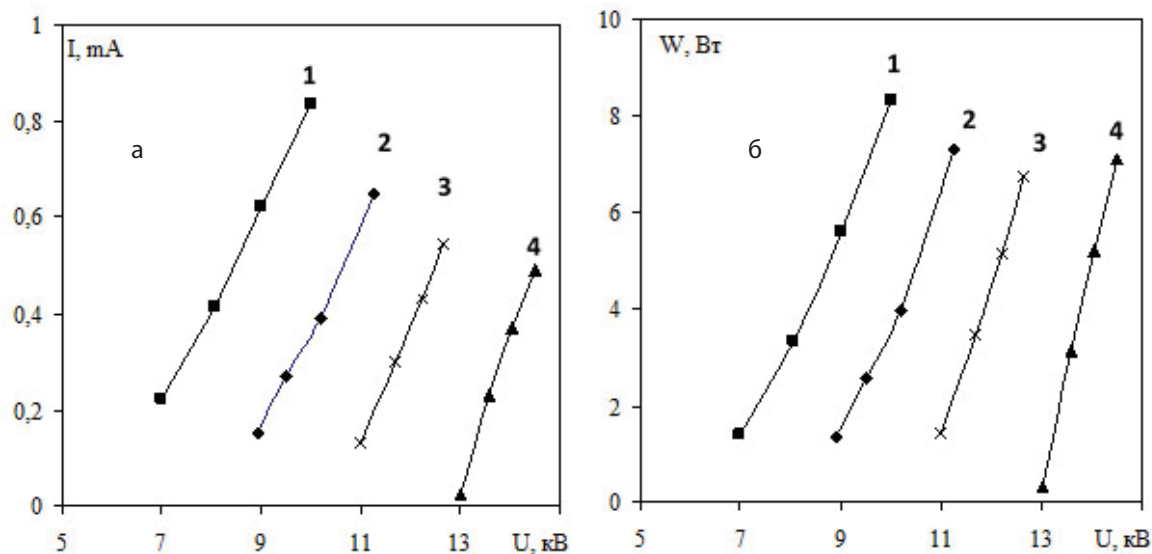


Рисунок 1.52 – Характеристики электростатического двигателя: а – вольт-амперная характеристика, б – зависимость мощности от напряжения для расстояний между коронирующим электродом и ротором: 1 – 1, 2 – 2, 3 – 3, 4 – 4 мм

мощности двигателя требуется установка минимальных расстояний между коронирующим и подвижным электродом.

Зависимости мощности от напряжения для различных размеров разрядного промежутка (рисунок 1.52, б) аналогичны зависимостям тока от напряжения. Максимальная мощность, реализуемая двигателем данной конструкции, составляет 9 Вт при напряжении на разрядном контуре 10 кВ и межэлектродном расстоянии $d = 1$ мм.

Частота вращения ротора линейно возрастает с увеличением напряжения для различных расстояний d (рисунок 1.53, а). Скорость вращения ротора ЭД полностью определяется током разряда (рисунок 1.53, б). Для всех d наблюдается уменьшение скорости роста частоты вращения от приложенного напряжения, несмотря на увеличение вкладываемой мощности. Постепенное стремление зависимостей к предельной величине (порядка 30 Гц) связано с увеличением силы трения ротора в опорных подшипниках и газодинамическим сопротивлением вращения ротора относительно окружающего воздуха.

Максимальная скорость вращения ротора реализуются при размерах разрядного промежутка $d = 1$ мм и напряжении 10 кВ.

1.4.3. Синтез озона в электростатическом двигателе. Основными показателем синтеза озона в любом озонаторе являются: концентрация озона, производительность по озону и удельные энергетические затраты, идущие на синтез единицы массы озона. Скорость роста концентрации озона сильно изменяется от приложенного напряжения для различных расстояний между коронирующим электродом и ротором (рисунок 1.54, а). На начальном участке изменение напряжения на 10 % приводит к увеличению концентрации нарабатываемого озона на 250 %. Это объясняется быстрым увеличением площади поверхностного разряда за счёт увеличения скорости вращения ротора, что равносильно увеличению объема плазмы, где протекают плазмохимические реакции образования озона.

Энергетические затраты, идущие на синтез озона (рисунок 1.54, б) во всем диапазоне напряжений, остаются на достаточно низком уровне (максимум 13 кВт*ч/кг)

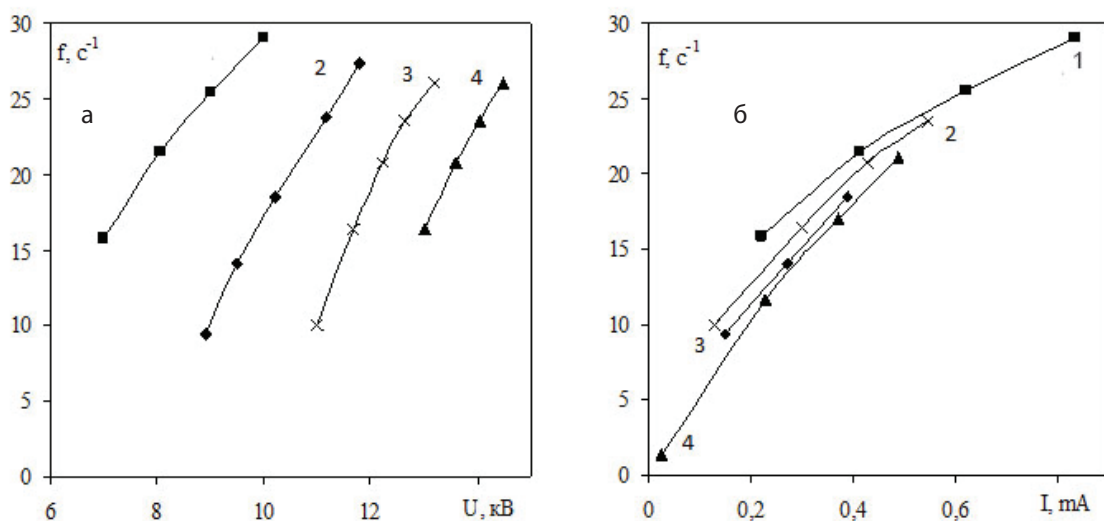


Рисунок 1.53 – Зависимости частоты вращения ротора ЭД: а – от напряжения, б – от тока. Расстояние между коронирующим электродом и ротором: 1 – 1, 2 – 2, 3 – 3, 4 – 4 мм

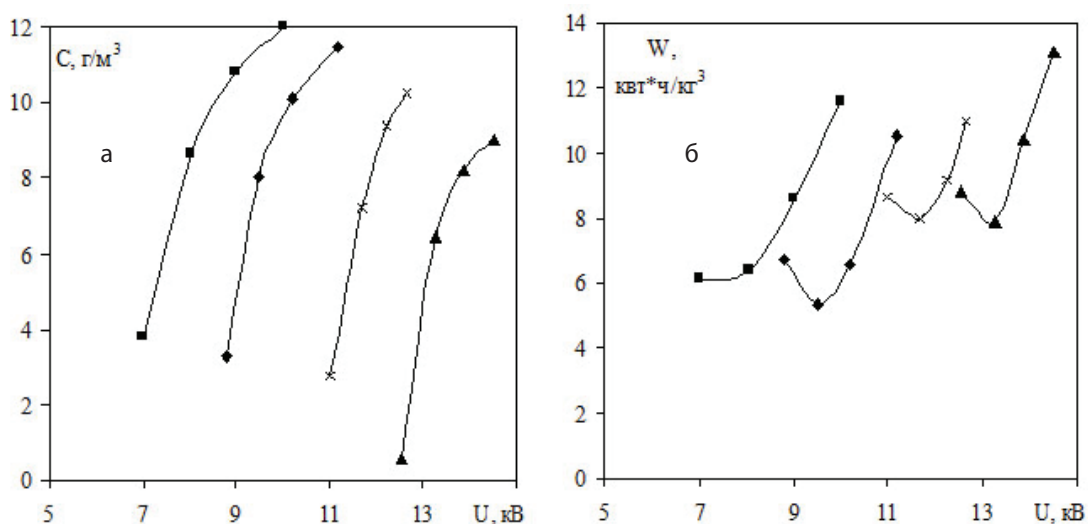


Рисунок 1.54 – Зависимость концентрации озона (а) и производительности ЭД по озону от напряжения (б). Расстояния между коронирующим электродом и ротором: 1 – 1, 2 – 2, 3 – 3, 4 – 4 мм

и приемлемы для промышленного синтеза. В момент разгона ЭД наблюдается некоторое уменьшение энергетических затрат за счет стабилизации характеристик разряда и увеличения площади плазменных пятен. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к росту удельных энергетических затрат, идущих на синтез озона для всех межэлектродных расстояний. Это связано с увеличением скорости разрушения озона при возрастании выделяемой мощности в разрядном промежутке. Наиболее оптимальные характеристики синтеза озона соответствуют минимальным разрядным промежуткам.

Характер синтеза озона показывает, что высокие концентрации озона (~ 100 г/м³ и более) в электростатических машинах получить практически невозможно. Так как по

характеру протекания электрического тока сам разряд подобен коронному разряду, в котором высокие концентрации озона не реализуются. Для достижения максимальной мощности электростатического двигателя необходимо определить минимальные расстояния между коронирующим и подвижным электродом. В этом случае скорость вращения ротора составляет ~30 об/сек, при размере разрядного промежутка 1 мм и напряжении 10 кВ.

На основе электростатического двигателя можно проектировать озонаторные установки с выходной концентрацией озона до 15 г/м³. Данные устройства могут быть использованы для таких приложений, как дезодорация помещений, обработка овощей и фруктов, очистка воздуха в медицинских учреждениях и местах большого скопления людей.

1.5. Гибридные озонаторы на основе барьерного разряда в трансформаторе

1.5.1. Конструкция разрядной ячейки гибридного озонатора. Гибридные озонаторы (ГО) сочетают в одном устройстве несколько блоков: высокочастотный преобразователь, повышающий трансформатор и разрядную ячейку. Работоспособность подобных схем озонаторов показана в работах [22, 26, 56] на примере гибридного озонатора с частотой питания до 500 Гц. Повышенные частоты питания озонатора позволяют увеличить его мощность, не изменяя геометрических размеров, а также уменьшить габаритные и точные параметры повышающего трансформатора. Отличительной особенностью гибридных озонаторов является объединение разрядной ячейки и высоковольтного трансформатора в единое целое. Такое модифицирование конструкции плазмохимического реактора озонатора позволяет расширить возможности регулировки характеристик разряда, повысить производительность и концентрацию озона при сохранении энергетических затрат, идущих на синтез озона. Тем более, что современная полупроводниковая преобразовательная техника создает источники питания для озонаторов, отличающиеся высокими энергетическими показателями.

В гибридном озонаторе (рисунок 1.55) разрядный узел базируется на прямоугольном магнитопроводе 1 (размер по периметру 210×75 мм) собранного из ферритовых стержней ($\mu = 5000$) диаметром 20 мм, на поверхности которого размещены первичная 2 и вторичная 7,8 обмотки трансформатора. Первичная обмотка 2 содержит 50 витков провода ПЭВ диаметром 1 мм, намотанного на диэлектрическую подложку цилиндрической формы. Вторичная обмотка состоит из трех коаксиально расположенных стеклянных цилиндров (4–6). На цилиндре 4 (диаметр: внешний 32 мм, внутренний 28 мм) размещен первый слой вторичной обмотки 7, выполненный проводом ПЭЛШО диаметром 0,1 мм, изолированный стеклянным цилиндром (диаметр: внешний 26 мм, внутренний 24 мм) 5. Второй слой вторичной обмотки 8 выполнен аналогично первому и размещен на цилиндре (диаметр: внешний 23,5 мм, внутренний 21,5 мм) 6. Конец первого слоя вторичной обмотки соединен с началом второго, направление намотки провода в обоих слоях эквивалентно.

Технология электросинтеза основана на взаимодействии двух элементов: высоковольтного трансформатора и разрядной ячейки. Стандартный высоковольтный трансформатор представляет собой конструкцию, состоящую из ферромагнитного сердечника, на который намотаны слои первичной и вторичной обмоток. Слои разделены изоляцией для предотвращения электрического пробоя между обмотками. Вторичная обмотка

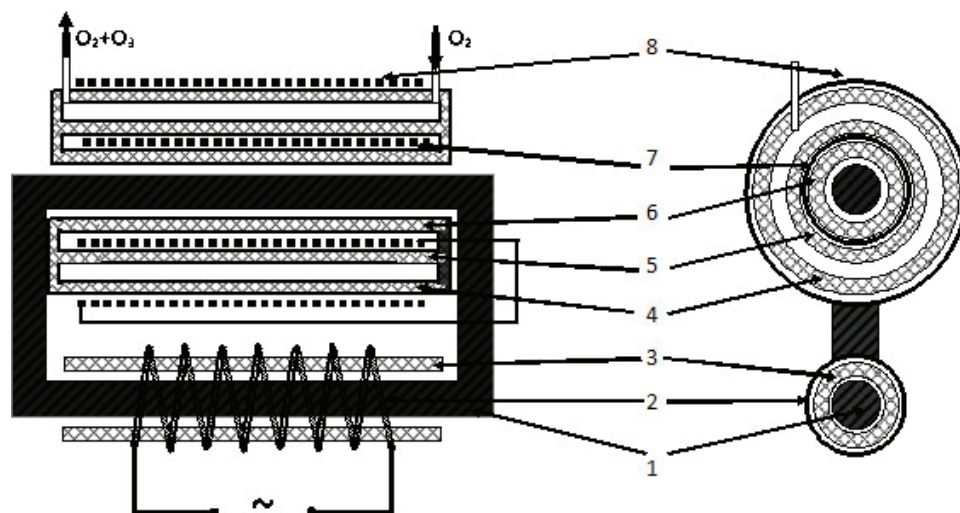


Рисунок 1.55 – Схема разрядной ячейки гибридного озонатора: 1 – ферритовый магнитопровод; 2 – первичная обмотка трансформатора; 3 – диэлектрическая подложка; 4, 5, 6 – стеклянные барьеры коаксиальной геометрии; 7 – первый слой вторичной обмотки; 8 – второй слой вторичной обмотки

трансформатора подсоединяется к разрядной ячейке. При протекании переменного тока в первичной обмотке во вторичной индуцируется ток и напряжение, величина которых определяется коэффициентом трансформации. Высокое напряжение с вторичной обмотки подается на разрядную ячейку. Между диэлектрическими барьерами в ячейке загорается разряд. Подобная конструкция позволяет равномерно приложить к зазору напряжение, равное половине напряжения всей вторичной обмотки. Между диэлектрическими цилиндрами 5 и 6 путем центровки организован зазор размером 0,5 мм, в котором реализуется барьерный разряд. Торцы вторичной обмотки герметично закрыты, что позволяет тангенциально подавать рабочий газ с заданным расходом в организованный зазор через патрубок.

1.5.2. Определение характеристик гибридного озонатора. Гибридный озонатор нагружен на обратноходовой источник питания (рисунок 1.56), состоящий из задающего генератора $3Г$ и ключевого транзистора $У1$. В качестве задающего генератора используется микросхема $UC3843B$, формирующая импульсы управления транзистором $У1$ [56]. Частота и коэффициент заполнения импульсов регулируется в диапазоне $15 \div 30$ кГц и $0 \div 50$ %.

При закрывании транзистора $У1$, накопленная энергия в индуктивности первичной обмотки трансформатора $Т1$ за время его открытого состояния, формирует в контуре резонансный переходный процесс, образованный индуктивностью первичной обмотки, ёмкостью трансформатора и выходной ёмкостью транзистора. Этот резонансный процесс приводит на стоке транзистора выброс напряжения в форме половины синусоиды величиной 800 В. Такой же по форме, но больший коэффициент трансформации импульс напряжения существует в это время на вторичных обмотках трансформатора. Под действием этого импульса в разрядной ячейке ГО возникает барьерный разряд. Когда половинка синусоиды на стоке транзистора проходит через ноль, то открывается внутренний паразитный диод и фиксируется напряжение на стоке. В этот момент на транзистор с задающего генератора приходит следующий импульс открывания, и тем самым обеспечивается

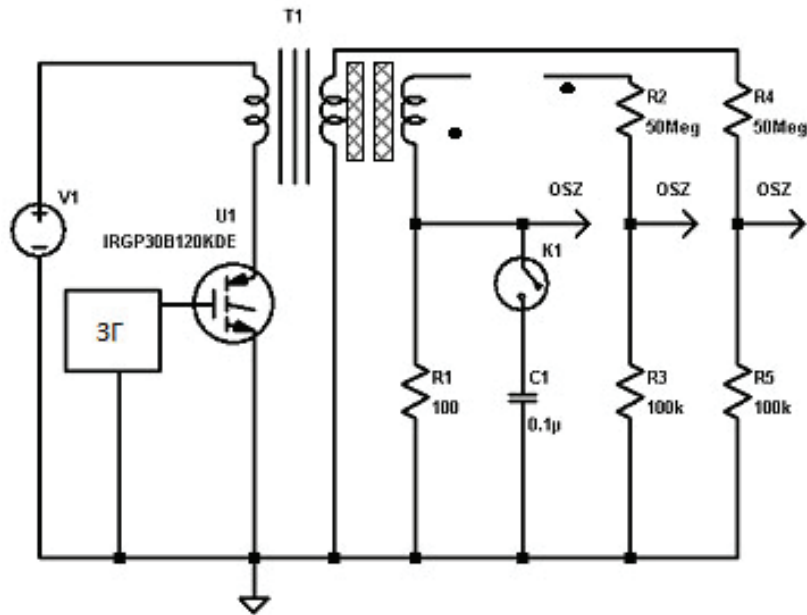


Рисунок 1.56 – Схема экспериментальной установки: V1 – блок питания, 3Г – задающий генератор, U1 – ключевой транзистор, T1 – трансформатор-озонатор, R1 – шунт для измерения тока, R2, R3, R4, R5 – делители напряжения, C1 – измерительный конденсатор

квазирезонансный режим работы преобразователя с переключением транзистора при нуле напряжения. Далее описанный выше цикл повторяется.

При проведении экспериментов рабочая частота источника питания составляла 29,4 кГц, а максимальная выходная мощность 60 Вт. Регулировка мощности осуществлялась путём изменения входного напряжения. Динамические и статические характеристики разряда определяются путем регистрации тока и напряжения разряда двулучевым осциллографом С1-96. Полученные осциллограммы фотографировались и оцифровывались с помощью программных средств для последующей обработки результатов.

Для регистрации импульсов тока $I(t)$ в схеме использовали токовый шунт R1 сопротивлением 100 Ом, изготовленный из константановой проволоки бифилярно намотанной на цилиндрический каркас. Регистрация импульсов напряжения $U(t)$ производилась с помощью омических делителей R2-R3, R4-R5. Высоковольтными плечами делителей R2-R3 и R4-R5 служили резисторы марки КЭВ-10 сопротивлением 50 мОм. При калибровке делителей сопротивление низковольтных плеч R3 и R5 подбирались персонально для каждого. Доводка коэффициента делителей до величины $k = 500$ производилась при подключенных их к осциллографу и подачи на них прямоугольных импульсов с амплитудой до 60 В и длительностью 5 мкс. Нелинейные искажения фронта и спада сигнала, возникающие за счет паразитной емкости и индуктивности резисторов, устранялись с помощью медных цилиндров диаметром 20 мм, одеваемых на высоковольтные резисторы. Длина цилиндров и их местоположение относительно оси резисторов, подбирались экспериментально в процессе калибровки делителей.

Регистрация вольт-кулоновских характеристик $q(U)$ осуществлялась двухканальным осциллографом С1-83, с помощью делителя напряжения R2-R3 и измерительного конденсатора C1 емкостью 0,1 мкФ. Напряжение, пропорциональное величине заряда

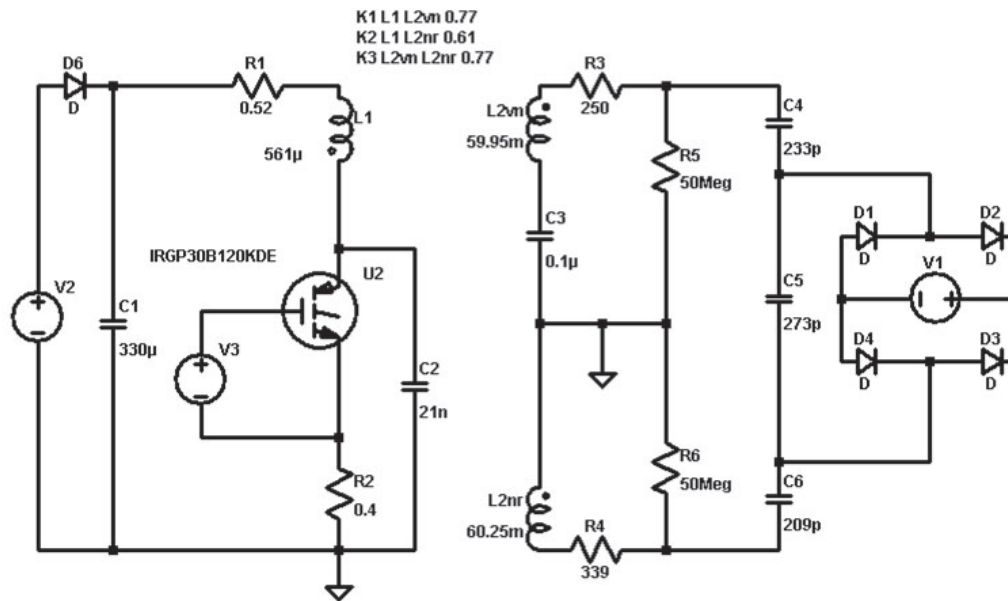


Рисунок 1.57 – Схема модели озонатора: V2, D6, C2 – эквивалент входного источника постоянного тока; V3 – задающий генератор, U2 – IGBT-транзистор; R1 – сопротивление первичной обмотки L1 трансформатора; C2 – формирующий конденсатор; L2vn и L2nr – вторичные обмотки трансформатора с сопротивлениями R3 и R4; C3 – измерительный конденсатор; R5, R6 – эквиваленты делителей напряжения; C4, C6 – емкости диэлектрических барьеров; C5 – емкость разрядного промежутка; D1-D4, V1 – источник ЭДС заменяющий сопротивление разрядного промежутка

$q(t)$, с измерительного конденсатора подавалось на вертикально-отклоняющие пластины осциллографа, а горизонтально-отклоняющие пластины фиксировали изменение напряжения $U(t)$. В результате сложения колебаний на экране осциллографа формировались фигуры Лиссажу.

Для снятия вольт-кулоновских характеристик измерительный конденсатор подбирался с минимальной собственной индуктивностью и максимальной емкостью. Иначе наблюдаются сильные искажения вольт-кулоновских характеристик при измерении на частотах выше 10 кГц. Наилучшие результаты были получены при использовании конденсатора типа К73-9 с емкостью 101 нФ.

При регистрации динамических характеристик барьерного разряда наблюдалось размытие сигналов тока с шунта и напряжения измерительного конденсатора. Это обусловлено высокочастотным характером протекания тока барьерного разряда. Величина искажения достигала ~80 % от амплитуды невозмущенного сигнала. С целью ликвидации высокочастотной составляющей сигнала в измерительные линии устанавливались RC фильтры с полосой среза порядка 200 кГц. Точная настройка фильтра позволяет практически ликвидировать ВЧ составляющую и не исказить низкочастотную часть сигнала. Входные электрические характеристики экспериментальной установки (ток, напряжение, активная и полная мощность, коэффициент мощности) измерялись с помощью измерительного комплекта К509.

1.5.3. Электротехническая модель гибридного озонатора. Барьерный разряд в гибридном озонаторе представляется эквивалентной электрической схемой (рисунок 1.57), состоящей из конденсаторов C4 - C6, диодов D1-D4 и источника ЭДС V1. Данная схема

является наиболее приемлемой в практических приложениях [1, 2, 57]. При отсутствии разряда ГО представляется в виде трех последовательно включенных конденсаторов, соответствующих электрическим емкостям барьеров $C4$, $C6$ и разрядного промежутка $C5$. При существовании разряда эквивалентная схема представляет собой последовательно соединенные конденсаторы $C4$, $C6$ (диэлектрические барьеры) и источник ЭДС $V1$ с внутренним сопротивлением, равным нулю (разрядный промежуток). Величина напряжения источника ЭДС определяет напряжение горения разряда.

Расчет работы гибридного озонатора производили с помощью электротехнической модели, основанной на феноменологическом описании барьерного разряда, как нелинейного объекта электрической цепи, по программе моделирования LT Spice, входящей в систему конструкторского проектирования электронных устройств Switcher CAD III. Использовались измеренные параметры ГО, изготовленного в соответствии со схемами (рисунки 1.56, 1.57): емкость барьера, образованного стеклянным цилиндром 4 ($C4 = 233$ пФ); емкость барьера, образованного стеклянным цилиндром 5 ($C6 = 209$ пФ); емкость разрядного промежутка между стеклянными цилиндрами 4 и 5 ($C5 = 273$ пФ); индуктивность и сопротивление первичной обмотки ($L1 = 561,2$ мкГн, $0,106$ Ом), количество витков 32; индуктивность и сопротивление внутренней вторичной обмотки ($L2vn = 239,8$ мГн, 250 Ом), число витков 1000; индуктивность и сопротивление внешней вторичной обмотки ($L2nr = 241$ мГн, 339 Ом), число витков 1000; индуктивности рассеяния вторичных обмоток, приведенные к первичной ($L2vn = 273,4$ мкГн, $L2nr = 275$ мкГн); емкость конденсатора в первичной цепи ($C2 = 20,85$ нФ); сопротивление шунта в первичной цепи $0,38$ Ом; частота задающего генератора $V3$ ($28,6$ кГц).

Работа ГО определяется режимами переключения ключевого транзистора со стороны первичной обмотки трансформатора, процессами, протекающими во вторичной обмотке и характером нагрузки трансформатора. На осциллограмме тока в первичной обмотке трансформатора 2 (рисунок 1.58, а) наблюдается сигнал, связанный с периодическим зажиганием барьерного разряда в зазоре между вторичными обмотками трансформатора. Ток разряда имеет высокочастотный импульсный характер, и его форма отражается через взаимную индукцию обмоток трансформатора. Осциллограммы напряжения показывают, что при максимальном напряжении источника питания (~ 308 В), большая часть (~ 60 %) периода работы преобразователя связана с передачей активной энергии в плазму барьерного разряда, что косвенно указывает на высокий коэффициент мощности ГО. Экспериментальные динамические характеристики первичной цепи качественно и количественно согласуются с рассчитанными осциллограммами напряжения на коллекторе ключевого транзистора и тока в первичной обмотке трансформатора (рисунок 1.58, б).

Динамические характеристики (осциллограммы напряжения и тока во вторичной цепи) ГО (рисунок 1.59) показывают, что форма напряжения близка к синусоидальной. Амплитудные значения напряжения в первом и втором полупериодах составляют 7 и $7,25$ кВ соответственно. Форма тока в первом полупериоде имеет синусоидальный характер с амплитудой $0,18$ А, а во втором полупериоде наблюдаются два максимума тока $0,09$ и $0,115$ А. Длительность первого и второго полупериода напряжения и тока не одинакова.

Данные различия, очевидно, определяются несимметричностью работы обратного ключевого преобразователя в первый и во второй полупериоды. Кроме этого, временные параметры протекания тока изменяются за счет зажигания барьерного разряда

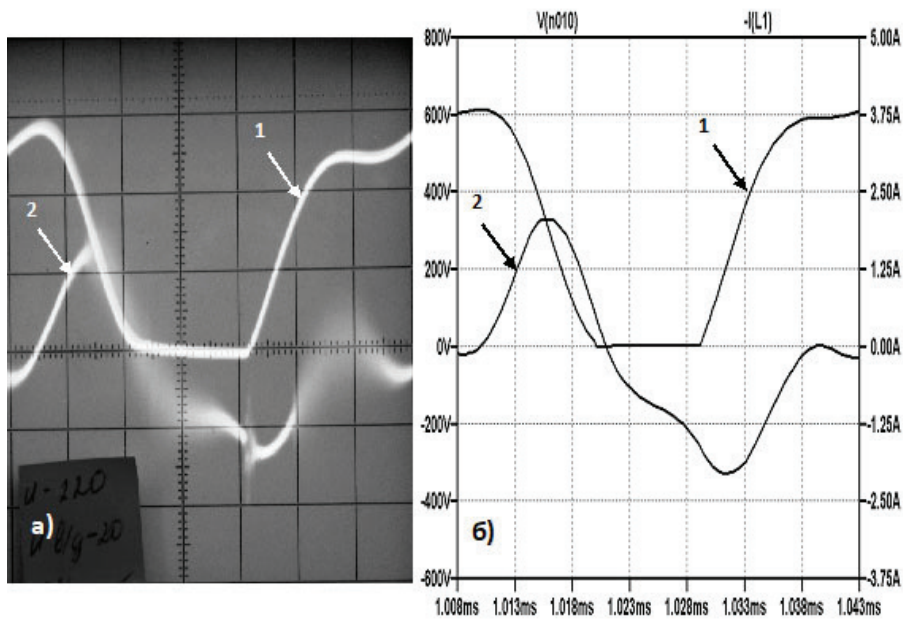


Рисунок 1.58 – Осциллограммы напряжения 1 на коллекторе ключевого транзистора и тока 2 в первичной обмотке трансформатора: а – эксперимент, б – расчет. Измерительная сетка модельной осциллограммы соответствует экспериментальной сетке

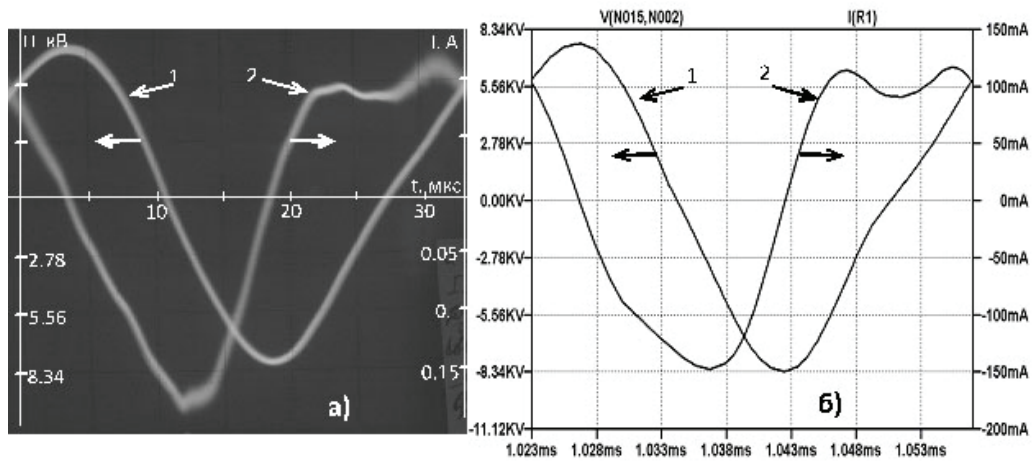


Рисунок 1.59 – Динамические характеристики барьерного разряда: а – эксперимент, б – расчет. 1 – ток через разряд, 2 – напряжение вторичной обмотки

во второй и четвертой четвертей периода за счет увеличения емкости озонатора. Наличие разряда подтверждается размытием сигнала тока вблизи максимумов. Осциллограмма тока не позволяет увидеть моменты зажигания и погасания разряда, которые наблюдались по резкому увеличению тока в цепи в работах [57, 58]. Это отмечается в теории барьерного разряда [1, 2]. Расчетные динамические характеристики качественно и количественно совпадают с экспериментом.

Вольт-кулоновская характеристика ГО (рисунок 1.60, а) имеет вид параллелограмма, как и для барьерного разряда. Это позволяет определить два важных параметра озонатора – активную мощность разряда и напряжение горения. Напряжение горения определяется как половина напряжения измеренного между сторонами параллелограмма по оси напряжений. Площадь параллелограмма адекватна активной мощности [1, 2]. Как следует из эксперимента, напряжение горения разряда равно 1,125 кВ. В монографии [1] приводятся экспериментальные данные для напряжения горения барьерного разряда в кислороде в диапазоне 2–3 кВ при разрядных промежутках 1–3 мм. Если напряжение горения разряда не зависит от частоты, то полученные результаты сильно занижены и вольт-кулоновские характеристики нельзя использовать для однозначного определения напряжения горения.

Расчетная вольт-кулоновская характеристика (рисунок 1.60, б) качественно и количественно согласуется с экспериментальными данными. Незначительные количественные отличия, вероятно, обусловлены использованием для расчетов величины напряжения горения разряда, определенной из вольт-кулоновских или статических характеристик.

1.5.4. Статические и динамические характеристики гибридного озонатора.

Измерение статических характеристик ГО обычными экспериментальными методами (киловольтметром и амперметром) из-за искажения кривых тока и напряжения недостаточно точны. Поэтому средний ток (I_{cp}), эффективное напряжение ($U_{эфф}$), полная (P) и активная (P_a) мощности ГО определяются путем интегрирования за период мгновенных значений тока и напряжения:

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T |I(t)| \cdot dt ; U_{эфф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) \cdot dt} ;$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T |I(t) \cdot U(t)| \cdot dt ; P_a = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) \cdot U(t) \cdot dt .$$

До зажигания разряда вольт-амперная характеристика ГО представляет собой прямую линию 1 (рисунок 1.61), совпадающую с зависимостью тока 4 через общую емкость озонатора ($C_{об}$). При зажигании разряда ($U_{эфф} \sim 4.2$ кВ) наблюдается излом характеристики и ток разряда, с увеличением $U_{эфф}$, быстро приближается к расчетной зависимости тока 5 через емкость барьеров ($C_{б}$) разрядного промежутка.

Напряжение горения разряда ($U_z = 1,75$ кВ) приближенно находится путем продолжения второго участка характеристики до пересечения с осью $U_{эфф}$ [1]. Из эксперимента следует второе значение ($U_z = 1,125$ кВ), полученное из статических и вольт-кулоновских характеристик. Возникает неопределенность для последующих расчетов в выборе метода определения напряжения горения барьерного разряда. Расчет статической характеристики ГО в программе моделирования LTSpice при $U_z = 1,75$ кВ полностью совпадает с экспериментом (линия 3) только до напряжения зажигания, и практически не согласуется

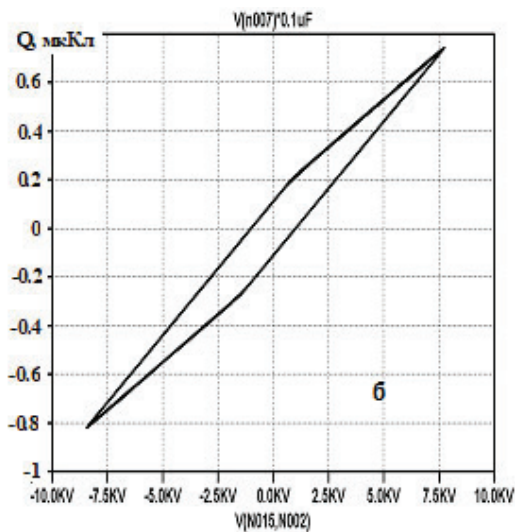
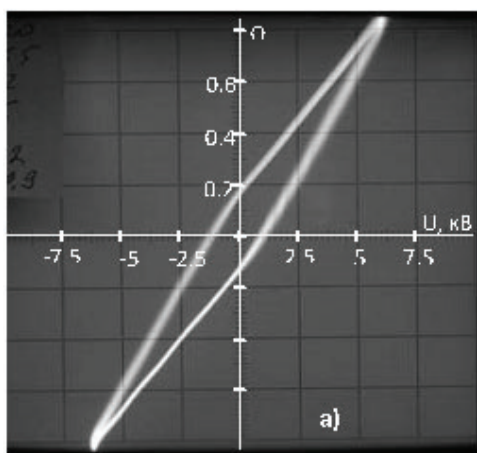


Рисунок 1.60 – Вольт-кулоновские характеристики разряда: 1 – эксперимент, 2 – расчет

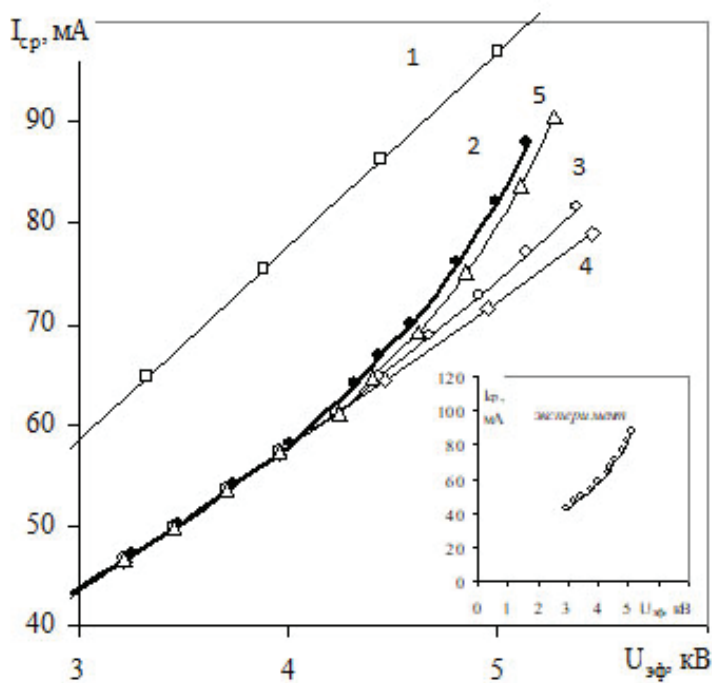


Рисунок 1.61 – Вольт-амперные характеристики: 1 – эксперимент, 2 – расчет с учетом изменения U_z , 3 – расчет при постоянном U_z , 4 – ток через общую емкость $C_{ог}$, 5 – ток через емкость барьеров C_b

с экспериментом во всем диапазоне существования разряда. В случае использования при расчетах $U_2 = 1,125$ кВ, эксперимент не согласуется с расчетами. Устранить данное расхождение позволяет предположение, что напряжение горения барьерного разряда зависит от эффективного напряжения, приложенного к ГО. Причем $U_2 = 1,75$ кВ соответствует напряжению зажигания разряда $U_{эфф} = 4$ кВ, а $U_2 = 1,125$ кВ – максимальному напряжению на ГО $U_{эфф} = 5,2$ кВ. Правомерность такого подхода обосновывается следующими причинами:

1. Прямая 5 при любом токе соответствует падению напряжения на диэлектрических барьерах (рисунок 1.61). Экспериментальная характеристика 1 после зажигания разряда при одинаковых значениях тока, дает общее падение напряжения на озонаторе. Разность данных напряжений представляет собой падение напряжения на разрядном промежутке U_2 , которое уменьшается с ростом $U_{эфф}$;

2. Активная мощность ГО (рисунок 1.61, линии 1, 2) изменяется с 5 до 65 Вт при увеличении $U_{эфф}$ с 4 до 5,2 кВ, что приводит, в отсутствие эффективного охлаждения ГО, к значительному нагреву газа в разрядном промежутке и к уменьшению пробивного напряжения и U_2 .

Расчеты статических характеристик ГО, проведенные с учетом изменения U_2 в диапазоне $1 \div 1,75$ кВ при изменении $U_{эфф}$ с 4 до 5,2 кВ, качественно и количественно согласуются с экспериментом.

Активная мощность ГО играет решающую роль в определении химических реакций, протекающих в разряде. Поэтому при изучении кинетики химических реакций в разряде и проектировании озонаторных установок необходимо определять активную мощность из эксперимента и прогнозировать ее поведение от различных параметров на основе модельных представлений. Зависимости P_a (рисунок 1.62), определенные методом интегрирования мгновенных значений напряжения и тока за период (линия 1), и путем измерения площади соответствующих осциллограмм заряд-напряжение (линия 2) количественно практически совпадают. До возникновения разряда, $P_a \sim 3$ Вт выделяется во вторичных обмотках трансформатора и делителях напряжения. После зажигания разряда P_a практически линейно возрастает до $P_a \sim 60$ Вт при максимальном напряжении $U_{эфф} = 5,2$ кВ. Расчеты P_a , проведенные с учетом зависимости U_2 от эффективного напряжения, качественно и количественно согласуются с экспериментом (рисунок 1.62, линия 4). Использование при моделировании постоянного напряжения горения, определенного из статических характеристик, дает некорректные результаты по сравнению с экспериментом (рисунок 1.62, линия 3).

Коэффициент мощности η играет важную роль при конструировании озонатора и при выборе наиболее оптимального режима работы. Определение зависимости η от различных параметров позволяет найти эффективные значения этих параметров, которые соответствуют наиболее полному использованию электрической энергии, подводимой к озонатору [1]. Коэффициент мощности определяется как отношение активной мощности к полной или вольт-амперной характеристике.

Полная мощность, определенная по динамическим характеристикам вторичной цепи трансформатора ГО в диапазоне эффективных напряжений 3–5,5 кВ, нелинейно возрастает со 150 до 550 Вт (рисунок 1.63, линия 2). Большие значения P обусловлены преобладанием реактивной мощности во вторичной цепи трансформатора за счет емкостного характера нагрузки. Активная мощность составляет величину порядка 10 % от полной. Как следствие такого различия между P_a и P , во вторичной цепи реализуются

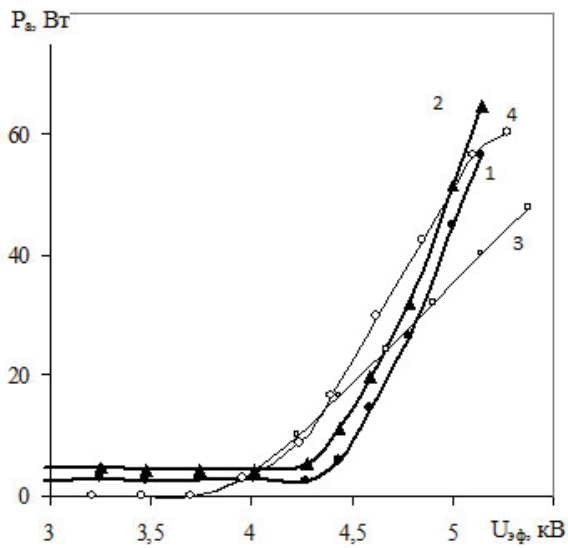


Рисунок 1.62 – Зависимость активной мощности озонатора от эффективного напряжения: 1, 2 – экспериментальные измерения из осциллограмм вольт-амперных и из вольт-кулоновских характеристик; 3, 4 – рассчитанные значения при постоянном и переменном U_2

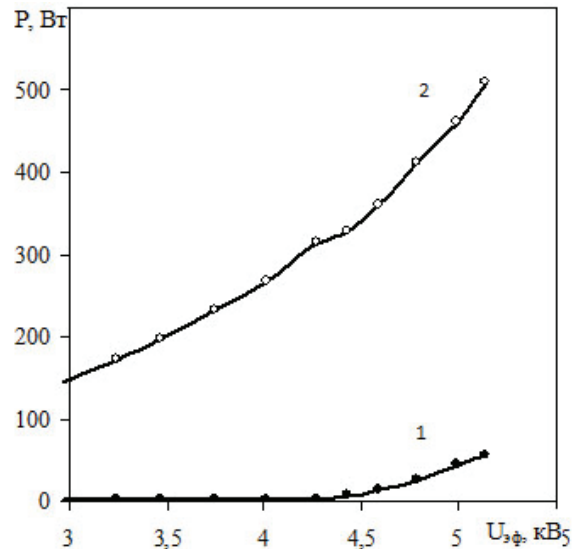


Рисунок 1.63 – Зависимости активной (1) и полной (2) мощности ГО от $U_{эфф}$

невысокие коэффициенты мощности $\eta \sim 0,1$ (рисунок 1.64, линия 1). Поэтому при расчете сечений провода вторичных обмоток ГО необходимо учитывать данный показатель.

С точки зрения эффективности использования электрической энергии ГО, коэффициент мощности необходимо определять для всего устройства по первичной цепи питания. Коэффициент мощности ГО, в отличие от обычных озонаторов, слабо зависит от эффективного напряжения во вторичной цепи (рисунок 1.64, линия 2). До зажигания разряда $\eta \sim 0,7$ и возрастает до 0.8 при существовании разряда. Для обычных озонаторов максимальный коэффициент мощности 0,6, а средние значения порядка 0,3 [1]. Полученные значения η ГО типичны для нетрансформаторных импульсных источников питания [59, 60]. Для повышения η используются различные корректоры коэффициента мощности, в том числе пассивные и активные.

1.5.5. Синтез озона в гибридном озонаторе. Основными критериями конкурентной озонаторной установки являются: концентрация озона и энергетический вклад в его производство. Минимальный порог энергетического вклада в современных кислородных озонаторах достигает ~ 8 кВт*ч/кг, при концентрациях озона порядка 150 г/м³ [61]. Основными параметрами, влияющими на эффективность электросинтеза озона в барьерном разряде, являются: напряжение и частота питания, вложенная мощность, скорость потока газа через разряд, температура газа, его состав и влажность, величина разрядного промежутка, способы его охлаждения, материал и толщина диэлектрика, их поверхность и материал электродов.

Исследования выходных параметров по озону в ГО показали, что зависимости концентрации и производительности озона в барьерном разряде данного типа характеризуются выраженным ростом на начальном этапе развития разряда. Это связано с оптимальной температурой процесса внутри разрядной области и плавным переходом к почти

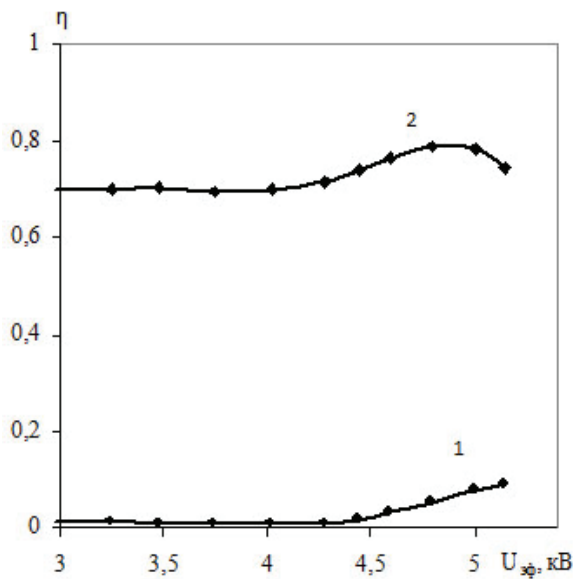


Рисунок 1.64 – Зависимости коэффициентов мощности от $U_{эфф}$ для: 1 – вторичной цепи; 2 – озонатора в целом

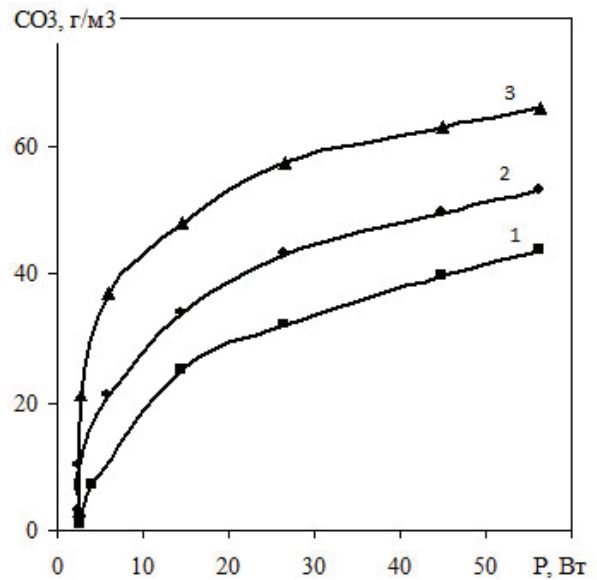


Рисунок 1.65 – Зависимость концентрации озона от активной мощности при расходах кислорода: 1 – 1; 2 – 0,5; 3 – 0,2 л/мин

линейной зависимости при увеличении вложенной мощности (рисунок 1.65). Слабое увеличение концентрации при больших мощностях связано с температурным фактором разложения озона. Для предлагаемой совмещенной конструкции озонатора концентрация озона достигает 67 г/м^3 , а при варьировании расхода кислорода производительность достигает около 3 г/час .

Энергетические затраты, идущие на синтез озона в ГО, представлены на рисунке 1.66. Отметим, что здесь можно выделить три характерные области:

1 – высокие энергетические затраты порядка 60 кВт*час/кг , которые связаны с недостатком входных значений мощности и расхода энергии на начальном этапе развития разряда, и направленные на деструкцию нейтральных молекул кислорода;

2 – минимум энергетических затрат $\sim 8 \text{ кВт*час/кг}$ при вложенной мощности около 10 Вт и размерах данной области, которые определяются расходом рабочего газа и приходятся на максимум концентрации озона;

3 – увеличение энергетических затрат с ростом мощности, что определяется изменением полного сопротивления разрядной ячейки, включающим реактивную (емкость диэлектрических барьеров) и активную составляющую (омическое сопротивление разрядного промежутка).

При развитии разряда активные потери в плазме незначительно возрастают, доля реактивной составляющей мощности остается доминирующей, поэтому общий характер поведения зависимости энергетических затрат в дальнейшем не изменяется.

Разработанная технология электросинтеза озона имеет следующие существенные отличия от традиционных технологий:

- трансформатор и разрядная ячейка представляют собой единое целое;
- межслойная изоляция вторичной высоковольтной обмотки трансформатора играет роль диэлектрического барьера в разрядной ячейке;

- в межслойной изоляции, выполненной в виде коаксиальных цилиндров, конструктивно предусматривается газовый зазор для ввода кислорода или воздуха.

Анализ работы данной разрядной ячейки показывает, что в электрический контур озонатора с активным емкостным сопротивлением внесена индуктивность вторичной обмотки трансформатора, вызывающая уменьшение результирующего реактивного сопротивления контура подобно тому, как это происходит при резонансе напряжений в последовательной (R, L, C) электрической цепи. Снижение общего реактивного сопротивления контура приводит к увеличению тока в цепи и активной мощности разрядного промежутка, что, в свою очередь, способствует увеличению производительности озонатора и снижению энергетических затрат, идущих на синтез озона.

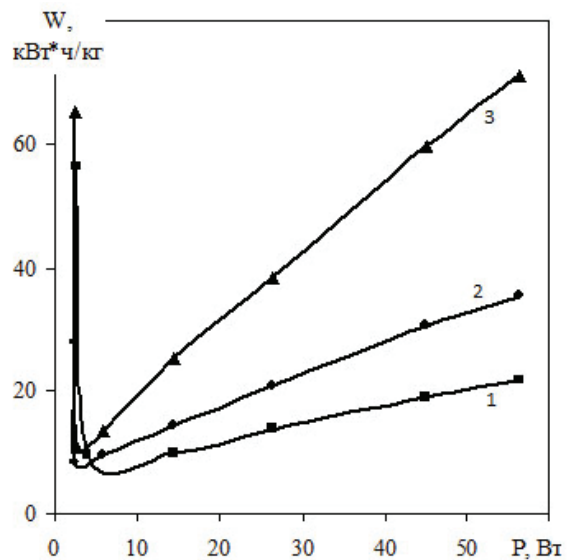


Рисунок 1.66 – Зависимость удельных энергетических затрат, идущих на синтез озона, от активной мощности: расход кислорода: 1 – 1; 2 – 0,5; 3 – 0,2 л/мин

1.6. Синтез озона в высокочастотном барьерном разряде

1.6.1. Экспериментальная установка и методы исследований. В настоящее время для синтеза озона широкое применение получили озонаторы на основе высокочастотного барьерного разряда. Устройство включает в себя следующие блоки (рисунок 1.67): приборы измерения входных электрических параметров (потребляемая активная мощность, эффективные напряжение и ток); блоки питания системы охлаждения разрядной ячейки и ШИМ контроллера; высоковольтный преобразователь на базе полумостового инвертора; система подачи и регулирования расхода кислорода, включающая баллоны с кислородом, редуктора и поплавковый ротаметр; разрядную ячейку, состоящую из системы охлаждения, электродов и диэлектрического барьера из корундовой керамики; блок регистрации озона на базе оптического озонметра «Медозон-254». Диапазон напряжений экспериментальной установки 1–6 кВ. Регулировка напряжения производится с помощью лабораторного автотрансформатора по первичной цепи 0–220 В и с частотой питания 18 кГц. Расход кислорода регулируется в интервале 0–1 л/мин. Концентрация озона регистрируется в диапазоне 0–100 г/м³ с точностью до 0,1 г/м³.

Разрядная ячейка 9 (рисунок 1.68) состоит двух радиаторов 1, между которыми установлен диэлектрический барьер 2 из корундовой керамики (поликор ВК-100-1). В нижнем радиаторе изготовлена прямоугольная полость глубиной 0,5 мм, выполняющая роль разрядного промежутка 3. На радиаторах закреплены вентиляторы 4. Радиаторы выполняют две функции:

- 1 – являются электродами барьерного разряда;
- 2 – совместно с вентиляторами осуществляют отвод тепла из разрядного промежутка.

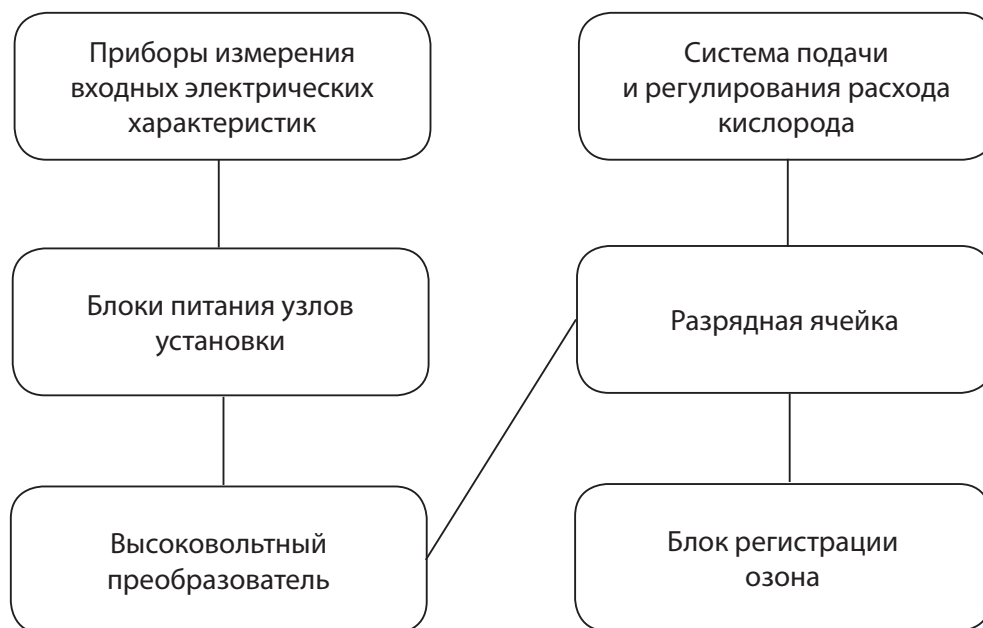


Рисунок 1.67 – Блок-схема экспериментальной установки

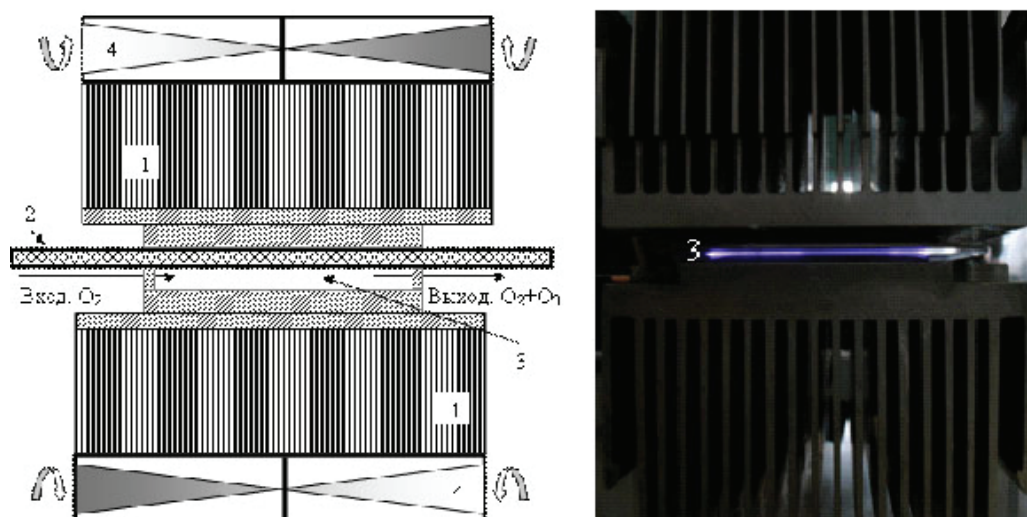


Рисунок 1.68 – Разрядная ячейка озонатора: 1 – радиаторы, 2 – диэлектрический барьер, 3 – разрядный промежуток, 4 – вентиляторы для охлаждения

Сжатый кислород из баллона через редуктор и ротаметр с заданным расходом через технологические каналы нижнего радиатора подается на вход разрядного промежутка, а на выходе получается озон-кислородная смесь. Концентрация озона определяется оптическим озонметром по поглощению ультрафиолетового излучения. Конструкция ячейки разборная и позволяет устанавливать диэлектрический барьер с необходимой толщиной. Используются пластинки из поликора (размер 48×60 мм, толщина: 0,5; 1 и 2 мм), величина разрядного промежутка 0,5 мм, частота питающего напряжения 18 кГц. По измеренным значениям активной мощности озонатора, концентрации озона, расходу кислорода определяются удельные энергетические затраты (W , кВт*ч/кг), идущие на синтез озона.

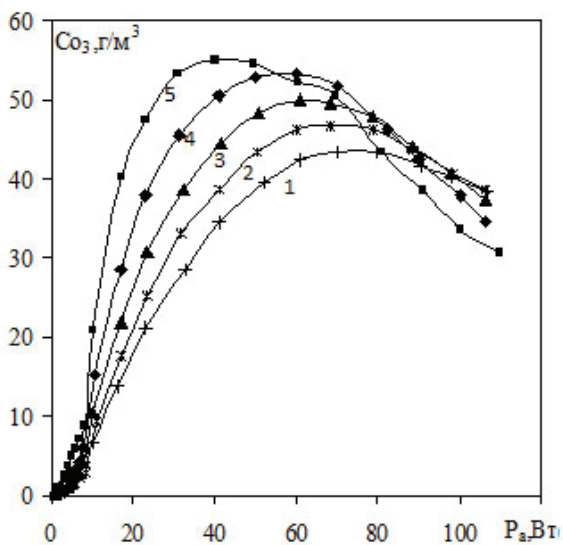


Рисунок 1.69 – Зависимость концентрации озона от активной мощности озонатора для расхода кислорода: 1 – 1; 2 – 0,8; 3 – 0,6; 4 – 0,4; 5 – 0,2 л/мин

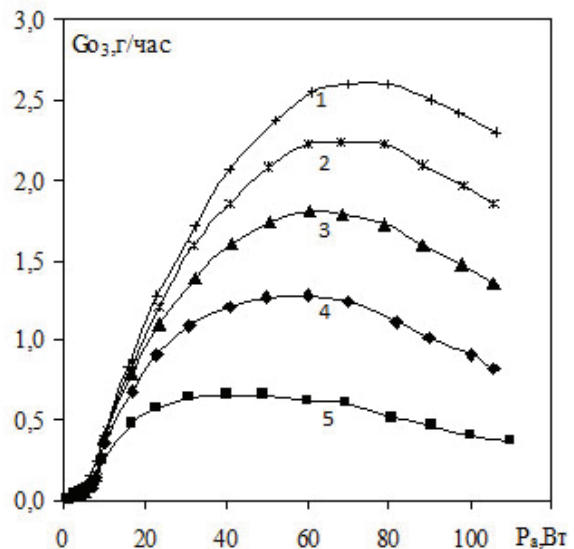


Рисунок 1.70 – Зависимость производительности озона от мощности озонатора для расхода кислорода: 1 – 1; 2 – 0,8; 3 – 0,6; 4 – 0,4; 5 – 0,2 л/мин

1.6.2. Синтез озона в высокочастотном озонаторе. Как следует из результатов эксперимента (рисунок 1.69), концентрация озона с ростом мощности увеличивается, проходит через максимум, а затем начинает уменьшаться. При расходе кислорода 0,2 л/мин (кривая 5) концентрация озона достигает максимального значения при $P = 25$ Вт. При 1 л/мин (кривая 1) максимум концентрации наступает при мощности 75 Вт. Таким образом, при увеличении расхода кислорода в интервале 0,2–1 л/мин концентрации озона всегда проходят через максимум, а величина концентрации – уменьшаются. При данных мощностях максимальные значения концентрации озона соответственно равны: 55 и 43 г/м³.

Большие концентрации озона получаются в случае, когда мощность озонатора превышает известный предел, величина которого зависит от конструктивных особенностей озонатора и от скорости потока кислорода. Изменение концентрации озона объясняется разогревом газа в разрядной зоне, где температурные перепады пропорциональны мощности, квадрату ширины промежутка и тем меньше, чем больше скорость потока. С увеличением температуры растет константа разложения озона (K_1), в то время как константа K_0 , связанная с элементарными стадиями диссоциации молекулярного кислорода и тримолекулярным образованием, практически не зависит от температуры. Для получения высоких концентраций озона необходимо установить мощность и расход кислорода. Для данного озонатора получено, что максимальная концентрация озона составляет 55 г/м³ при мощности 25 Вт.

Производительность озона растет с увеличением мощности (рисунок 1.70) и достигает максимальных значений при больших значениях расхода кислорода. С уменьшением расхода кислорода максимум производительности озона смещается в сторону малых мощностей. Производительность озона при больших мощностях снижается вследствие разрушения озона, вызванного повышением температуры газа. Для получения максимальной производительности 2,6 г/час при расходе кислорода 1 л/мин расходуемая активная мощность составляет ~76 Вт, а при расходе 0,2 л/мин она равна 25–30 Вт.

Изменение удельных энергетических затрат (рисунок 1.71), идущих на синтез озона от подводимой мощности, имеют нелинейный характер. При зажигании разряда при мощности до 15 Вт, удельные энергетические затраты уменьшаются от 120 до 22–25 кВт*ч/кг. Большие энергетические затраты, соответствующие малым значениям мощности, связаны с нестационарными процессами формирования барьерного разряда в объеме разрядного промежутка. При горении устойчивого разряда мощностью 10–40 Вт наблюдаются минимальные энергетические затраты для всех расходов кислорода. При дальнейшем увеличении мощности рост удельных энергетических затрат определяется процессами термического разложения озона.

Коэффициент мощности η (отношение активной мощности к полной или вольт-амперной мощности) играет важную роль при конструировании озонатора и выборе оптимального режима работы. С точки зрения эффективности использования электрической энергии высокочастотным озонатором, коэффициент мощности определяется для всего устройства по первичной цепи питания. В отличие от обычных озонаторов, коэффициент мощности высокочастотного озонатора слабо зависит от активной мощности (рисунок 1.72). До зажигания разряда $\eta \sim 1$, в неустойчивом режиме коэффициент мощности уменьшается до 0,7 и далее, при существовании устойчивого разряда возрастает до 0,8. Для обычных озонаторов максимальный коэффициент мощности 0,6, а средние значения составляют величину порядка 0,3. Полученные значения η высокочастотного озонатора типичны для безтрансформаторных импульсных источников питания. Для повышения η можно использовать различные корректоры коэффициента мощности, в том числе пассивные и активные.

При конструировании озонатора выбирается оптимальный режим работы, когда можно получить большие концентрации озона при минимальных удельных энергетических затратах (рисунок 1.73). Для получения высокой производительности O_3 необходимо увеличивать скорость прокачки кислорода. С ростом концентрации увеличивается скорость обратной реакции, а вместе с ней растут затраты электрической энергии на производство озона.

На синтез озона оказывает влияние толщина диэлектрического барьера. Для определения этой зависимости в разрядную ячейку последовательно устанавливаются пластинки (поликор ВК–100) толщиной: 0,5, 1,0, 2 мм. На рисунке 1.73 видно, что при равной активной мощности концентрация озона уменьшается с ростом толщины диэлектрического слоя. При мощности 60 Вт и при уменьшении толщины диэлектрика с 2 до 0,5 мм концентрация озона увеличивается с 32 до 45 г/м³. Изменение производительности озонатора от активной мощности показывает, что при равных мощностях с ростом толщины диэлектрического барьера производительность озона уменьшается.

При зажигании разряда в разрядном промежутке до мощностей ~ 18 Вт, удельные энергетические затраты уменьшаются (рисунок 1.74) в связи с нестационарными процессами формирования барьерного разряда в объеме разрядного промежутка. В зависимости от активной мощности озонатора удельные энергетические затраты также уменьшаются, достигают минимального значения в области 20–30 Вт, а далее возрастают. Наиболее эффективно генерация озона осуществляется при тонких диэлектриках, например, при толщине 0,5 мм и мощности разряда 20 Вт затраты на синтез озона составляют 18 кВт*ч/кг. Толщина диэлектрического барьера практически не сказывается на характере изменения коэффициента мощности озонаторной установки при широком диапазоне изменения

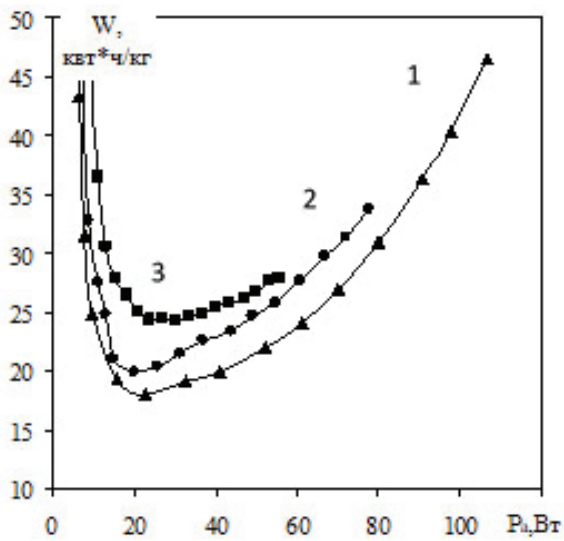


Рисунок 1.71 – Зависимость удельных энергетических затрат от активной мощности озонатора для толщины диэлектрического барьера: 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 2 мм

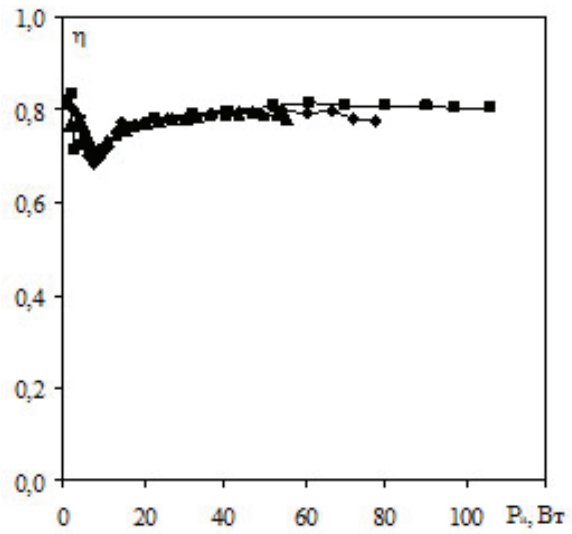


Рисунок 1.72 – Зависимость коэффициента мощности от активной мощности озонатора для разной толщины диэлектрического барьера: 0,5; 1; 2 мм

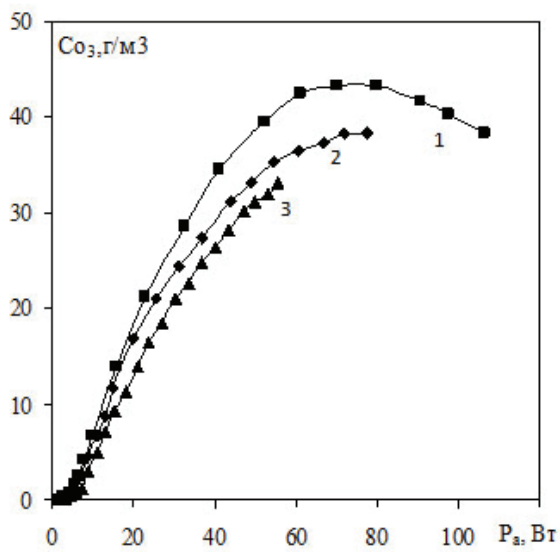


Рисунок 1.73 – Зависимость концентрации озона от активной мощности озонатора для толщины диэлектрического барьера: 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 2,0 мм

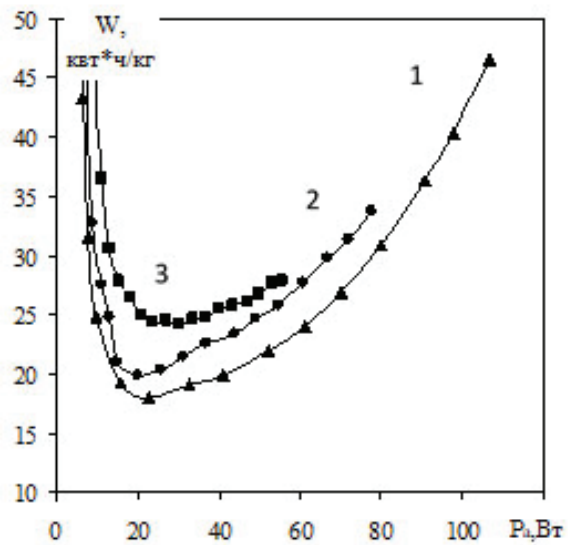


Рисунок 1.74 – Зависимость удельных энергетических затрат от активной мощности озонатора для толщины диэлектрического барьера: 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 2 мм

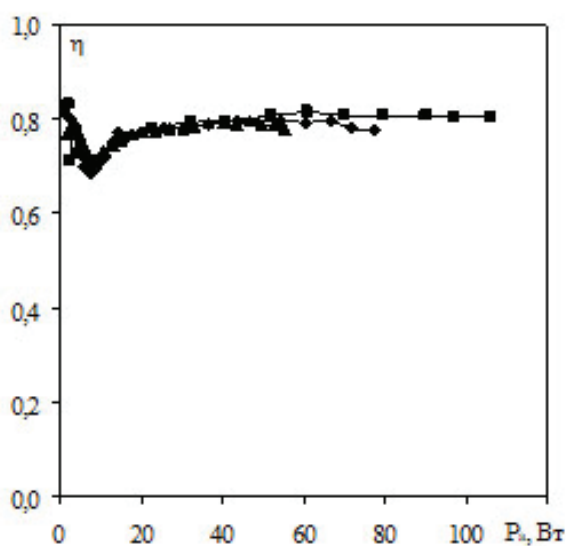


Рисунок 1.75 – Зависимость коэффициента мощности от активной мощности озонатора для разной толщины диэлектрического барьера: 0,5; 1; 2 мм

метр. На передней части озонатора (рисунок 1.76, а) расположены вентиль «Кислород» 1 со штуцером входа кислорода, штуцер 2 «Озон» для выхода озона и штуцер 3 «Деструктор» – для разрушения неиспользованного озона. Кнопка 4 используется для включения или отключения озонатора от сети. Верхняя кнопка «Пуск» 5 служит для включения озонирующего блока, а нижняя «Пуск» 6 для выключения озонирующего блока. Нижняя кнопка «Концентрация «-»» 7 служит для снижения концентрации озона при настройке озонатора. Верхняя кнопка «Концентрация «+»» 8 предназначена для увеличения концентрации озона при настройке озонатора. Индикатор 9 показывает текущее значение расхода кислорода (л/мин) на верхней строке и концентрацию озона (г/м³) на нижней строке. На задней части прибора расположено гнездо для подключения электропитания 10 (рисунок 1.76, б).

При подаче кислорода через входной штуцер и вентиль «Кислород» газ проходит через редуктор, расположенный внутри озонатора и поступает в электронный ротаметр, а далее в разрядную ячейку. Кислород, проходя между обкладками высоковольтного конденсатора разрядной ячейки, попадает в переменное электрическое поле, под действием которого зажигается барьерный разряд. Из кислорода вырабатывается озон, который проходит по магистрали и направляется в места проведения процедуры. Озон, который не использовался в процедуре, направляется в деструктор.

Технические характеристики опытного образца озонатора PLASMALAB: время установления рабочего режима после включения озонатора 10 мин, продолжительность непрерывной работы озонатора 50 мин, а перерыва 10 мин; потребляемая мощность от питающей сети не более 100 ВА; диапазон регулирования расхода кислорода через озонатор 0-2 л/мин; входное давление кислорода 0,5-2 атм; погрешность измерения расхода кислорода $\pm 10\%$; концентрация озона на выходе из озонатора, в зависимости от расхода кислорода и уровня мощности устанавливается в диапазоне 0-80 г/м³; погрешность

активной мощности (рисунок 1.75). В случае стабильного горения разряда величина коэффициента мощности остается на уровне порядка 0,8.

1.6.3. Опытный озонатор PLASMALAB. На основе высокочастотного барьерного разряда разработаны опытные образцы озонаторов PLASMALAB и PLASMALAB D2, предназначенные для получения озона из кислорода с целью проведения химических и физических исследований, а также для профилактики и лечения заболеваний методами озонотерапии.

Озонатор PLASMALAB выполнен на базе компьютерного типового корпуса АТХ, основными частями которого являются (рисунок 1.76): высоковольтный преобразователь, разрядная ячейка, редуктор, ротаметр газа электронного типа и озон-



Рисунок 1.76 – Опытный образец озонатора PLASMALAB

измерения концентрации озона $\pm 15\%$; габаритные размеры озонатора $425 \times 170 \times 445$ мм; масса прибора 8 кг.

Результаты исследований позволили разработать упрощенную модель опытного переносного образца озонатора воздуха PLASMALAB D2 (рисунок 1.77). Озонатор работает на барьерном разряде от высоковольтного высокочастотного источника питания. Воздух с помощью вентилятора продувается между обкладками конденсатора, попадает в переменное электрическое поле, под действием которого загорается барьерный разряд и вырабатывается озон. Объем озонируемого помещения – до 200 м^3 . Рабочий газ – воздух с расходом $50 \text{ м}^3/\text{час}$, производительность озонатора до $1,0 \text{ г}/\text{час}$, режим работы периодический – 25 мин озонирование и 15 мин пауза. Масса озонатора не более 7 кг, напряжение питания $\sim 220 \text{ В}$, частота 50 Гц, потребляемая мощность 30 Вт.

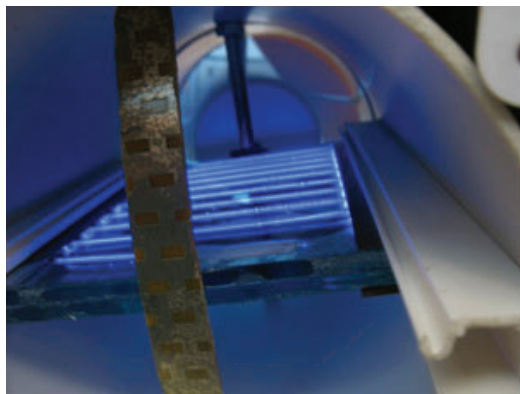
Использование корундовой керамики позволило создать озонаторные установки, работающие на высоких частотах питающего напряжения (до 18 кГц). Минимальные энергетические затраты на синтез озона в высокочастотном озонаторе составляют $18 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{кг}$ при концентрации озона $45 \text{ г}/\text{м}^3$. Уменьшение толщины диэлектрического барьера позволяют существенно снизить энергетические затраты, идущие на синтез озона и увеличить его концентрацию. Выбор оптимального режима работы озонаторной установки производится по следующему алгоритму: необходимая концентрация – нахождение максимальной



Рисунок 1.77 – Озонатор воздуха PLASMALAB D2

производительности при данной концентрации – определение минимальных энергетических затрат – установка требуемой мощности.

Разработанные опытные образцы озонаторов PLASMALAB и PLASMALAB D2 на основе высокочастотного барьерного разряда синтезируют озон с энергетическими характеристиками, удовлетворяющими требованиям промышленного синтеза озона.



1Т. ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

В процессе экспериментальных исследований и разработки новых конструкций озонаторов на основе барьерных разрядов в лаборатории «Плазменные технологии» КРСУ были решены сопутствующие задачи, связанные с получением озона, развитием новых технологий, которые могут представлять определенный интерес для специалистов.

1. Экспресс-стерилизация медицинского инструмента

1.1. Современные методы стерилизации

В практике лечебно-профилактических учреждений применяются жидкостные и газовые методы холодной стерилизации на основе высокотоксичных хлорсодержащих соединений, окиси этилена, формальдегида. Данные технологии реализуются за большие промежутки времени стерилизации, возникают трудности с утилизацией реагентов и их неблагоприятном влиянии на окружающую среду и здоровье персонала. Кроме того, необходимо производить удаление следов стерилизующего агента с инструментов и оборудования промывкой в воде или длительной аэрацией стерильным воздухом [62]. Хлорофлюорокарбониты являются растворителями окиси этилена и приводят к разрушению озонового слоя, что вынудило отказаться от их использования во многих стационарах.

Технология озоновой стерилизации лишена большинства перечисленных выше недостатков. Анализ современных окислителей и дезинфектантов показывает, что наиболее активными окислителями являются свободные гидроксил радикалы и озон (таблица 1.1).

В настоящее время разработаны озоновые стерилизаторы различных конструкций. Технология озоновой стерилизации характеризуется низкой температурой газа за время стерилизационного цикла (до 50 °С), низким энергопотреблением (~120 Вт при объеме камеры 20 литров), не требует расходных материалов и химически стойких дезинфектантов, подлежащих утилизации, нет необходимости отмывать изделия после стерилизации. Озон довольно легко окисляет аминокислоты – как свободные, так и входящие в состав белков, активно реагирует с нуклеиновыми кислотами [63]. Остаток озона, после окончания стерилизационного цикла, быстро конвертируется в кислород и воду. Поэтому при

разработке экспресс-методов озонной стерилизации медицинского инструмента используются в качестве реагентов озон, свободные гидроксил-радикалы и атомарный кислород (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Реагенты озонной стерилизации

№ п/п	Название окислителя	Формула	Окислительный потенциал, В
1	Свободные гидроксил радикалы	$(OH)^{\cdot}$	2,80
2	Атомарный кислород	O	2,5
3	Озон*	O_3	2,07
4	Уксусная кислота*	CH_3CO_2H	1,88
5	Пероксид водорода	H_2O_2	1,76
6	Перманганат-ион	MnO_4^-	1,68
7	Хлорноватистая кислота	$HOCl$	1,49
8	Хлор	Cl_2	1,36
9	Гипобромистая кислота	$HOBr$	1,33
10	Бром	Br_2	1,07
11	Йодноватистая кислота	HOI	0,99
12	Диоксид хлора	ClO_2	0,95
13	Йод	I_2	0,54
14	Кислород	O_2	0,40
15	Гипохлорит-ион	OCl^-	0,50

1.2. Технология экспресс-стерилизации

Методы стерилизации медицинского инструмента с помощью озона реализуются в следующей последовательности:

1. Синтез озона в озонаторе протекает по следующим химическим реакциям:

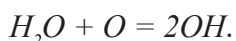


2. Далее проводится насыщение озон-кислородной смеси парами воды.

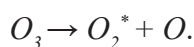
3. Осуществляется разложение озона ультрафиолетовым (УФ) излучением:



4. В итоге синтез гидроксильных радикалов происходит по реакции:



Метод стерилизации медицинского инструмента проводится на установке (рисунок 1.78). Кислород из баллона 1 поступает через редуктор 2 в озонатор 3, где под действием барьерного разряда на переменном напряжении 5 кВ происходит синтез озона. Полученный озон направляется в барботажный аппарат 4, проходит через слой воды и насыщается её парами до 100 % влажности. Далее озон-кислородная смесь и пары воды поступают в герметичную камеру обеззараживания 5, в которой установлена лампа 6 ультрафиолетового излучения ДРЛ 250, подключенная к источнику питания 7. Внутри камеры 5 помещается обеззараживаемый инструмент 8. Под действием УФ излучения озон распадается в результате химической реакции:



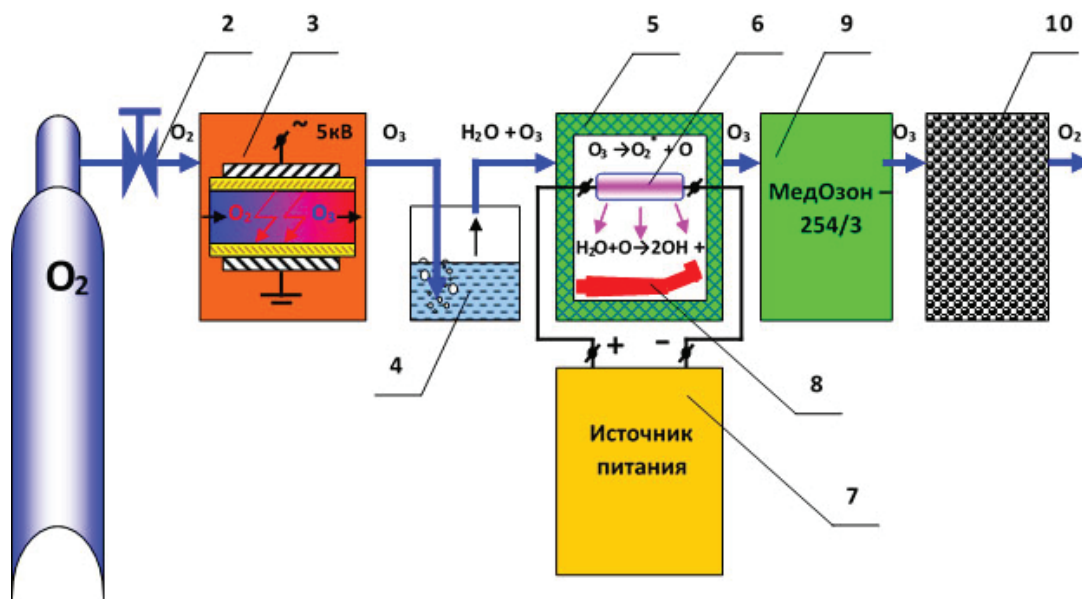
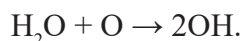


Рисунок 1.78 – Схема экспериментальной установки: 1 – кислородный баллон, 2 – редуктор, 3 – озонатор, 4 – барботажный аппарат, 5 – камера обеззараживания, 6 – ультрафиолетовая лампа ДРЛ 250, 7 – источник питания ультрафиолетовой лампы, 8 – обеззараживаемый инструмент, 9 – озонметр, 10 – деструктор озона

Возникают две химически активные частицы: возбужденный молекулярный кислород и атомарный кислород. Атомарный кислород, обладая высоким окислительным потенциалом более чем озон, вступает в химическую реакцию с парами воды:



На каждый поглощенный в реакции атом кислорода образуются две молекулы гидроксильных радикалов OH, у которых окислительный потенциал выше, чем у атомарного кислорода. Получается, что в камере обеззараживания 5 одновременно работают, как минимум пять обеззараживающих факторов: ультрафиолетовое излучение, озон, возбужденный молекулярный кислород, атомарный кислород и гидроксильные радикалы. Данные факторы способствуют увеличению скорости обеззараживания инструмента 8.

Вид диаграммы взаимодействия УФ излучения с озоном и парами воды, приведенный на рисунке 1.79, подтверждает данную технологию обеззараживания. На рисунке 1.79 видно, что со временем концентрация сухого озона при прохождении через камеру увеличивается, т. к. растет концентрация на входе. При включении УФ лампы, концентрация озона уменьшается, так как озон разлагается при поглощении УФ излучения. Если одновременно воздействовать УФ излучением на влажный озон, то концентрация озона снижается еще быстрее. В этом случае атомарный кислород расходуется на образование гидроксильных радикалов, и нет обратной реакции образования озона из атомарного кислорода при взаимодействии с молекулой O₂.

Предлагаемая технология экспресс-стерилизации медицинского инструмента включает совместное действие озона, УФ-излучения, атомарного кислорода и свободных гидроксильных радикалов. Испытание технологии стерилизации проводилось на медицинских инструментах, зараженных гепатитом В. Анализ обработанных наконечников

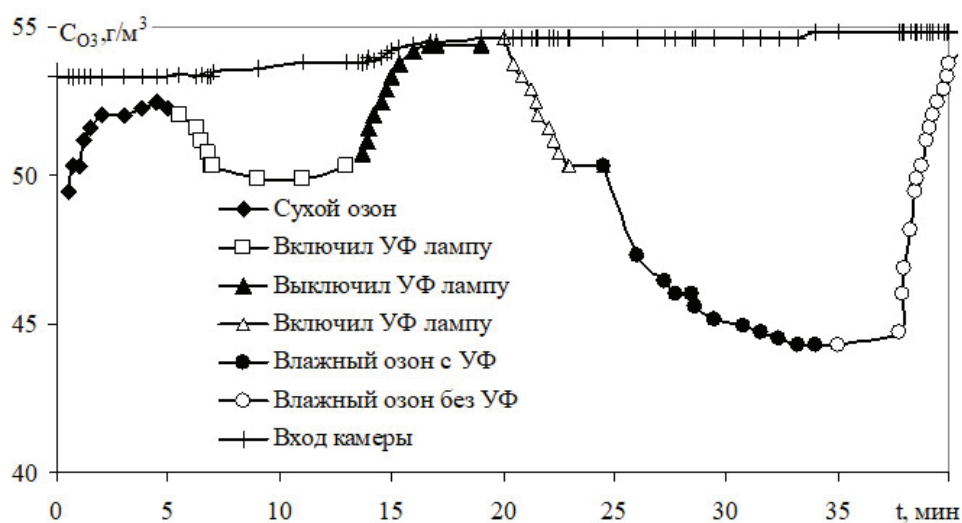


Рисунок 1.79 – Диаграмма взаимодействия УФ излучения с озоном и парами воды

осуществлялся в лаборатории центра изучения СПИДа (г. Бишкек) методом ИФА. Кровь, содержащая вирусы гепатита В, наносилась на поверхность стоматологических наконечников, которые затем обрабатывались в камере стерилизации. Расход O_2 с парами воды (0,2 л/мин) и концентрация O_3 (60 г/м³) не изменялись для всех следующих режимов обработки (таблица 1.2). Результаты показали, что при 5-минутной экспозиции вирус гепатита В присутствовал в незначительных количествах, а 10 минут было достаточно для проведения полной стерилизации инструмента. При соответствующем аппаратном оформлении данная технология может эффективно применяться в медицинских учреждениях.

Таблица 1.2 – Режимы обработки

№ эксперимента	1	2	3	4	5	6
Время обработки (минуты)	5	10	20	40	60	Контроль
Гепатит (В)	0,099	0,0	0,0	0,0	0,0	2,771

2. Барьерный разряд в технологии изделий из полимерных материалов

2.1. Плазменная модификация поверхности полимерных материалов

Известно, что полимерные материалы характеризуются низкими значениями поверхностной энергии, плохо склеиваются и смачиваются растворителями, имеют низкую адгезию к напыленным слоям металлов [64, 65], обладают химически инертными и непористыми поверхностями с низким поверхностным натяжением, что затрудняет образование связей с подложками, печатными красками, покрытиями и клеями. Среди различных пластиков низкую поверхностную энергию имеют полиэтилен и полипропилен, которые чаще всего подвергаются обработке для улучшения их адгезионных свойств.

Одним из наиболее перспективных и современных методов модификации поверхности полимеров является воздействие на них низкотемпературной плазмой [69, 70]. Экологически чистые методы обработки полимеров плазмой значительно выигрывают по сравнению с химической модификацией, при которой используются такие агрессивные реагенты, как кислоты, гидроксиды, щелочноземельные металлы и их соединения.

Воздействие плазмы на поверхность полимера позволяет изменять его контактные свойства: смачивание, адгезию к тонким слоям металла, способность к склеиванию, адгезию, используемую при печати красителей и т. п. Улучшение адгезионных свойств полимеров под воздействием плазмы связано не только с очисткой поверхности от различного рода загрязнений, но и с образованием гидрофильных групп различной химической природы, обеспечивающих высокие свойства модифицированных поверхностей. Состав, структура и свойства полярных групп зависят от природы полимера, от свойств плазмы и плазмообразующего газа. Если в качестве рабочего газа используется кислород или воздух, то на поверхности полимера образуются кислородсодержащие полярные группы. Под воздействием плазмы поверхность полимера становится как гидрофильной, так и более гидрофобной [71].

Наиболее важной особенностью данных методов является то, что изменениям подвергается обрабатываемая поверхность материала и очень тонкий приповерхностный слой, толщина которого составляет от 100 Å до нескольких микрон. Основная масса полимера не изменяется, сохраняя механические, физико-химические и электрофизические свойства модифицируемого материала.

Цель поверхностной обработки – увеличить смачиваемость поверхности, улучшая ее способность к образованию связей с растворителями, клеями, покрытиями и материалами для экструзионного покрытия. Чтобы изделие хорошо смачивалось жидкостью, поверхностная энергия пластика должна быть выше поверхностного натяжения жидкости. В идеале она должна быть на 7–10 дин/см выше, чем поверхностное натяжение растворителя или жидкости.

Для модификации пленочных материалов широкое распространение получили системы на основе барьерного разряда. Обработка барьерным разрядом предназначена для повышения поверхностной энергии полимерных пленок. В результате обработанный материал демонстрирует высокие печатные и адгезионные свойства, а также более высокую прочность ламинирования.

Систему обработки барьерным разрядом можно сравнить с конденсатором (рисунок 1.80). Напряжение подается на верхнюю обкладку, в роли которой выступает электрод 1. Диэлектрическая часть конденсатора состоит из воздушного зазора 2, движущейся полимерной пленки 3 и диэлектрического покрытия 4 металлического вала 5. Нижняя обкладка конденсатора имеет форму заземленного вращающегося вала. Нарастающее напряжение на обкладках конденсатора ионизирует воздух в воздушной прослойке, создавая барьерный разряд.

Активными компонентами «плазмы» барьерного разряда, способными инициировать химические реакции в поверхностных слоях полимера, являются: свободные электроны, радикалы, возбужденные частицы, УФ излучение и озон. Электроны бомбардируют поверхность с энергией, превышающей энергию химических связей, и инициируют реакции, аналогичные радиационно-химическим реакциям. Особенности реакций при упругих и неупругих ударах тяжелых ионов, в отличие от электронного удара, связано

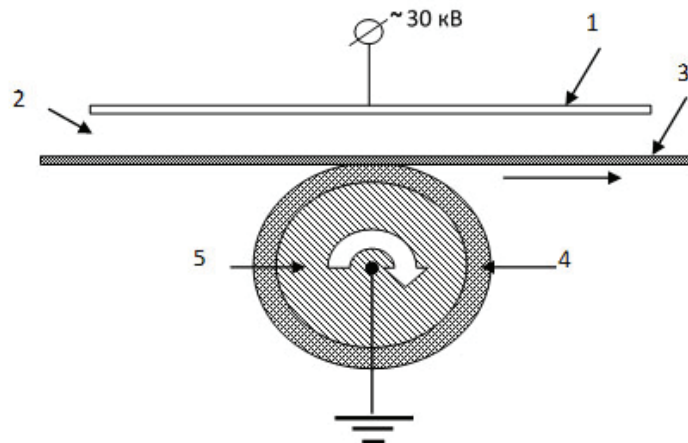


Рисунок 1.80 – Система обработки полимерных материалов барьерным разрядом: 1 – электрод, 2 – воздушный зазор, 3 – полимерная пленка, 4 – диэлектрическое покрытие, 5 – металлический вал

с возможностью передачи атомам или полимерным молекулам энергии. Для наиболее простых по химическому строению полимеров-полиолефинов (полиэтилен и полипропилен) основными продуктами взаимодействия электронов и УФ излучения являются: свободные радикалы, ненасыщенные соединения, межмолекулярные сшивки и газообразные продукты. Активированная поверхность приобретает уникальные свойства, становится «шероховатой на молекулярном уровне», а молекулы полимера прочно сшиваются с веществами краски, лака и клея.

Серийно производимые установки для активации поверхности полимеров, в основном ориентированы на обработку пленочных материалов. В случае нанесения логотипов и надписей на изделия сложной геометрии, требуется индивидуальный подход к проектированию устройства активации. Например, для тампонной трафаретной печати надписей на полиэтиленовых пробках бутылок необходимо предварительно проводить активацию поверхности каждой пробки, причём плазма барьерного разряда должна охватывать не только область будущей печати, но и периферийные зоны, находящиеся на искривленных гранях. Тем более что пробки, устанавливаемые в кассету конвейера для тампонной печати, могут неплотно прилегать к поверхности направляющих штифтов. В результате этого возникает газовый зазор в разрядном промежутке и расстояние между активирующим электродом и каждой пробкой оказывается различным. Кроме этого, толщина полимерного материала в верхней части пробки может быть в несколько раз больше, чем промышленные пленочные материалы. Все перечисленные особенности активации пробок накладывают специфические требования к конструкции узла активации и электрическим параметрам источника питания барьерного разряда.

2.2. Возбуждение барьерного разряда на поверхность полимеров

Разработана технология системы активации поверхности крышек, встроенная в конвейер для трафаретной печати, позволяющая повысить поверхностную энергию полимера до необходимой величины. При обработке, например, шести пробок, размещенных в одной кассете, нужно покрыть плазмой площадь размером в 50 см^2 . Поскольку минимальная плотность потока мощности для получения необходимого угла смачивания составляет порядка $5 \text{ Вт} \cdot \text{мин} / \text{м}^2$, то мощность источника питания должна быть не

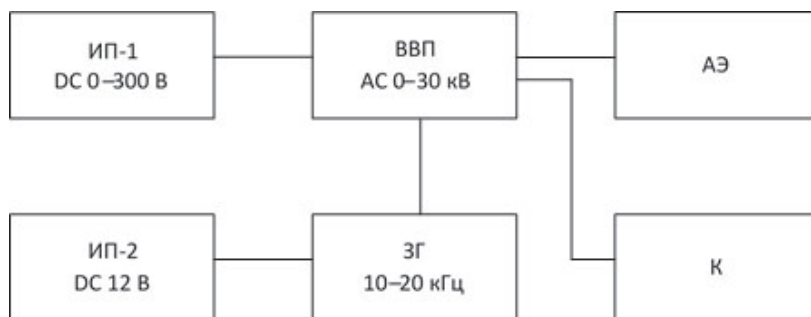


Рисунок 1.81 – Блок-схема устройства: ИП-1 – регулируемый источник питания постоянного тока 0–300 В; ИП-2 – источник питания постоянного тока с напряжением 12 В; ВВП – высоковольтный преобразователь переменного тока; ЗГ – задающий генератор; АЭ – активирующий электрод; К – кассета

менее ~50 Вт. Для обеспечения данной мощности и сложности разрядного промежутка, при зажигании плазмы по всей поверхности пробок, необходимо приложить напряжение ~30 кВ с частотой 20 кГц. Для оптимизации процесса активации полимера выходное напряжение регулируется от 0 до 30 кВ. Для ограничения тока через разрядный промежуток и предотвращения образования дугового разряда, коронирующий электрод отделяется от газового промежутка дополнительным диэлектрическим барьером, который отличается высокой электрической прочностью, термостойкостью, высокой теплопроводностью, малым тангенсом угла диэлектрических потерь и большой диэлектрической проницаемостью.

На экспериментальной установке (рисунок 1.81) определяются оптимальные режимы работы системы активации поверхности полиэтиленовых пробок. Источник питания ИП-1 подает регулируемое напряжение в интервале 0–300 В на обратноходовой преобразователь, входящий в состав высоковольтного преобразователя ВВП. В интервале 10–20 кГц частота преобразования определяется параметрами задающего генератора ЗГ, питание которого осуществляется с помощью источника ИП-2. Высокое напряжение в интервале 0–30 кВ, сформированное с помощью ВВП, прикладывается к активирующему электроду АЭ и заземленной кассете К, на которой расположены пробки. При определенных условиях между АЭ и К зажигается барьерный разряд.

2.2.1. Тиристорный регулятор напряжения служит источником питания ИП-1 (рисунок 1.82). Регулировка напряжений в интервале 0–300 В обеспечивается фазоимпульсным управлением силового тиристора U1. Импульсы управления формируются в моменты времени (синхронизованные с фазой питающего напряжения) с помощью генератора на однопереходном транзисторе Q1. Предусмотрена гальваническая развязка задающего генератора и силового тиристора с помощью трансформатора TR1.

2.2.2. Задающий генератор (рисунок 1.83) формирует управляющие импульсы с заданной частотой и длительностью, которые подаются на затвор транзистора Q2 обратноходового преобразователя. Схема задающего генератора представляет собой релаксационный генератор на базе таймера NE555. Частота и длительность колебаний определяется емкостью конденсатора C2 и номиналами сопротивлений RV1 и RV2. Выход генератора (3) подсоединяется к резистору R1 обратноходового преобразователя.

2.2.3. Высоковольтный преобразователь переменного тока. Для ВВП мощностью до 100 Вт наиболее перспективными являются схемы квазирезонансных обратноходовых

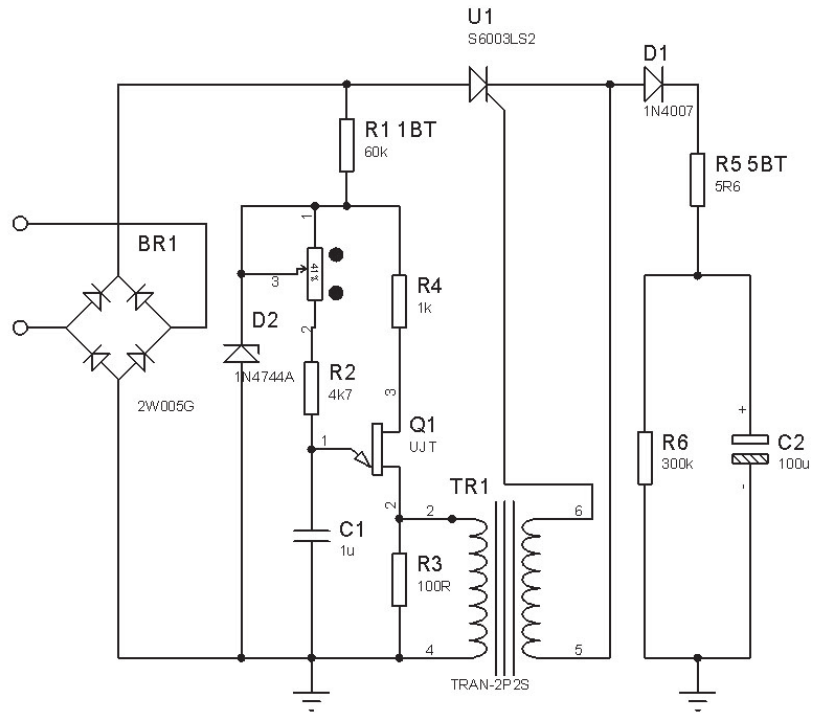


Рисунок 1.82 – Схема регулятора напряжения

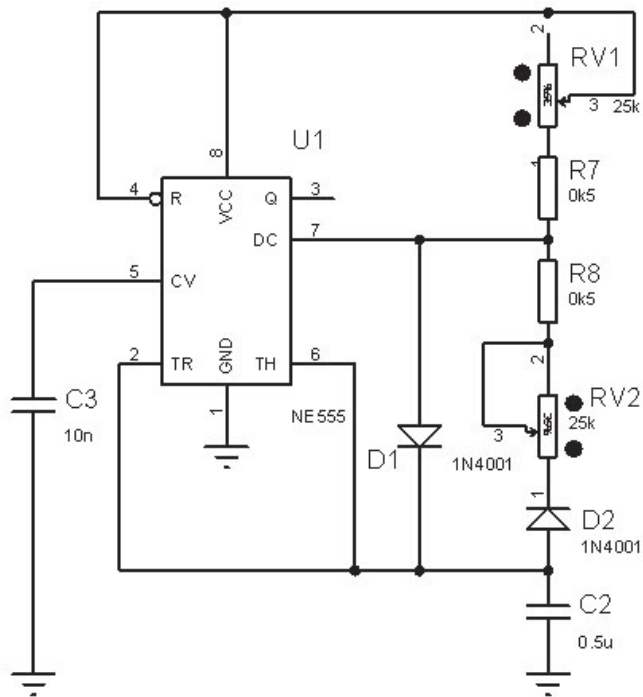


Рисунок 1.83 – Задающий генератор

источников питания. Схема практической конструкции источника питания представлена на рисунке 1.84. При открывании транзистора Q2, импульсом задающего генератора в базе транзистора Q1 формируются импульсы тока необходимой величины. При открывании данного транзистора через первичную обмотку трансформатора TR2 начинает протекать ток. При закрывании транзистора, накопленная энергия в индуктивности первичной обмотки за время открытого состояния, формирует резонансный переходный процесс в контуре, образованном индуктивностью первичной обмотки, конденсатором C1, ёмкостью трансформатора и выходной ёмкостью транзистора. Этот резонансный процесс на истоке транзистора приводит к выбросу напряжения (800 В) в форме половины синусоиды. Такой же по форме, но больший коэффициент трансформации импульс напряжения существует в это время на вторичной обмотке трансформатора. Когда на истоке транзистора половинка синусоиды проходит через ноль, открывается внутренний паразитный диод и фиксирует напряжение на коллекторе. В этот момент со схемы управления на транзистор приходит следующий импульс открывания, и тем самым обеспечивается квазирезонансный режим работы преобразователя с переключением транзистора при нуле напряжения. При коэффициенте трансформации 50 во вторичной обмотке трансформатора TR2 формируется переменное напряжение с амплитудой 40 кВ. Полученное напряжение подается на активирующий электрод и кассету.

Для изготовления активирующего высоковольтного электрода используется корундовая беспористая прозрачная керамика - поликор (за рубежом – люкалос). Поликор имеет высокое значение коэффициента пропускания света и сохраняет электрические характеристики до температуры 400 °С, а механические – до 1600 °С. Электрод (рисунок 1.85) представляет собой пластину из поликора 1, одна сторона которого покрывается методом вакуумного плазменного напыления алюминием 2, сверху на пластину с помощью термокомпаунда 3 устанавливается алюминиевый радиатор 4, служащий для отвода тепла из зоны разрядного промежутка. Радиатор подсоединяется к высоковольтному проводу обратного преобразователя. Электрод располагается перед узлом тампонной печати параллельно плоскости кассеты на расстоянии 1–5 мм. Точность установки крышек по высоте должна быть не ниже 1 мм.

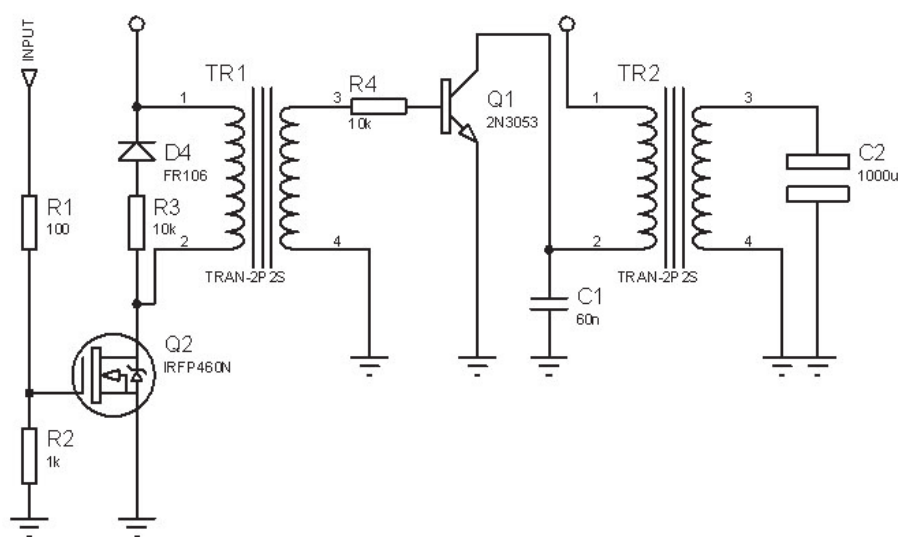


Рисунок 1.84 – Схема обратноходового преобразователя

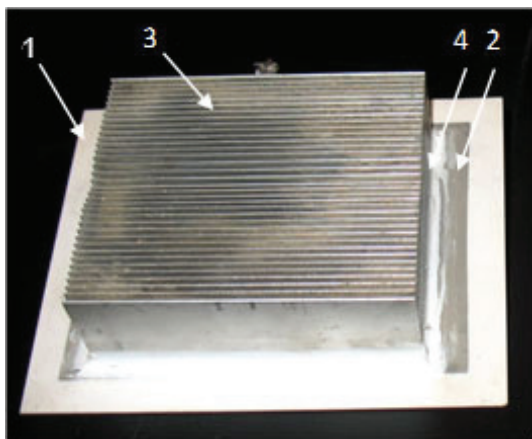


Рисунок 1.85 – Активирующий электрод: 1 – пластина из поликора, 2 – алюминиевый слой, 3 – термокомпаунд, 4 – радиатор

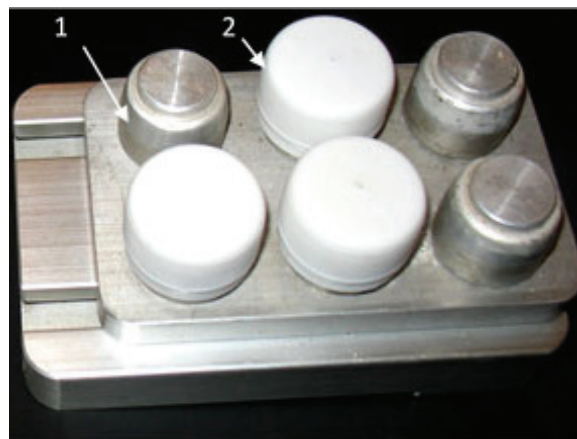


Рисунок 1.86 – Кассета с тремя крышками: 1 – направляющие штифты, 2 – обрабатываемые крышки

Наличие диэлектрика из поликора устраняет опасность образования дуги, практически не нарушает однородность плазмы при прохождении обрабатываемого материала в зазоре между электродами, и обеспечивает равномерную модификацию поверхности всех крышек.

2.2.4. Кассета для автомата тампонной печати надписей и логотипов показана на рисунке 1.86. На направляющие штифты кассеты 1 устанавливаются крышки 2. Кассета с крышками устанавливается в конвейер автомата для тампонной печати. Пошаговое движение конвейера обеспечивает точное позиционирование кассеты под активирующим электродом.

При напряжении 5–30 кВ (в зависимости от расстояния между активирующим электродом и крышками) в зазоре зажигается барьерный разряд (рисунок 1.87). При малых напряжениях разряд имеет дискретную структуру и локализуется на поверхности диэлектрика в виде перемещающихся катодно-анодных пятен (рисунок 1.87, а). Увеличение напряжения приводит к росту плотности мощности на обрабатываемую поверхность и равномерному покрытию плазмой поверхности диэлектрика. На рисунке 1.87, б видно, что на активирующем электроде формируются аналогичные противоположные катодно-анодные пятна. Мощность на данном электроде тратится бесполезно. Изменив конструкцию конвейера путем расположения двух кассет параллельно друг другу, зажигается барьерный разряд между противоположными крышками и тем самым вдвое увеличивается производительность линии при сохранении потребляемой мощности.

После обработки барьерным разрядом, для оценки степени активации поверхности рассмотрим характеристику поверхности на смачиваемость. Количественной мерой смачиваемости служит краевой угол смачивания Θ между касательной к пленке воды и испытываемой поверхностью. На рисунке 1.88 показана капля жидкости (2), находящаяся в равновесии с твердой поверхностью (1) и газом (3). Краевой угол смачивания определяется методом лежащей капли. В данном методе капля жидкости с известным поверхностным натяжением помещалась на твердую поверхность с помощью шприца. Диаметр капли должен быть от 2 до 5 мм, что гарантирует не зависимость её от размеров диаметра. В случае очень малых капелек велико влияние поверхностного натяжения самой

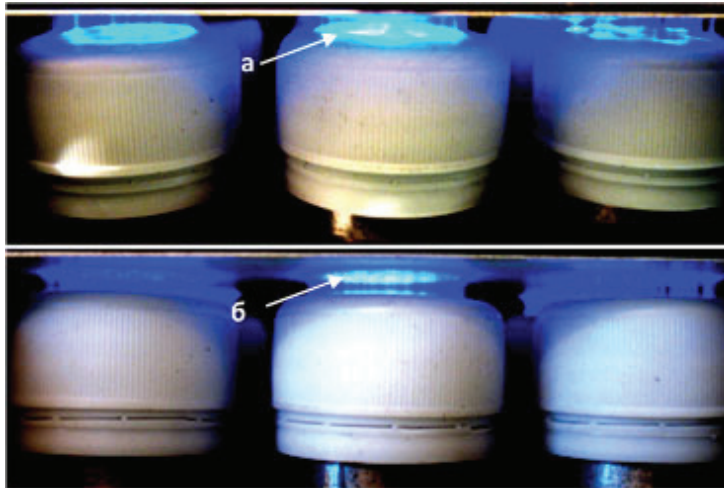


Рисунок 1.87 – Барьерный разряд между крышками и высоковольтным электродом:
а – анодные пятна, б – катодные пятна

жидкости и формируются сферические капли, а при больших каплях начинают доминировать силы гравитации [72].

Для измерения краевого угла смачивания проводятся следующие процедуры: на поверхность крышек, обработанных барьерным разрядом в разные промежутки времени с помощью шприца, помещается капля подкрашенной дистиллированной воды. Изображение каплей фиксируется в режиме «макросъемки» так, чтобы оптическая ось аппарата являлась продолжением плоскости поверхности крышки (рисунок 1.89). На полученных изображениях проводится измерение высоты и ширины основания капли.

С помощью полученных величин по формуле для сферического сегмента

$$\cos\Theta = (r^2 - h^2) / (r^2 + h^2)$$

производится расчёт краевого угла смачивания. По полученным значениям величины краевого угла строится график зависимости угла смачивания от времени воздействия барьерным разрядом (рисунок 1.90). Результаты исследований показали, что при обработке поверхности крышек барьерным разрядом в течение одной секунды, краевой угол смачивания уменьшается от первоначальной величины с 87 до 37 градусов. Воздействие плазмы на поверхность крышки более одной секунды приводит к обратному росту краевого угла. Поэтому оптимальное время воздействия барьерного разряда для обработки поверхности крышек составляет примерно одну секунду.

Таким образом, разработан комплект оборудования для обработки барьерным разрядом полиэтиленовых пробок перед тампонной печатью фирменных надписей на их поверхности. Комплект включает: 1 - кассеты (устанавливаемые в покрасочный автомат) для шести стандартных пробок; 2 – высокочастотный преобразователь с выходным напряжением до 30 кВ и мощностью 60 Вт; 3 – высоковольтный электрод специальной конструкции.

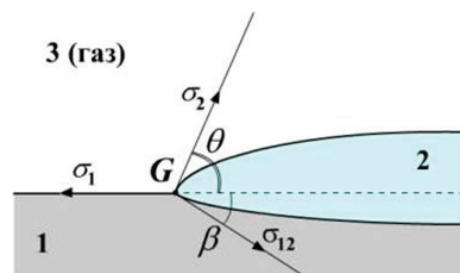


Рисунок 1.88 – Определение краевого угла смачивания

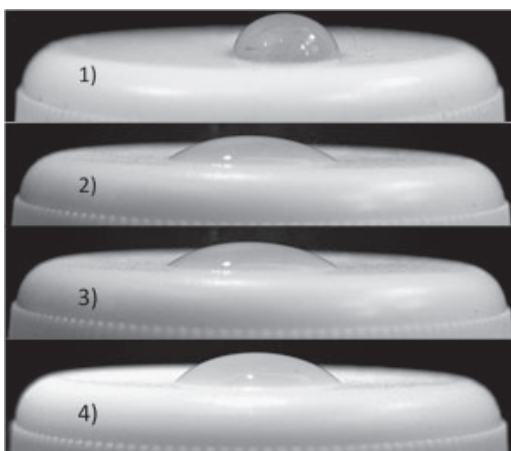


Рисунок 1.89 – Капли воды на поверхности крышки: необработанная поверхность – 1, обработанная поверхность в течение: 2 – 1, 3 – 3, 4 – 15 сек

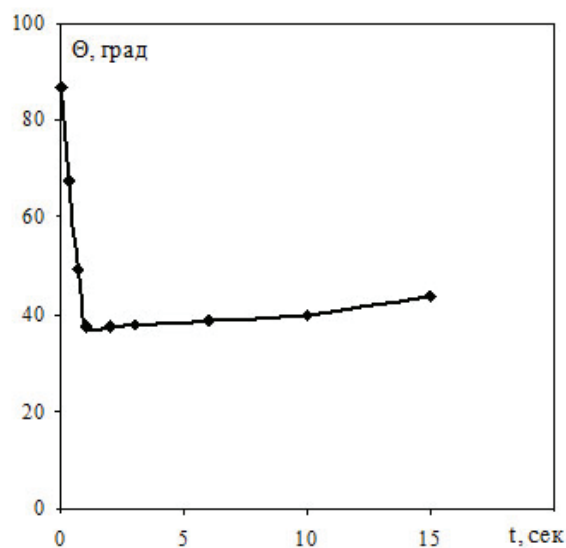


Рисунок 1.90 – Зависимость краевого угла смачивания от времени обработки

Состав и пространственное распределение продуктов, образующихся на поверхности и в поверхностном слое полимера при взаимодействии с барьерным разрядом, изменяются во времени после прекращения процесса. Этот эффект называется процессом «старения» и зависит от времени хранения, структуры полимера, состава окружающей среды и температуры. Эффект «старения» для углеводородных полимеров, обработанных в кислородной плазме, проявляется в том, что контактный угол смачивания, уменьшающийся в несколько раз сразу после обработки, далее начинает расти и достигает практически исходной величины через несколько суток хранения на воздухе. Поскольку поверхностная активность полимеров со временем возвращается к исходному значению, то устройство по предварительной обработке барьерным разрядом необходимо встраивать в машины для нанесения красок, лаков и клеев.

3. Выбор параметров и материала диэлектрика для озонатора

3.1. Параметры, влияющие на образования озона

В настоящее время образование озона в барьерном и коронном разрядах остается практически единственным способом промышленного производства озона. Синтезу озона в барьерном разряде присущи две основные особенности: зависимость выхода продукта от электрических параметров разряда и осуществление синтеза в потоке газа. Исследование озона, развитие новых технологий и сферы его применения обусловлено увеличением потребностей в разработке современных эффективных генераторов озона – озонаторов, отличающихся низкой себестоимостью, высокой технологичностью изготовления, позволяющих получать большие концентрации озона при небольших энергетических затратах.



Рисунок 1.91 – Основные параметры, влияющие на эффективность образования озона

На синтез озона в барьерном и коронном разрядах оказывают влияние следующие параметры (рисунок 1.91):

- *электрические*: мощность, напряжение и частота;
- *физико-химические*: давление, состав и влажность газа, температура и скорость потока газа;
- *конструкционные*: размеры разрядного промежутка и схема охлаждения, материал и толщина диэлектрика, поверхность и материал электродов.

В барьерном разряде максимальная рабочая напряженность в разрядном промежутке достигается путем уменьшения рабочего газового зазора и толщины барьера. Эффективность и технико-экономические показатели образования озона зависят от температуры газа в разрядном промежутке. Заметное разложение озона начинается при нагревании газа выше 500 °С, что накладывает ограничение на вкладываемую мощность. Полуэмпирическая зависимость, связывающая температуру и плотность электрической мощности (P/S), в предположении равномерного выделения тепла по всему разрядному промежутку, находится из выражения:

$$\Delta T_{\text{газ}} = k d / \lambda (P/S),$$

где d – величина разрядного промежутка; λ – коэффициент теплопроводности; $k = 1/3$ (охлаждение одного электрода) и $1/12$ (для двустороннего охлаждения). Например, при

$d = 1$ мм без охлаждения электродов повышение температуры до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигается при $P/S = 1,2$ кВт·ч/м³.

Из формулы вытекают следующие оценки:

а) двухстороннее охлаждение электродов позволяет «закачать» в озонатор в четыре раза больше энергии, чем одностороннее;

б) отвод тепла можно резко увеличить за счет турбулизации потока газа через разрядный промежуток, т. к. коэффициент теплопроводности ламинарного режима течения намного меньше турбулентного;

в) снижение температуры можно осуществить уменьшением размеров разрядного промежутка при той же плотности тока.

Тепловыделение в разрядном промежутке неравномерное и сосредоточено, в основном, в пристеночных областях. С уменьшением разрядного промежутка увеличивается доля вклада приэлектродных областей, где образование озона идет более интенсивно.

3.2. Выбор материала диэлектрика

Экспериментальные исследования показали, что на синтез озона в барьерном разряде влияют материалы конструкции озонатора, охлаждение, влажность и чистота рабочего газа [73, 74]. Наибольшее распространение получили трубчатые стеклянные озонаторы производительностью 10–200 грамм озона в час и удельными энергетическими затратами, идущими на синтез озона до 16–17 кВт·ч/кг O_3 [75]. Озонаторы на основе охлаждаемых стекломалевых электродов с рабочей частотой питания 2000–2400 Гц, способны синтезировать озон из воздуха с удельными энергетическими затратами 11–12 кВт·ч/кг O_3 .

В современных конструкциях озонаторов в качестве диэлектрика вместо стекла применяются новые материалы: стекломаль, оксид алюминия, керамика, поликор. Новые электроды из данных материалов имеют малую толщину диэлектрического покрытия, например 0,5 мм, что позволяет снизить величину разрядного промежутка и повысить концентрацию озона. В конструкциях с двухсторонним охлаждением электродов происходит отвод тепла через диэлектрик, поэтому заметную роль играет теплопроводность материала диэлектрика (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Теплопроводность материала диэлектрика

Материал	Титан	Сталь не-ржавеющая	Стекло	Кварц	Оксид титана	Оксид алюминия
Теплопроводность, Вт/м·с $^{\circ}\text{C}$	10	20	1	1,4	3	30

Из многообразия свойств материалов, используемых в качестве диэлектрического барьера для озонаторов, кроме теплопроводности, важными параметрами являются: электрическая прочность, термостойкость, инертность к агрессивным средам, удельное электрическое сопротивление. В настоящее время данным требованиям отвечает корундовая керамика под названием поликор (за рубежом люкалос) ВК-100-1, которая содержит 99,7–99,9 % Al_2O_3 в качестве основной кристаллической фазы и 0,3–0,2 % окиси магния (таблица 3.2). Корундовая керамика отличается высокими прочностными свойствами: предел прочности её на изгиб достигает 350–600 МПа, на сжатие – 3000–5000 МПа. Она сохраняет свои прочностные свойства до температур 0,8–0,9 от температуры плавления

материала вследствие высокой ионной связи в кристаллической решётке. Поликор устойчив к испарениям, например, при его применении в вакууме при температурах 1800–1900 °С потеря массы составляет 0,4–0,5 %. При длительной эксплуатации свойства корундовой керамики ухудшаются в результате протекания процессов высокотемпературной рекристаллизации.

Таблица 3.2 – Свойства корундовой керамики

Поликор ВК-100-1, содержание Al_2O_3	99,7 %
Толщина	0,5–1,00 мм
Размер	60×48 мм
Цвет	Прозрачный
Водопоглощение, %	0,00
Плотность, г/см ³	3,96
Предел прочности на изгиб	320 МПа
Коэффициент температурного расширения при 20–900 °С	$8,0 \cdot 10^{-6}$
Диэлектрическая проницаемость, 1 Гц, 25 °С	$9,6 \pm 0,2$
Тангенс угла диэлектрических потерь 1 Гц, 25 °С	10^{-4}
Удельное объёмное электрическое сопротивление 100 °С	10^{14} Ом·см
Шероховатость полированной поверхности, Rz, мкм	0,05
Шероховатость шлифованной поверхности, Ra, мкм	1,6

Корундовая керамика высокой степени чистоты обладает высокими электрофизическими характеристиками. Средние значения удельного объёмного сопротивления при нормальной температуре находятся в пределах 10^{14} – 10^{16} Ом·см в зависимости от чистоты материала, свойств стекловидной составляющей и структуры. С повышением температуры до 1000 °С удельное объёмное сопротивление снижается до 10^6 – 10^7 , а при 1500 °С – до 10^4 – 10^3 Ом·см. Диэлектрическая проницаемость около 12, а тангенс угла диэлектрических потерь корундовых электроизоляционных материалов при 100–200 °С составляет $\text{tg}\delta = 1 \div 4 \cdot 10^{-4}$, и зависит от фазового состава.

В отличие от обычной корундовой керамики, беспористый прозрачный поликор применяется для изготовления колб и некоторых специальных источников света. Он проявляет высокую нагревостойкость и сохраняет электрические характеристики до температуры 400 °С, а механические – до 1600 °С. Благодаря высокой плотности – 3,97 г/см³, практически равной плотности Al_2O_3 , поликор обеспечивает высокую чистоту обработки поверхности. Поэтому его применяют для осаждения пассивных элементов гибридных интегральных микросхем, в качестве нагревостойких диэлектрических подложек, в том числе микроволновых подложек в запоминающих устройствах, подверженных высоким температурам и давлениям, линз в инфракрасных головках ракет, в лазерных устройствах, колбах металлогалогенных ламп.

4. Высоковольтные источники для синтеза озона

4.1. Источники питания озонаторных установок

В настоящее время образование озона в барьерном и коронном разрядах остается практически основным способом промышленного производства озона. Использование

импульсных генераторов напряжения в данных разрядах позволяет увеличить рабочую напряженность и эффективность наработок озона. Большой интерес вызывают озонаторы с наносекундными коронными разрядами, где на коаксиальную систему электродов подаются импульсы напряжения до 27 кВ в режиме бегущей волны, с фронтом 4–6 нс, длительностью 25 нс и частотой до 130 Гц. С увеличением амплитуды подающего импульса до 20 кВ, энергетический выход озона возрастает до 130 г/кВт·ч [76]. Источник питания содержит высоковольтный выпрямитель, который обеспечивает постоянный барьерный или коронный разряды, и источник повышенного напряжения, подключаемый на определенное время через высоковольтный коммутатор. В импульсных коронных разрядах, происходящих в одном разрядном промежутке [30], можно условно выделить фактически два разряда:

- *постоянный*, определяемый напряжением на электродах;
- *импульсный*, возникающий при кратковременном подключении высоковольтного источника питания.

Импульсный периодический коронный разряд имеет сравнительно малую длительность. Экспериментально установлено, что если катод разрядного контура положительного коронного разряда соединить с источником питания через коммутирующий элемент, а в разрядной цепи со стороны анода включить индуктивность, то максимальный электрический ток устойчивого импульсно-периодического коронного разряда увеличивается до 10 раз по сравнению с положительной классической короной [8]. Технологическое использование импульсно-периодического коронного разряда позволяет увеличить вкладываемую мощность в плазму, что приводит к снижению энергетических затрат на проведение плазмохимических реакций и интенсификации технологического процесса. Анализ результатов исследований показывает, что энергетические характеристики разряда определяются величиной индуктивности в разрядной цепи и свойствами вспомогательного разрядника. Наибольший энергетический вклад в плазму разряда наблюдается при индуктивности в разрядной цепи 3000–3600 Гн [77].

На электрический режим работы озонатора оказывают влияние электрические и физико-химические параметры: температура, скорость газа, давление, состав и влажность. Воздействие данных параметров приводит к изменению нагрузки и потребляемой мощности озонатора. В зависимости от технологического процесса концентрация озона на выходе из озонатора должна быть постоянной, либо изменяться по заданной программе. Это требует автоматического изменения электрических параметров источника питания. Производительность озонатора определяется количеством энергии, поступающей от источника питания в зону разряда. Использование импульсного напряжения с крутым фронтом является перспективным, так как превышение импульсной электрической прочности разрядного промежутка над его прочностью при синусоидальном напряжении позволяет увеличить амплитуду питающего напряжения и производительность озонатора.

Поскольку озонатор и источник питания представляют собой единую систему, то разработку источников питания озонаторов целесообразно проводить с учетом параметров конкретного устройства и требований к степени автоматизации процесса электролиза озона. Анализ существующих высокочастотных источников питания показал, что основной причиной неустойчивой работы является то, что озонатор как нелинейная емкостная нагрузка, приводит к возникновению нежелательных резонансных явлений в силовой цепи преобразователя. Необходимо проектировать источник питания озонатора

таким образом, чтобы рабочая частота преобразователя была равна резонансной частоте колебательного контура, образованного емкостью электродов озонатора и индуктивностью вторичной обмотки высоковольтного трансформатора. Тогда обеспечиваются оптимальные условия передачи энергии от источника питания к озонатору и эффективная его работа. Так как резонансная частота контура в процессе работы не остается постоянной и изменяется, то целесообразно в схему преобразователя частоты ввести устройство, отслеживающее резонансную частоту этого контура и управляющую преобразователем в такт с этой частоты [1].

4.2. Тиристорный источник питания в барьерном разряде

Простой и надёжный блок питания для озонаторной установки реализуется на базе тиристорного однотактного генератора [78]. Рассмотрим работу схемы источника (рисунок 1.92):

- переменное напряжение однофазной сети переменного тока выпрямляется диодным мостом VD1, а конденсатор C3 сглаживает пульсации переменного напряжения до требуемого уровня;
- конденсаторы C1, C2 и двухобмоточный дроссель L1 на входе источника образуют сетевой помехоподавляющий фильтр;
- резистор R1 служит для уменьшения броска зарядного тока C3 при включении;
- конденсатор C5 резонансно заряжается через дроссель L2, диод D2 и первичную обмотку трансформатора T1 до удвоенного напряжения питания;
- при отпирации тиристора D3 управляющим импульсом от релаксационного генератора, собранного на однопереходном транзисторе VT1, конденсатор C5 разряжается через первичную обмотку T1 и тиристор.

Ток разряда возбуждает колебания в контуре, образованном индуктивностью первичной обмотки трансформатора и её паразитной ёмкостью, и прекращается, достигнув тока удержания тиристора. На вторичной обмотке индуцируется высокое напряжение и в разрядной ячейке зажигается барьерный разряд. После закрывания тиристора конденсатор C5 вновь резонансно заряжается через дроссель L2 до удвоенного напряжения

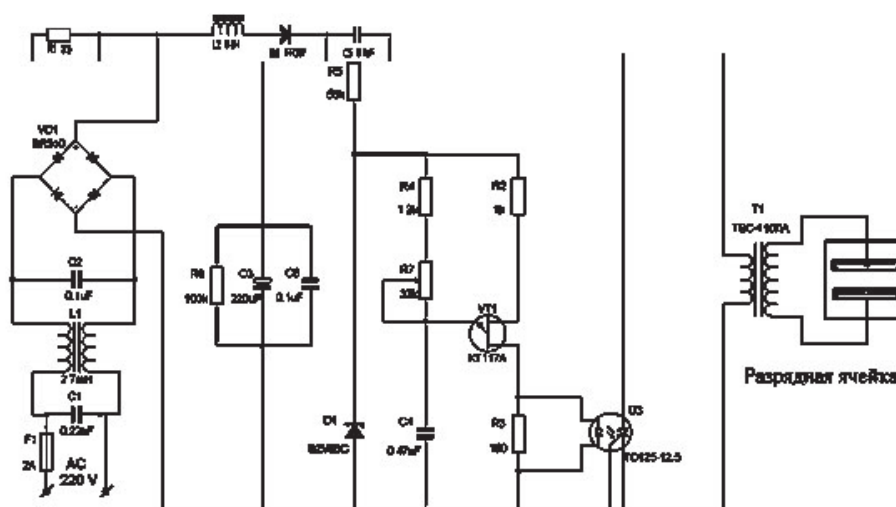


Рисунок 1.92 – Схема тиристорного источника питания для синтеза озона в барьерном разряде

питания, а на тиристор D3 снова подается включающий импульс и цикл повторяется. Частота работы тиристорного генератора изменяется переменным резистором R7, диапазон изменения частоты составляет от 100 до 500 Гц – соответственно меняется и мощность, отдаваемая в разрядную ячейку.

В качестве дросселя L2 используется 40 Вт дроссель балласта для ламп дневного света. Трансформатор T1 представляет собой строчный трансформатор ТВС-110ЛА. Первичная обмотка намотана проводом с $d = 0,8$ мм, количеством витков $N = 50$. При сборке трансформатора половинки магнитопровода в месте соединения должны быть тщательно отшлифованы, а крепеж трансформатора изготовлен из немагнитного материала, например латуни.

Данный источник питания обеспечивает мощность до 100 Вт и при правильной сборке не требует наладки. Недостатком данной схемы является низкая частота работы (до 1 кГц), сопровождающаяся характерным неприятным звуком.

4.3. Квазирезонансный источник питания барьерного разряда

Использование современных силовых компонентов и методов преобразования энергии позволяет создавать эффективные и малогабаритные высокочастотные источники питания, применяемые для синтеза озона. При мощностях до 100 Вт перспективными являются схемы квазирезонансных обратных источников питания (рисунок 1.93). Переменное напряжение однофазной сети переменного тока выпрямляется диодным мостом VD1, конденсатор C3 сглаживает пульсации переменного напряжения до требуемого уровня. Конденсаторы C1, C2 и двухобмоточный дроссель L1 на входе источника образуют сетевой помехоподавляющий фильтр. Резистор R1 служит для уменьшения броска зарядного тока C3 при включении. При открывании транзистора VT2 импульсом со схемы управления к первичной обмотке трансформатора T2 прикладывается напряжение конденсатора C3, и через неё начинает протекать ток.

При закрывании транзистора накопленная в индуктивности первичной обмотки за время открытого состояния энергия формирует резонансный переходный процесс в контуре, образованном индуктивностью первичной обмотки, конденсатором C11, ёмкостью трансформатора и выходной ёмкостью транзистора. Этот резонансный процесс приводит на стоке транзистора выброс напряжения в форме половины синусоиды, величиной 800 В. В это время такой же по форме, но больший коэффициент трансформации импульс напряжения существует на вторичной обмотке трансформатора, под действием которого в разрядной ячейке возникает барьерный разряд. Когда половинка синусоиды на стоке транзистора проходит через ноль, то открывается внутренний паразитный диод VT2 и фиксирует напряжение на стоке. В этот момент со схемы управления на транзистор приходит следующий импульс открывания. Тем самым обеспечивается квазирезонансный режим работы преобразователя с переключением транзистора при нуле напряжения. Далее описанный выше цикл повторяется.

В схеме управления в качестве ШИМ-контроллера используется микросхема UC3843В. Встроенные структурные элементы микросхемы обеспечивают ее отключение при недопустимо низком входном напряжении и пусковом токе менее 1 мА, а квазикомплементарный выходной каскад рассчитан на значительные броски втекающего и вытекающего тока. Выходной каскад обеспечивает работу на нагрузку типа n-канального

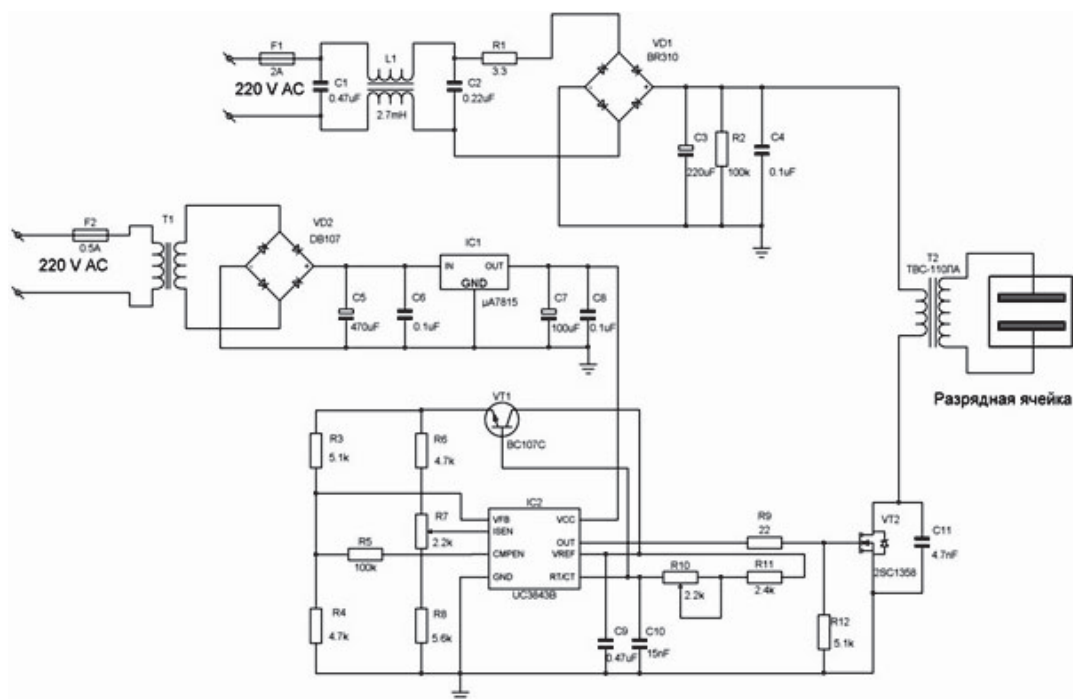


Рисунок 1.93 – Схема квазирезонансного обратного источника питания

полевого транзистора с изолированным затвором и имеет низкий логический уровень напряжения в отключенном состоянии [79]. Резистор R7 служит для регулировки длительности импульса управления, а резистор R10 регулирует частоту преобразования в диапазоне 15÷30 кГц. Емкость конденсатора C11 рассчитывается из формулы для резонанса колебательного контура, образованного C11 и индуктивностью первичной обмотки трансформатора T2. Из-за сложности измерения таких параметров, как выходная емкость транзистора, емкость трансформатора, паразитная емкость монтажа окончательный номинал конденсатора C11 подбираются на этапе настройки блока питания по форме импульса напряжения на стоке транзистора VT2, который имеет колоколообразную форму и не превышает по величине пробивное напряжение транзистора. В качестве трансформатора T2 применяется трансформатор строчной развертки ТВС-110ЛАб с параметрами первичной обмотки: провод $d = 0,8$ мм, количество витков $N = 90$. Источник питания работает на частоте 25 кГц, максимальная выходная мощность 50 Вт. Недостатком данной схемы, так же как и всех квазирезонансных преобразователей, является невозможность работы без нагрузки.

В качестве нагрузки разработанных источников питания используется разрядная ячейка, представляющая собой две прямоугольные пластины из стекла толщиной $d = 4$ мм, между которыми находится медная фольга, являющаяся одним из электродов. Второй электрод выполнен в виде спирали из нихромовой проволоки толщиной $d = 0,1$ мм, навитой на стеклянные пластины с зазором в 1 мм и шагом 1 см.

При напряжении 5 кВ формируется барьерный разряд, привязанный к проволочному электроду по всей его длине (рисунок 1.94). Статическая вольт-амперная характеристика разряда представлена на рисунке 1.95. Ток разрядной ячейки нелинейно изменяется в диапазоне 2÷7мА при увеличении напряжения на разряде с 2 до 5 кВ. Линейный

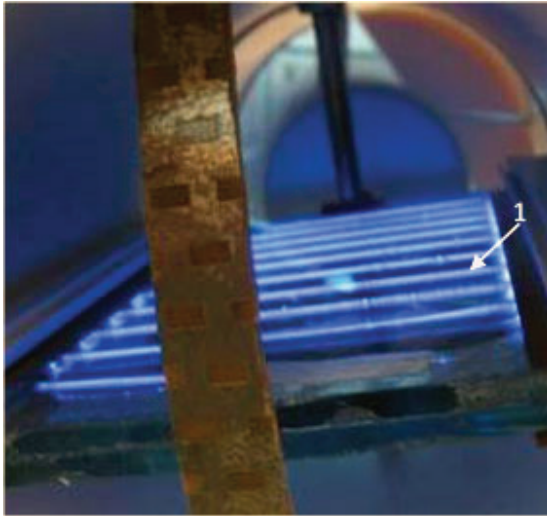


Рисунок 1.94 – Внешний вид барьерного поверхностного разряда (1) в разрядной ячейке

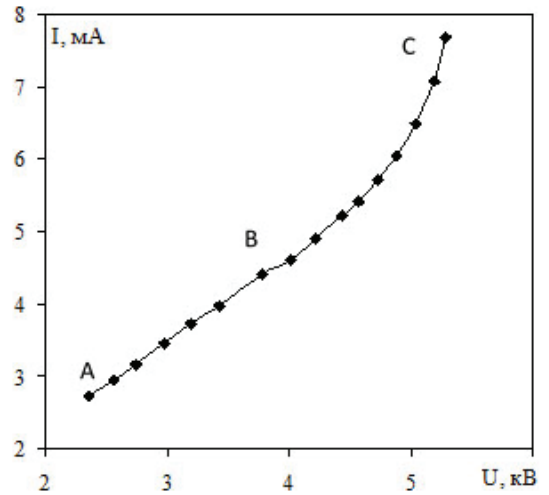


Рисунок 1.95 – Статическая вольт-амперная характеристика барьерного поверхностного разряда

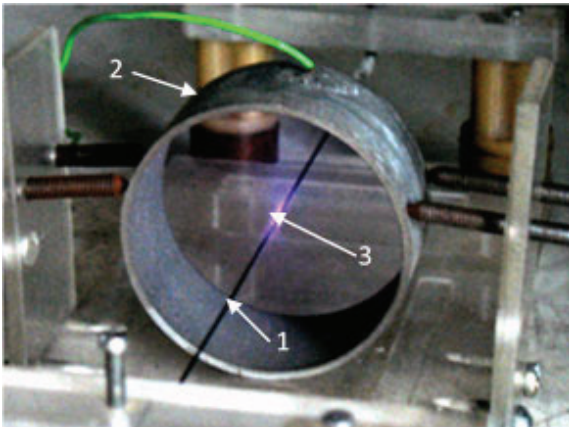


Рисунок 1.96 – Внешний вид разрядного контура и коронного разряда положительной полярности: 1 – коронирующий провод, 2 – заземленный электрод, 3 – корона

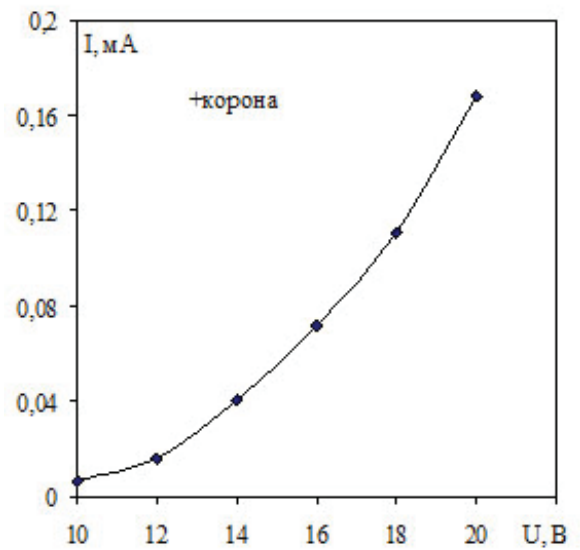


Рисунок 1.97 – Вольт-амперная характеристика положительной короны

участок характеристики АВ соответствует зависимости тока от напряжения при отсутствии разряда в озонаторе (по данным Е. Брине [37]). Озонатор представляет собой систему трех последовательно включенных конденсаторов, поэтому наклон этого участка определяется общей электрической емкостью разрядной ячейки. При напряжениях больше 3,5 кВ, наблюдается нелинейный участок ВС, что соответствует наличию в разрядном промежутке барьерного разряда.

4.4. Квазирезонансный источник питания на коронном разряде

Источник питания для коронного разряда мощностью до 30 Вт реализуется на основе обратногоходовой топологии и применения трансформатора ТДКС. Принцип работы данной схемы аналогичен описанному выше для барьерного разряда. В отличие от конструкции, показанной на рисунке 1.93, в данном блоке питания вместо трансформатора ТВС-110ЛА6 используется трансформатор ТДКС, содержащий звено выпрямления во вторичной обмотке.

Испытание источника питания производится на нагрузке в виде разрядного контура коаксиальной геометрии с диаметрами внешнего $D = 47,7$ мм и коронирующего электрода $d = 0,79$ мм, длина цилиндра – $L = 27,8$ мм. Визуальные наблюдения показывают, что структура полученного разряда при напряжении 20 кВ (рисунок 1.96), соответствует положительной короне и содержит внутреннюю зону ионизации 3 и внешнюю темную зону, где перенос тока происходит за счет дрейфа положительных ионов. Вольт-амперная характеристика (рисунок 1.97) соответствует экспоненциальной зависимости, характерной для коронного разряда. Максимальный ток разряда составляет 0,18 мА при напряжении 20 кВ.

4.5. Источник импульсного периодического коронного разряда

Схема источника питания импульсно-периодического коронного разряда отличается от предыдущих наличием дополнительного транзистора VT3 и генератора управляющих импульсов на микросхеме UC3843В (рисунок 1.98). Данные элементы переводят обычный коронный разряд в импульсно-периодический путём соединения цилиндрического катода с заземляющим проводом через транзистор VT3. Частота включения транзистора задается резистором R21 и может изменяться от 1 до 20 кГц. Длительность импульса открывания регулируется резистором R19. Для предотвращения срыва коронного разряда в дуговой разряд, в разрядную цепь со стороны анода вводится индуктивность L2 величиной 1 Гн. Для задания потенциала на катоде используется напряжение с вывода фокусировки трансформатора T2, которое выпрямляется однополупериодным выпрямителем на диоде D1 и сглаживается конденсатором C15. Резистор R12 служит для стекания избыточного заряда с катода.

Испытание источника питания для импульсно-периодического коронного разряда производится на разрядном контуре предыдущей конструкции. При фиксированном напряжении на катоде 500 В, наблюдается следующая последовательность развития разряда:

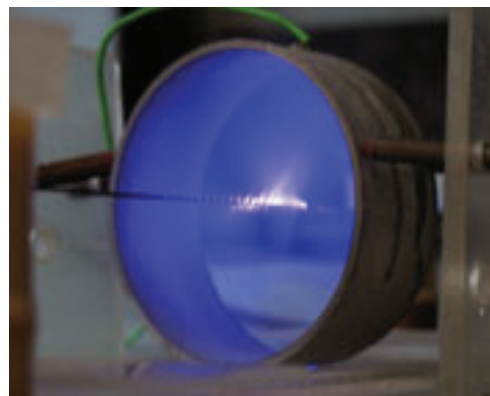
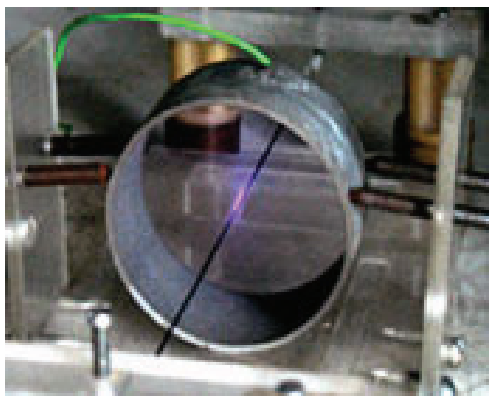
- при увеличении напряжения на аноде (коронирующем электроде) в разрядном промежутке формируется классический коронный разряд положительной полярности;
- дальнейшее увеличение напряжения приводит к формированию объемного разряда, заполняющего весь разрядный промежуток (рисунок 1.99);

- при напряжениях больше 18 кВ, происходит пробой разрядного промежутка с последующим формированием дугового разряда.

Вольт-амперная характеристика (рисунок 1.100, 1) соответствует характеристике линейного коронного факельного разряда.

Максимальный ток разряда составляет 1,8 мА при напряжении 20 кВ, что на порядок больше электрического тока классического коронного разряда при равных условиях. При напряжении на катоде менее 300 В, в разрядном промежутке реализуется классический коронный разряд во всем диапазоне анодных напряжений с соответствующей вольт-амперной характеристикой (рисунок 1.97, 2).

Разработанный источник питания позволяет реализовать два типа разряда без принципиальных изменений в конструкции источника питания. Данные высоковольтные источники питания являются функционально законченными устройствами, предназначенными для работы в озонаторных установках, использующих плазмохимические реакторы на барьерном, коронном и импульсно-периодическом коронном разрядах. Использование стандартных трансформаторов типа ТВС-110ЛА и ТДКС позволило сделать конструкцию более технологичной и удобной для эксплуатации.



2. КОРОННЫЙ РАЗРЯД – ГЕНЕРАТОР ОЗОНА

Коронный разряд находит широкое применение в различных областях науки, техники и производства. Первое промышленное применение коронного разряда для фильтрации паров серной кислоты было предложено Ф.Д. Котреллом [1]. В настоящее время для получения озона широко применяются различные типы коронных разрядов. Плазмохимические реакторы синтеза озона на основе коронного разряда используются в промышленных масштабах с высокой энергетической эффективностью [2–7]. Такие установки работают чаще всего на атмосферном воздухе, поскольку коронные разряды обладают меньшей чувствительностью к влажности и чистоте газа в отличие от барьерных разрядов. Озонаторы широко используются для обеззараживания воды и различных материалов. Путем оптимизации разрядного контура удается получить устойчивую корону при напряжениях 15–25 кВ, способную синтезировать озон с концентрациями до 5 г/м³ при энергетических затратах 10–18 кВт·ч/кг [8–12]. В настоящее время большой интерес вызывает генерация озона в импульсных и наносекундных коронных разрядах [13–15]. На основе импульсного коронного разряда разработаны озонаторы с выходом озона 8–30 кВт·ч/кг [10].

Следует отметить, что коронные разряды находят приложение в других современных областях науки, например, в работах [16, 17] исследуются способы получения углеродных нанотрубок в плазменном реакторе на основе коронного разряда. Коронные разряды используются для возбуждения активной среды газовых лазеров [18, 19] и для синтеза абсорбирующих полимеров в импульсном коронном разряде [20]. Обзор современного состояния техники применения коронного разряда при электрической фильтрации, в электрографии и электростатической печати можно найти в работах [21–23].

В данной работе приведены различные конструкции озонаторов на основе коронного разряда коаксиальной геометрии, коронного разряда с высокотемпературным коронирующим электродом, импульсного периодического коронного разряда, коронного факельного разряда, линейного коронного факельного разряда. Рассматриваются физические процессы, протекающие в плазме различных типов коронных разрядов. Проведены экспериментальные и теоретические исследования характеристик синтеза озона в плазмохимических реакторах коронных разрядов, горящих в воздухе и кислороде при атмосферном давлении.

2.1. Синтез озона в коронных разрядах коаксиальной геометрии

Рассмотрим работу озонатора, разработанного на основе коронного разряда коаксиальной геометрии (рисунок 2.1) и результаты исследований его характеристик.

2.1.1. Экспериментальная установка. Охлаждаемая водой разрядная ячейка озонатора состоит из коронирующего провода 1 радиусом 0,15 мм, натянутого по оси цилиндрического электрода 2 с внутренним диаметром 58 мм, диэлектрическими заглушками 3, 4 и рубашки водяного охлаждения 5. Осушенный силикагелем кислород или воздух с расходом до 1 л/мин вводится в один из торцов цилиндрического электрода, а полученная озонная кислородная смесь подается в оптический анализатор озона.

Зажигание в разрядной ячейке положительной или отрицательной короны производится при подаче на коронирующий провод высокого напряжения, которое регулируется в интервале от 10 до 20 кВ. В данных режимах работы ключ К замкнут (рисунок 2.1), а корпус озонирующего блока заземлен. Наличие в схеме питания тиратрона ТГИ-500/16 и генератора запускающих импульсов, позволяет реализовать повторение импульсов в коронном разряде положительной полярности с заданной частотой в интервале 0–15 кГц. Физические явления и схема реализации импульсной короны подробно рассмотрены в работе [9].

2.1.2. Электрические характеристики. Изменения вольт-амперных характеристик импульсной, отрицательной и положительной полярностей короны в воздухе (рисунок 2.2, а) и кислороде (рисунок 2.2, б) имеют типичный экспоненциальный характер. При равных напряжениях ток отрицательной короны всегда больше электрического тока положительной и импульсной короны. Общее уменьшение тока в коронных разрядах при переходе от воздуха к кислороду определяется следующими причинами: кислород и озон являются электроотрицательными газами, связывающими свободные электроны, и при

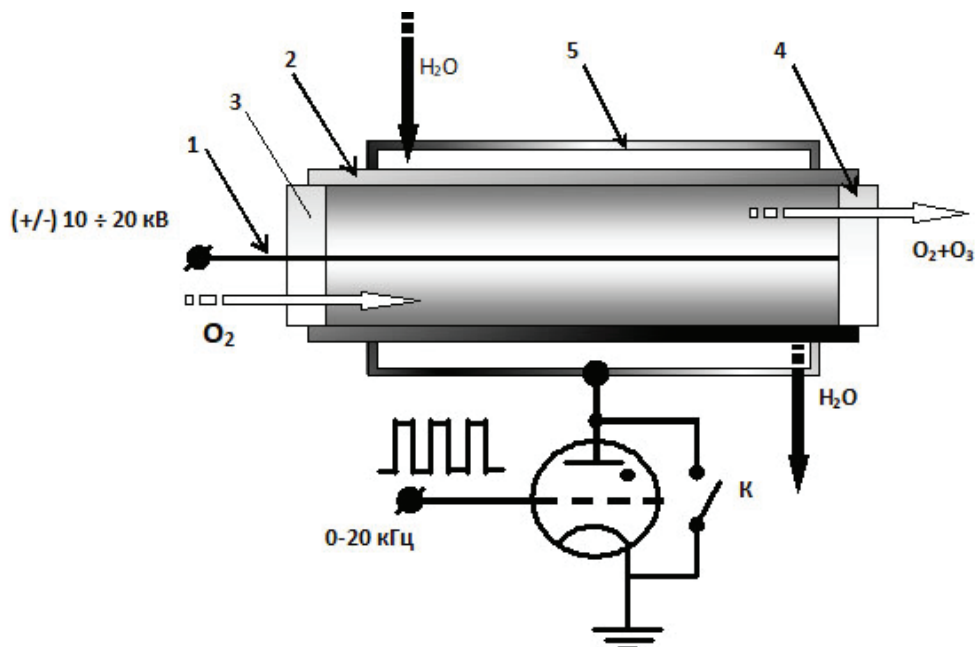


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки коаксиальной геометрии: 1 – коронирующий провод, 2 – цилиндрический электрод, 3, 4 – диэлектрические заглушки, 5 – рубашка водяного охлаждения

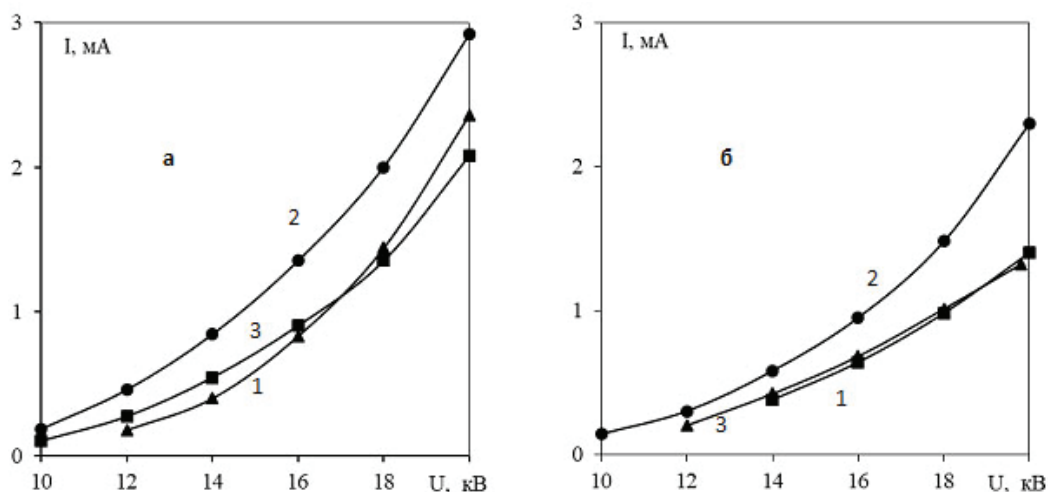


Рисунок 2.2 – Вольт-амперные характеристики коронных разрядов: а – в воздухе, б – в кислороде. 1, 2, 3 – импульсная, отрицательная и положительная короны

увеличении концентрации данных газов средний ток разряда уменьшается. Подобные зависимости наблюдаются в озонаторах на барьерном типе разряда [3].

2.1.3. Синтез озона. Установлено, что концентрация озона увеличивается с ростом напряжения в импульсном, отрицательном и положительном коронных разрядах (рисунок 2.3, а). Наибольшая концентрация озона получается в импульсной положительной короне, а отрицательная корона менее эффективна для синтеза озона. В положительной короне постоянного тока количество озона образуется почти в десять раз меньше, чем в импульсной короне. Максимальные концентрации озона ($\sim 3,8 \text{ г/м}^3$) получаются в импульсной короне при напряжениях разряда $\sim 20 \text{ кВ}$.

При работе озонатора на кислороде (рисунок 2.3, б), концентрация озона в 1,5–2 раза больше по сравнению с горением этих разрядов в воздухе при равных напряжениях. При напряжении 20 кВ наибольшая концентрация озона ($\sim 7,6 \text{ г/м}^3$) наблюдается в импульсной положительной короне. Для сравнения в положительной короне образуется до 6 г/м^3 , а в отрицательной короне $\sim 5 \text{ г/м}^3$. Использование кислорода для синтеза озона по сравнению с воздухом позволяет существенно от 2 до 20 раз увеличить эффективность работы плазмохимического реактора.

2.1.4. Удельные энергетические затраты. Сравнение результатов (рисунок 2.4, а) показывает, что при напряжении 20 кВ наименьшие энергетические затраты $\sim 20 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$, идущие на синтез озона в воздухе, наблюдаются для импульсной положительной короны. При тех же условиях в отрицательной короне энергетические затраты возрастают до $340 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$, а в положительной короне они составляют $930 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$. Отметим, что при промышленном синтезе озона приняты показатели на уровне $10\text{--}30 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$. Поэтому из приведенных результатов следует, что для производства озона из воздуха необходимо применять импульсный коронный разряд положительной полярности.

В отрицательном и положительном коронных разрядах синтез озона с использованием кислорода сокращает удельные энергетические затраты (рисунок 2.4, б). При напряжении 20 кВ в отрицательной короне энергетические затраты уменьшаются до $130 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$, а для положительной короны они снижаются в 12 раз. Для импульсной короны

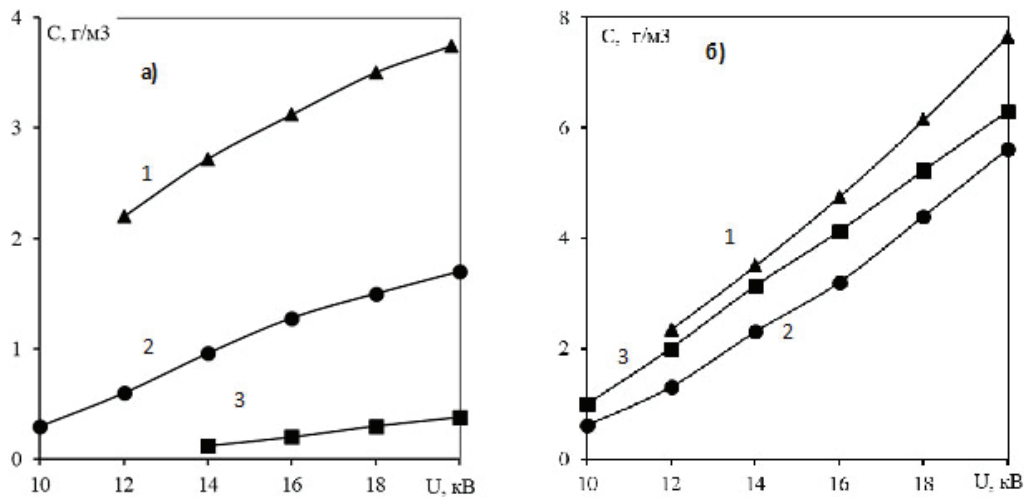


Рисунок 2.3 – Зависимости концентрации озона от напряжения для коронных разрядов: а – в воздухе, б – в кислороде. 1, 2, 3 – импульсная, отрицательная и положительная короны

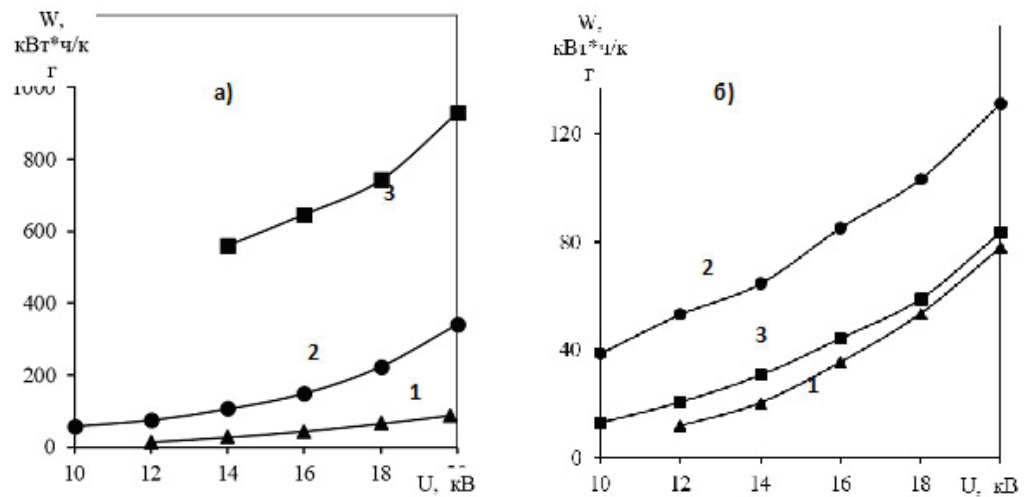


Рисунок 2.4 – Зависимость удельных энергетических затрат, идущих на синтез озона, от напряжения в коронных разрядах: а – в воздухе, б – в кислороде. 1, 2, 3 – импульсная, отрицательная и положительная короны

наблюдается увеличение в 3,5 раза энергетических затрат, идущих на синтез озона, по сравнению с воздухом. Из кислорода рентабельно получать озон в положительном и импульсном коронном разряде в интервале напряжений 10–16 кВ, при которых концентрация озона изменяется от 1 до 4 г/м³.

Анализ результатов показывает, что независимо от рода газа (воздух или кислород), более эффективно синтез озона происходит в импульсной положительной короне (рисунки 2.3, 2.4). Минимальная величина удельных энергетических затрат составляет 13 кВт*ч/кг при синтезе озона из воздуха.

Высокая экономичность синтеза озона по сравнению с другими разрядами, наблюдается в импульсной короне, где при равных напряжениях ток импульсной короны и выделяемая мощность в разряде оказываются наименьшими. Импульсная корона характеризуется стримерным характером режима горения [26]. Поэтому можно предположить,

что основная наработка активных частиц происходит как раз в стримерах и в прилегающих к ним областях [6–11]. В режиме частичного замыкания стримерами разрядного промежутка, не переходящего в искровой разряд, происходит увеличение, практически на порядок, наработки активных электронно-возбужденных частиц по сравнению с режимом горения обычного коронного разряда.

2.2. Коронный разряд с высокотемпературным коронирующим электродом

2.2.1. Экспериментальные характеристики коронного разряда. Было установлено влияние температуры коронирующего электрода на характеристики коронного разряда коаксиальной геометрии (см. рисунок 2.1). Для этого в конструкцию данного электрода (рисунок 2.5) были внесены некоторые изменения: внутренний электрод был составлен из двух медных цилиндров 1 радиусами $R_i = 0,35$ мм и платиновой коронирующей проволоочки 2 длиной $L_{in} = 40$ мм и радиусом $R_{in} = 0,15$ мм. На внешний электрод 3, представляющий собой отрезок цилиндрической алюминиевой трубы длиной $L_{ex} = 30$ мм, с внутренним радиусом $R_{ex} = 29$ мм и толщиной стенок $\Delta R_{ex} = 2$ мм, подается заданный потенциал U_c . При превышении напряжения на электродах выше порогового значения зажигаются положительный ($U_c < 0$) или отрицательный ($U_c > 0$) коронный разряд 4, характеризуемый электрическим током I_c . Уменьшение влияния конвекции газа на осевую симметрию короны достигается путем вертикальной ориентации разрядной ячейки.

В отличие от работы [24], был осуществляем контролируемый нагрев коронирующего платинового электрода (проволочки) 2, обеспечивающий неизменность электрического сопротивления путем фиксации отношения напряжения на его концах к электрическому току накала. Температура коронирующего электрода контролировалась электрическим током от сильноточного источника I . Изменение температуры компенсировалось увеличением тока накала. Стабилизация температуры производилась путем фиксации отношения ЭДС, возникающей на концах электрода к току накала.

Для измерения электрического сопротивления электрода использовали мост Уинстона на постоянном токе (рисунок 2.6), с включением в одно из плеч коронирующего электрода R2. Суммарное сопротивление моста R3 и R4 подбирали таким образом, чтобы оно было в 100 раз больше сопротивлений R2 и R1. Мост питается от источника питания (ИП) через сопротивление R5. Измерение тока накала производили амперметром (А). Поскольку $R3 + R4 = 100 \cdot (R1 + R2)$, то в плечах моста R3 и R4 протекает порядка 1 % полного электрического тока. Тогда уменьшение тока накала соответствует величине тока в цепи сопротивления R5. Коронный разряд подключается к высоковольтному источнику питания (ВИП).

Сопротивление R3 представляет собой магазин сопротивлений, необходимый для уравнивания плеч моста R3 и R4, регистрируемого гальванометром, с учетом изменения сопротивления R2 при нагреве коронирующего электрода. При подаче высокого напряжения на разрядную ячейку образуется поток плазмы, и происходит охлаждение электрода. Для повышения температуры необходимо увеличивать ток накала. Постоянство сопротивления электрода $R2 = L_{in} / (\sigma \pi R_{in}^2)$ достигается изменением электрического тока I накала до уравнивания сопротивлений моста (R1, R2) с одновременным замером напряжения U на концах платиновой проволоочки. Сохраняя постоянным сопротивление электрода, можно говорить о температуре коронирующего электрода в зоне

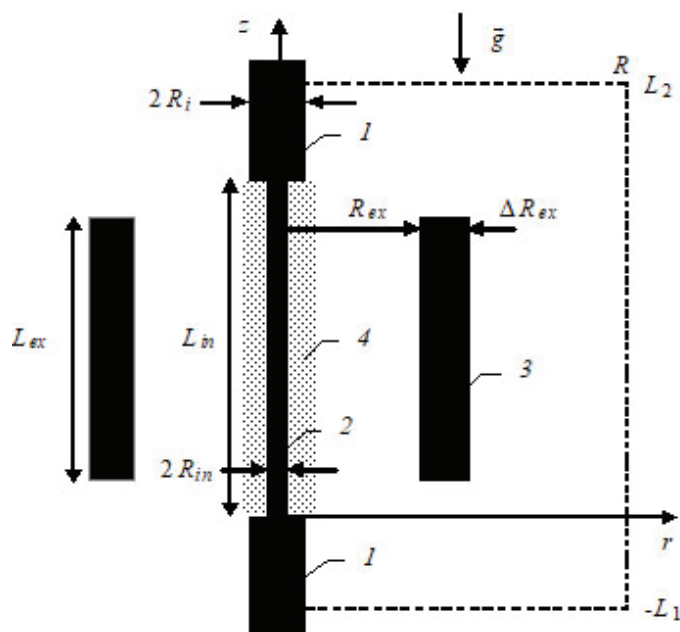


Рисунок 2.5 – Схема области коронного разряда в системе коаксиальных электродов: 1, 2 – внутренний электрод (1 – медь; 2 – платина); 3 – внешний электрод (цилиндрическая алюминиевая труба); 4 – корона; \vec{g} – ускорение свободного падения; r, z – цилиндрические координаты

коронного разряда, которая определяется из таблицы удельного сопротивления платины от температуры [25].

2.2.2. Результаты эксперимента. Были определены вольт-амперные характеристики коронного разряда в зависимости от температуры коронирующего электрода для отрицательной и положительной полярностей короны (рисунок 2.7, а, б). Уменьшение электрического тока для положительной короны объясняется различной подвижностью носителей заряда – положительных ионов, а в отрицательной короне – электронов и отрицательных ионов. Для положительного коронного разряда (рисунок 2.7, б) максимальное напряжение соответствует 14 кВ, а более высокие напряжения приводят к пробое разрядного промежутка. Для положительного и отрицательного коронных разрядов в воздухе напряжения зажигания отличаются незначительно [26], что соответствует результатам эксперимента: для положительной короны напряжение зажигания, по сравнению с отрицательной короной в среднем по всему диапазону температур коронирующего электрода, не выше 2,3 %.

Более позднее зажигание положительной короны объясняется особенностями разряда. Для инициирования горения в положительной короне необходимо чтобы ионизация атомов преобладала над процессами прилипания и присутствия электронов в межэлектродном промежутке. В то время как для отрицательной короны за счет различных эмиссионных процессов с коронирующего катода, наличие свободных электронов не критично.

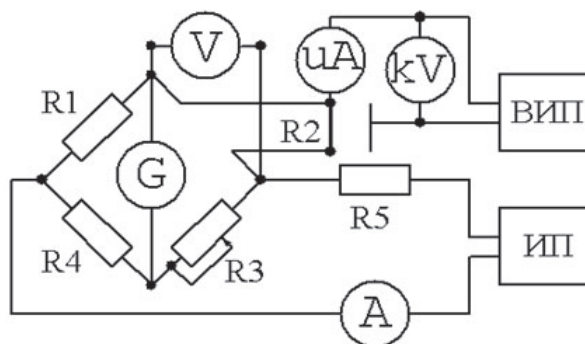


Рисунок 2.6 – Электрическая схема экспериментальной установки

Повышение температуры коронирующего электрода в зоне разряда приводит к заметному росту тока короны (рисунок 2.7). Это объясняется уменьшением плотности газа в области электродов коронного разряда, что связано с увеличением длины пробега и скорости электронов при данном напряжении короны. Следовательно, электроны приобретают энергию, приводящую к увеличению процессов ионизации за счет уменьшения прилипания и рекомбинации. При постоянном напряжении и нагреве коронирующего электрода в зоне ионизации от 300 до 663К, в отрицательной короне происходит увеличение тока в 1,5–3,2 раза, а в положительной – в 1,5–2,5 раза.

Для определения напряжения зажигания U_{κ} строится зависимость обратного сопротивления I_{κ}/U_{κ} , называемая редуцированной характеристикой короны, которая имеет практически линейный характер (рисунок 2.8), и точка пересечения с осью U_{κ} соответствует напряжению зажигания разряда [11]. При повышении температуры коронирующего электрода от $T_s = 300$ до 663К напряжение зажигания для отрицательной короны понижается с 8,3 до 5,1 кВ (рисунок 2.8, а), а для положительной – с 8,5 до 5,3 кВ (рисунок 2.8, б).

Напряжение зажигания коронного разряда определяется из эмпирической формулы Пика [26–29] и аналитического выражения для распределения напряженности электрического поля в разрядном узле коаксиальной геометрии [26]:

$$U_{\text{заж}} = 31n\delta \left(1 + 0,308 / \sqrt{\delta r}\right) \cdot r \ln(R/r), \quad (\text{а})$$

где n – постоянная, объединяющая шероховатость коронирующего провода и возможное смещение провода относительно центрального положения; δ – отношение плотности воздуха к нормальной плотности.

В случае принудительного нагрева зоны разряда используется выражение [28]:

$$\delta = (1 + 0,00367 \cdot t_n) b / (1 + 0,00367 \cdot t) b_n, \quad (\text{б})$$

здесь b – давление в миллиметрах ртутного столба; t – температура в °С; b_n и t_n – давление и температура, соответствующие нормальным условиям.

Формула Пика (а) учетом формулы (б) используется при расчете напряжения зажигания короны для различных температур коронирующего электрода. Для сравнения приведены экспериментальные данные для отрицательной и положительной полярностей коронных разрядов (рисунок 2.4). Опытные результаты и расчет совпадают с точностью до 5 %, что может служить основанием для внесения поправки в физическое содержание формулы Пика.

Экспериментальные значения напряжения зажигания и вольт-амперные характеристики (рисунки 2.9–2.11) согласуются с рассчитанными величинами по формуле Пика [30]:

$$E_p = 31n\delta \left(1 + 0,308 / \sqrt{\delta R_{in}}\right), \quad U_{cp} = E_p R_{in} \ln(R_{ex} / R_{in}). \quad (2.1)$$

При вычислении δ по табличным данным [30] показали, что температура воздуха вблизи коронирующего электрода соответствует температуре электрода T_s . Небольшие (до 5 %) различия напряжения зажигания положительной и отрицательной корон согласуются с данными работы [26] при рассмотрении горения коронного разряда в воздухе.

Экспериментальные значения ВАХ коронного разряда (рисунок 2.10) сравнивали с теоретическими расчетами, проведенными на основе уравнения непрерывности

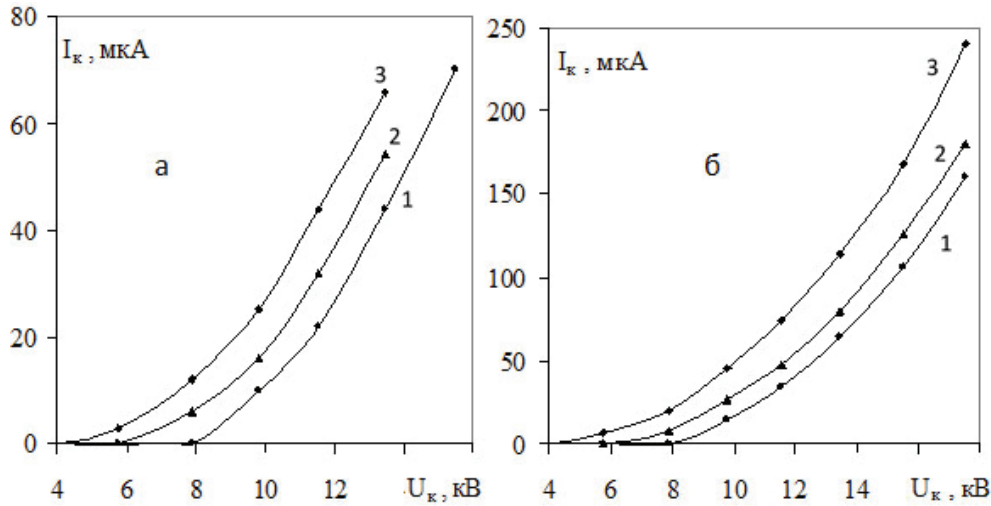


Рисунок 2.7 – Изменения вольт-амперных характеристик отрицательной (а) и положительной (б) полярностей коронного разряда в зависимости от температуры коронирующего электрода: 1 – 300; 2 – 430; 3 – 663 К

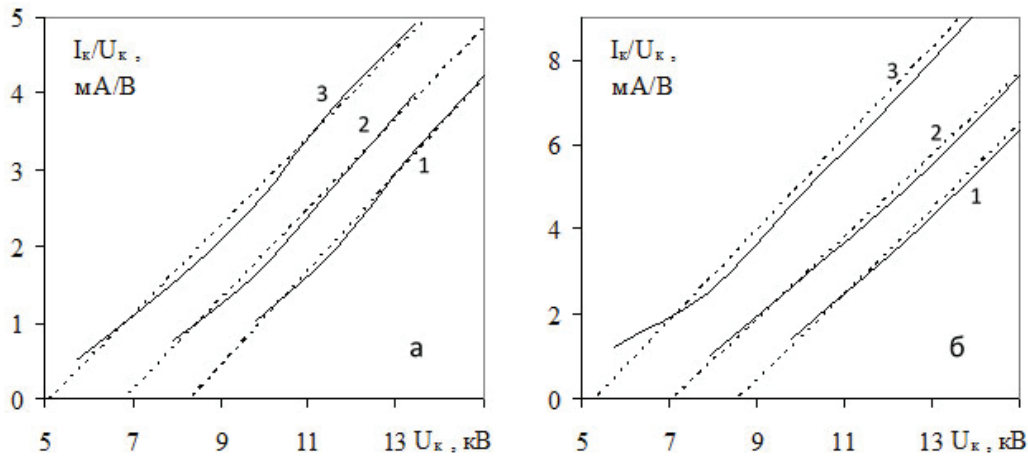


Рисунок 2.8 – Редуцированные характеристики коронного разряда отрицательной полярности (а) и положительной полярности (б) в зависимости от температуры нагрева коронирующего электрода: 1 – 300; 2 – 430; 3 – 663 К

электрического тока, уравнения Пуассона, закона Ома и с данными полученными по формуле Майра [30]:

$$\frac{U_c - U_{cp} \sqrt{1-\alpha}}{U_{cp}} \ln \beta = \sqrt{1-\alpha + \alpha\beta^2} - 1 - \sqrt{1-\alpha} \ln \frac{\sqrt{1-\alpha} + \sqrt{1-\alpha + \alpha\beta^2}}{\sqrt{1-\alpha} + 1},$$

здесь $\alpha = i_c / (2\pi\epsilon_0\mu E_p^2)$; $\beta = R_{ex} / R_{in}$; $i_c = I_c / L_{in}$ – сила электрического тока на единицу длины коронирующего электрода, μ – подвижность ионов; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная. При выполнении характерного для коронного разряда неравенства $\alpha \ll 1$ из формулы Майра следует:

$$\frac{U_c - U_{cp}}{U_{cp}} \ln \beta = f(y), \quad f(y) = \sqrt{1+y} - 1 - \ln 0.5(1 + \sqrt{1+y}), \quad y = \alpha\beta^2.$$

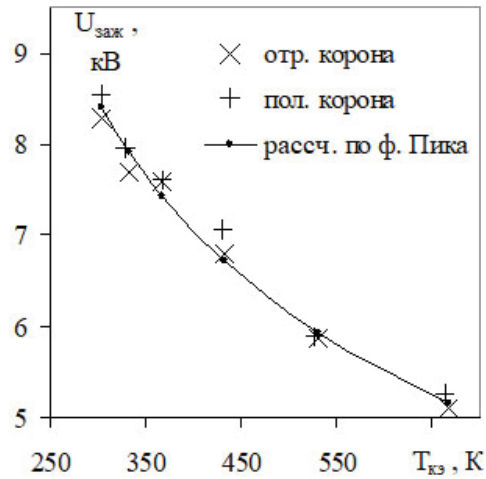


Рисунок 2.9 – Зависимость напряжения зажигания от температуры коронирующего электрода: расчет по формуле Пика, эксперимент: (x) – отрицательный, (+) – положительный коронные разряды

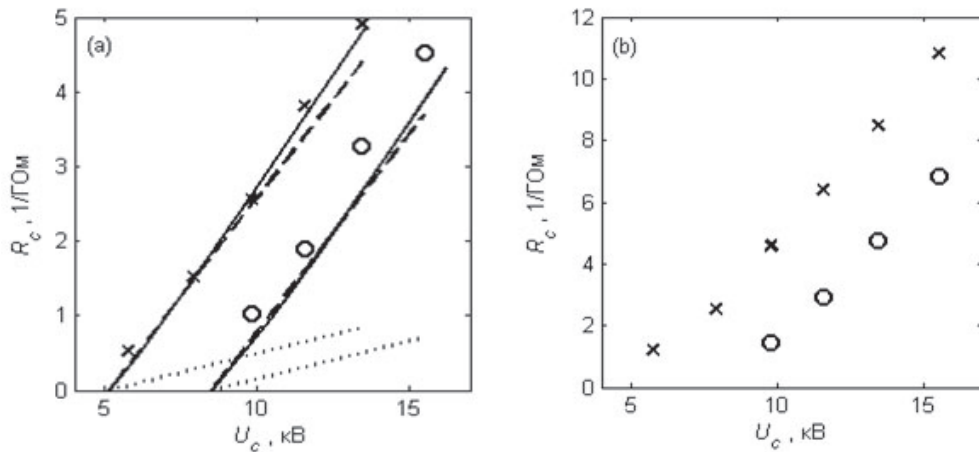


Рисунок 2.10 – ВАХ положительной (а) и отрицательной (б) короны: эксперимент $T_s = 300$ (o), 680 (x) К; расчет: сплошные кривые – формула Майра; точечные – формула Таунсенда (2); пунктирные – модифицированная формула Таунсенда (3)

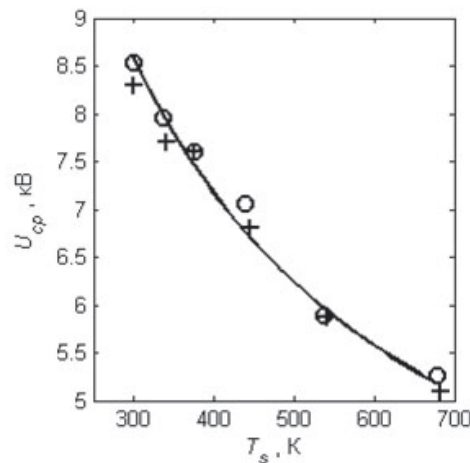


Рисунок 2.11 – Экспериментальные значения напряжения зажигания от температуры коронирующего электрода: положительная (+) и отрицательная (o) короны; сплошная кривая – расчет по формуле Пика (2.1)

Полагая, что $f(y) = yU_{cp} / (AU)$, получаем следующую закономерность:

$$i_c = \frac{2\pi\epsilon_0\mu A}{R_{ex}^2 \ln(R_{ex} / R_{in})} U_c (U_c - U_{cp}), \text{ где } A = \frac{y}{f(y)(1 + f(y) / \ln \beta)}.$$

Для определения ВАХ одномерного коронного разряда (рисунок 2.10) использовали формулу Таунсенда [26, 30]:

$$i_c = \frac{4\pi\epsilon_0\mu}{R_{ex}^2 \ln(R_{ex} / R_{in})} U_c (U_c - U_{cp}), \quad (2.2)$$

где подвижность положительных ионов полагается равной $\mu = 2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ [26]. Из выражения (2.2) следует, что $A = 2$. При замене A его предельным значением

$$\lim_{y \rightarrow \infty} A = \ln \beta$$

в случае $a\beta^2 \gg 1$, получаем модифицированную формулу Таунсенда:

$$i_c = \frac{2\pi\epsilon_0\mu}{R_{ex}^2} U_c (U_c - U_{cp}). \quad (2.3)$$

Расчет ВАХ по формуле (2.3) проводился с теми же табличными значениями подвижности ионов, что и в выражении (2.2). В диапазоне применимости формулы Пика $R_{in} \sim (0,01-1) \text{ см}$, $\beta = 100$ отклонения данных (3) от формулы Майра составляют менее 15 % (рисунок 2.10). Теоретические расчеты ВАХ согласуются с опытными данными для положительной короны при значении подвижности ионов $\mu = 2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, а для отрицательной короны – они отличаются между собой.

Повышение T_s способствует снижению порогового значения напряженности электрического поля, а при фиксированном напряжении это приводит к увеличению электрического тока короны. Уменьшение напряжения зажигания и рост $\langle\langle \text{Eqn0053.eps} \rangle\rangle$ связаны с нагревом газа в приэлектродной области за счет его теплообмена с высокотемпературным коронирующим электродом.

2.2.3. Математическая модель коронного разряда. Для описания физических процессов, протекающих в коронном разряде, была разработана математическая модель коронного разряда, и проведен численный анализ характеристик короны, горящей в газоразрядной системе вертикальных коаксиальных электродов (рисунок 2.5).

Рассматривается равновесная газодинамическая модель коронного разряда [31], в которой пренебрегают краевыми эффектами и размерами внутренней области короны по сравнению с межэлектродным промежутком. Предполагается, что корона представляет собой поток ионов с цилиндрической поверхности платиновой проволоочки при пороговой напряженности электрического поля по Пику (2.1). Процессы переноса тепла в окружающую среду осуществляются за счет теплопроводности и конвекции, а перенос массы инициирован действием архимедовой f_a и электрической (кулоновской) f_e силы. В медных электродах перенос энергии осуществляется теплопроводностью. В платиновой проволоочке 2 коронирующего электрода (рисунок 2.5) учитывается выделение «джоулевого тепла», которое отводится аксиально теплопроводностью в медные участки внутреннего электрода, и радиально в окружающую воздушную среду, а также радиационным потоком «серого излучения». Все процессы тепло- и массопереноса установившиеся, стационарные, а течение газа – ламинарное.

Основные уравнения. Система уравнений непрерывности, движения и энергии [31–33] записана в цилиндрической системе координат (рисунок 2.5) с учетом вращательной симметрии в следующем виде:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho v r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u) = 0, \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(v \frac{\partial v}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial z} \right) = & -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \eta \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{2\eta v}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\eta \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] - \\ & - \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{2}{3} \eta \left(\frac{1}{r} \frac{\partial r v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + f_e, \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial z} \right) = & -\frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \eta \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] - \\ & - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{2}{3} \eta \left(\frac{1}{r} \frac{\partial r v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + f_a, \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\rho C_p \left(v \frac{\partial T}{\partial r} + u \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_J, \quad (2.7)$$

где $Q_J = \left(\frac{I}{\pi R_m^2} \right)^2 \frac{1}{\sigma}$, $f_e = i_c / (2\pi r \mu)$, $f_a = (\rho_0 - \rho)g$.

Обозначения: v , u – радиальная и аксиальная компоненты скорости; p – перепад давления относительно атмосферного; T – температура; Q_J – объемная плотность энергии «джоулево тепло», выделяющейся в платиновой проволочке; σ ; ρ , η , λ , C_p – электропроводность, плотность, вязкость, теплопроводность, теплоемкость являются функциями температуры при постоянном давлении; ρ_0 – плотность невозмущенной газовой среды при температуре T_0 ; g – ускорение свободного падения.

Граничные условия ставятся на прямоугольном контуре $[0 \leq r \leq R, -L_1 \leq z \leq L_2]$, ограничивающем расчетную область (рисунок 2.5): на оси предполагается симметрия, на остальных границах – “мягкое” нормальное изменение температуры и втекание или вытекание газа:

$$\begin{aligned} L < z < L_2, \quad r = 0 & : \quad \partial T / \partial r = 0; & \quad \partial u / \partial r = 0, \\ & & \quad v = 0; \\ -L_1 < z < L_2, \quad r = R & : \quad \partial^2 T / \partial r^2 = 0 \ (v \geq 0), \quad p = 0, \quad u = 0, \quad \partial \rho v / \partial z = 0; \\ & \quad T = T_0 \ (v < 0), \\ z = -L_1, \quad 0 < r < R & : \quad \partial^2 T / \partial z^2 = 0 \ (u \leq 0), \quad p = 0, \quad \partial \rho u / \partial z = 0, \quad v = 0. \\ & \quad T = T_0 \ (u > 0), \\ z = L_2, \quad 0 < r < R & : \quad \partial^2 T / \partial z^2 = 0 \ (u \geq 0), \quad p = 0, \quad \partial \rho u / \partial z = 0, \quad v = 0. \\ & \quad T = T_0 \ (u < 0), \end{aligned}$$

В областях, занятых твердым телом $u = 0, v = 0$, температурное поле рассчитывалось из уравнения энергии по заданным коэффициентам (σ, λ, C_p) , а на ограничивающих их поверхностях – ставились условия непрерывности температуры, потоков тепла, а для скорости течения – прилипание.

Метод решения. Дискретизацию уравнений (2.4)–(2.7) производили методом контрольного объема на прямоугольной неравномерной сетке. Для компонент скорости течения были введены смещенные сетки, а поле давления рассчитывалось методом коррекции SIMPLER [34]. Применялась аппроксимация суммарной плотности конвективного и кондуктивного потоков тепла через грани контрольных объемов экспоненциальной схемой с сеточным числом Пекле. Численный расчет основан на использовании метода сквозного счета, при котором самосопряженность задач в твердом теле и газе на границах их раздела достигается применением гармонических усредненных коэффициентов переноса [34]. Дискретные аналоги уравнений (2.4)–(2.7) и граничных условий решались итерационным методом.

Контроль счета осуществляли проверкой интегральных балансов потоков массы и энергии через рассматриваемую область пространства, ограниченную цилиндрической поверхностью. Выделяемая мощность электрического тока в платиновой проволочке отводилась кондуктивными потоками тепла через боковую поверхность, торцы электрода и потоком «серого излучения» с боковой поверхности:

$$P_J = P_f + P_s + P_r ;$$

$$P_J = 2\pi \int_0^{R_m} \int_0^{L_m} Q_J r dr dz ; P_f = -P_0 + P_{L_m} ; P_0; L_m = 2\pi \int_0^{R_m} (-\lambda \partial T / \partial z)_{z=0; L_m} r dr ;$$

$$P_s = 2\pi R_{in} \int_0^{L_m} (-\lambda \partial T / \partial r)_{r=R_m} dz ; P_r = 2\pi R_{in} \int_0^{L_m} (\varepsilon \sigma_B T^4)_{r=R_m} dz .$$

Обозначения: P_J – мощность электрического тока, выделяемая в платиновой проволочке; P_f – суммарный поток тепла через ее основания $P_0; L_m$ и боковую цилиндрическую поверхность P_s ; P_r – поток «серого излучения» с боковой поверхности; ε – интегральная степень черноты; σ_B – постоянная Стефана–Больцмана.

2.2.4. Результаты расчета. Проведен численный анализ характеристик тепло- и массопереноса в газоразрядной системе коаксиальных электродов (рисунок 2.5) при следующих параметрах и размерах расчетной области: $T_0 = 300\text{K}$; $I = 1 \div 5 \text{ A}$; $I_c = 0 \div 70 \text{ мкА}$; $L_1 = 30 \text{ мм}$; $L_2 = 70 \text{ мм}$; $R = 40 \text{ мм}$. Табличные зависимости термодинамических и переносных свойств $(\sigma, \rho, \eta, \lambda, C_p)$ воздуха и кислорода от температуры при атмосферном давлении использовались из тех же источников (таблицы 2.1, 2.2), что и в работах [35–37]; свойства твердых веществ были взяты из [37]; интегральная степень черноты «серого излучения» платины вычислялась по формуле Ашкинасса: $\varepsilon(T) = 0,374 T / \sqrt{\sigma_0}$, где σ_0 – электропроводность платины при 273К.

Таблица 2.1 – Теплофизические и переносные свойства воздуха

T, К	ρ, кг/м³	η, г/м·с	Ψ, кВт/см³	h, кДж/кг	λ, Вт/м·К	c_p, Дж/кг·К	σ, 1/Ом·м
300	1,16000	0,0185	0	300	0,026	1010	0
500	0,87400	0,0270	0	520	0,041	1080	0
1000	0,35300	0,0424	0	1040	0,060	1140	0
2000	0,17650	0,0689	0	2280	0,137	1340	0
2500	0,14070	0,0818	0	30104	0,222	1676	0
3000	0,11500	0,0955	0	4070	0,38	2720	0,002
3300	0,10150	0,1044	0	4580	0,55	3450	0,005
3500	0,09331	0,1107	0	5800	0,60	3980	0,01
3700	0,08390	0,1169	0	6400	0,65	3520	0,20
4000	0,07672	0,1259	0	6670	0,58	3184	2,02
4200	0,07070	0,1316	0	7570	0,52	2644	2,1
4500	0,06605	0,1396	0	9010	0,49	2346	5,0
4700	0,06181	0,1448	0	9564	0,51	2500	10,0
5000	0,05828	0,1524	0	10250	0,66	2807	21,0
5500	0,05148	0,1715	0	12310	1,10	4487	47,0
6000	0,04476	0,1852	0	14900	2,25	7483	80
6500	0,03721	0,1997	0	19500	3,00	10320	100
6800	0,03210	0,2073	0,001	23950	3,45	12540	150
7000	0,03131	0,2112	0,004	26080	3,57	13650	200
7200	0,03020	0,2138	0,006	27551	3,55	13510	400
7500	0,02850	0,2231	0,008	31543	3,00	11380	650
8000	0,02330	0,2326	0,015	37285	2,29	7705	1 000
8500	0,02050	0,2433	0,020	39480	1,50	5640	1300
8800	0,01985	0,2498	0,032	40871	1,25	4430	1500
9000	0,01965	0,2546	0,043	42480	1,20	4050	1610
9300	0,01852	0,2592	0,051	43542	1,23	4120	1850
9500	0,01805	0,2625	0,080	44522	1,24	4210	2000
10 000	0,01721	0,2685	0,143	46 500	1,31	4690	2500
10 500	0,01602	0,2695	0,247	48740	1,45	5970	3 000
11000	0,01495	0,2662	0,365	51780	1,63	7130	3 500
И 500	0,01393	0,2505	0,511	55830	1,80	9020	3 750
12 000	0,01273	0,2303	0,748-	61780	1,96	11300	4 000
13 000	0,01072	0,1710	1,232	75130	2,49	16100	4 750
13 500	0,00965	0,1458	1,464	84540	2,55	18160	5150
14 000	0,00884	0,1177	1,742	95410	2,61.	20400	5 600
14 200	0,00845	0,1102	1,811	98480	2,62	20300	5 730
14 500	0,00803	0,0995	1,890	105600	2,63	19210	5 950
15 000	0,00738	0,0879	2,002	116780	2,63	19210	6 250
16 000	0,00629	0,0491	2,533	136900	2,50	17240	7 000
17 000	0,00558	0,0333	3,125	149540	2,38	13340	7 850
18 000	0,00506	0,0249	3,809	162800	2,31	9250	8 500
19 000	0,00472	0,0207	4,545	168650	2,39	6530	9 200
19 500	0,00454	0,0200	5,172	171450	2,45	5640	9 500
20 000	0,00441	0,0190	6,169	176200	2,52	4940	9 800

Таблица 2.2 – Теплофизические и переносные свойства кислорода

T, К	ρ, кг/м³	η, г/м·с	ψ, кВт/см³	h, кДж/кг	λ, Вт/м·К	c_p, Дж/кг·К	σ, 1/Ом·м
300	1,2836	0,0207	0	138	0,027	921	0
500	0,7698	0,0303	0	327	0,041	972	0
1000	0,3847	0,0477	0	854	0,071	1134	0
2000	0,1923	0,0735	0	2 219	0,212	1596	0
2500	0,1528	0,0847	0	3101	0,423	1932	0
3000	0,1215	0,0986	0	4 741	1,845	4624	0
3200	0,1086	0,1053	0	5 846	2,255	6437	0
3500	0,0900	0,1174	0	8 544	2,732	10548	0,01
3800	0,0701	0,1288	0	12 325	1,826	13650	0.1
4000	0,06024	0,1346	0	15 034	1,421	13440	2
4200	0,05280	0,1386	0	17 552	1,032	11740	5
4500	0,04655	0,1429	0	20 427	0,851	7434	10
4700	0,04261	0,1471	0	21 754	0,654	5842	20
5000	0,03925	0,1526	0	23166	0,523	3572	50
5500	0,03565	0,1638	0	24 542	0,430	1932	90
6000	0,03215	0,1744	0,001	25 435	0,412	1638	140
6500	0,02952	0,1914	0,001	26 249	0,422	1617	310
7000	0,02778	0,2014	0,005	27 057	0,432	1618	520
7500	0,02634	0,2178	0,008	27 889	0,532	1710	780
8000	0,02476	0,2251	0,010	28 806	0,594	1932	1180
8500	0,02278	0,2338	0,020	29 814	0,689	2107	1450
9000	0,02129	0,2405	0,029	30 941	0,824	2419	2120
9500	0,01957	0,2412	0,038	32 259	0,964	2854	2250
10000	0,01884	0,2403	0,105	33 821	1,154	3394	2760
11000	0,01655	0,2278	0,305	38101	1,424	5166	3670
12000	0,01433	0,2032	0,676	44 896	1,754	8423	4050
13000	0,01268	0,1534	1,257	55 093	2,221	11972	4840
14000	0,01100	0,1142	2,045	68 996	2,783	15834	5400
14500	0,01004	0,0947	2,442	77 313	2,851	17432	5530
15000	0,00979	0,0805	2,513	86 273	2,834	18396	6090
15500	0,00914	0,0645	2,784	95 552	2,801	18734	6490
16000	0,00761	0,0534	3,147	104 763	2,732	18102	7070
17000	0,00640	0,0362	3,751	121 412	2,472	15204	7430
18000	0,00562	0,0244	4,424	134 671	2,382	11298	8080
18500	0,00543	0,0204	4,702	139 921	2,380	9721	8240
19000	0,00523	0,0177	4,977	144 461	2,383	8442	8540
19500	0,00514	0,0164	5,245	148 372	2,392	7194	8820
20000	0,00505	0,0153	5,846	151 762	2,405	6348	9070

1. Корона с изотермическим коронирующим электродом. Как показали результаты расчета (рисунки 2.12–2.13), при отсутствии нагрева платиновой проволоочки ($I = 0$) в коронном разряде наблюдается изотермическое течение ($T = T_0$) проводящего газа (электрический ветер), обусловленное действием электрических сил. Благодаря потоку заряженных частиц с поверхности коронирующего электрода формируется вихревая газодинамическая картина течения. При отсутствии аксиального продува газа относительно сечения $z = L_{in} / 2$ реализуются симметричные потоки (рисунок 2.12), состоящие из четырех тороидальных вихрей с замкнутыми линиями тока газа:

$$G(r, z) = 2\pi \int_0^r \rho u r dr = \text{const}.$$

Давление в окрестности коронирующего электрода ниже атмосферного (рисунки 2.12–2.13), и наблюдается аксиальный симметричный подсос газа с двух концов коронирующего электрода к среднему сечению: $z = L_{in} / 2$ (рисунок 2.12). Вблизи данного сечения происходит столкновение встречных кольцевых потоков газа с образованием двух «маленьких» тороидальных вихрей. От поверхности коронирующего электрода (рисунок 2.12) формируется радиальный поток, который сталкивается с внешним электродом, растекаяется по его внутренней поверхности, вовлекая в движение газ внеэлектродного промежутка и образуя «большие» тороидальные вихри.

Отметим, что для предварительных оценок перепада давления и скорости потока газа между поверхностями внешнего и внутреннего электродов в сечении $z = L_{in} / 2$ можно воспользоваться следующими интегральными выражениями [31], которые получены из уравнений (2.4)–(2.6) без учета вязкости:

$$\frac{\rho v^2}{2} + p - \frac{i_c}{2\pi\mu} \ln r = \text{const}, \quad p_{ex} - p_{in} = \frac{i_c}{2\pi\mu} \ln R_{ex} / R_{in}.$$

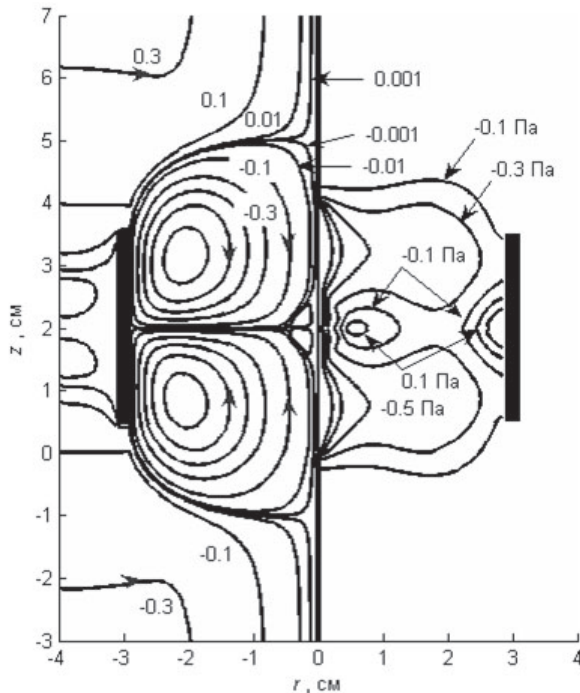


Рисунок 2.12 – Линии тока газа $G(r, z) / G_{max}$ ($G_{max} = 0.8$ г/с, шаг 0.2) и изобары перепада давления $p(r, z)$ (шаг 0.2 Па) во внешней зоне коронного разряда: $I_c = 22$ мкА

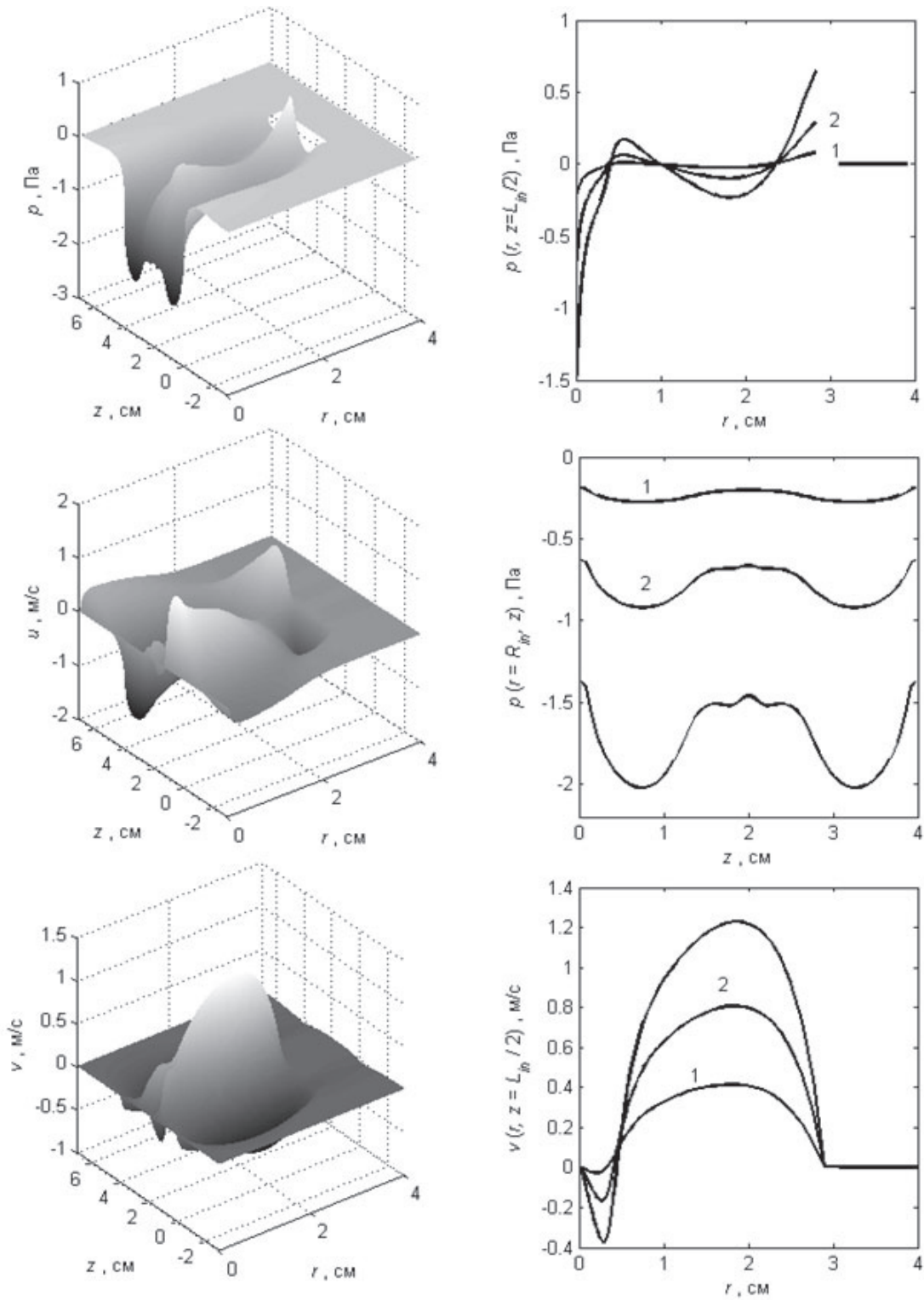


Рисунок 2.13 – Распределение газодинамических характеристик коронного разряда: $I_c = 22$ мкА, $I_c = 3$ (1) и 10 (2) мкА

Как показали оценки, при сравнении с численными результатами расчета отличия в значениях скоростей потока и перепада давления не превышали 10 %.

При численных расчетах характеристик коронного разряда в зависимости от силы электрического тока, качественная картина течения газа и пространственные распределения температуры и давления остаются практически подобными (рисунок 2.13), вплоть до значений тока короны $I_c = 26$ мкА. При значениях электрического тока $I_c > 26$ мкА, итерационная процедура численного решения не сходится, и наблюдается неустойчивость счета вблизи сечения $z = L_{in} / 2$ внутреннего электрода. Визуально эта неустойчивость проявляется в виде «нестационарных» периодических образований: исчезновения и появления двух «маленьких» тороидальных вихрей.

2. Характеристики течения в отсутствии короны. Как показали результаты расчета (рисунок 2.14, а), при отсутствии электрического тока короны, при $U_c < U_{cp}$ картина течения газа в озонаторе с нагретой платиновой проволокой формируется под действием силы Архимеда. Наблюдается восходящий нагретый поток газа, вытягивающий изотермы вверх по течению. Нагрев газа, движущегося вдоль проволоки, в результате теплопроводности приводит к асимметрии распределения температуры из-за большего теплоотвода более холодным газом вблизи нижнего основания озонатора (рисунок 2.15).

3. Корона с высокотемпературным коронирующим электродом. Нагрев платиновой проволоки в озонаторе инициирует кондуктивный теплоперенос и конвективное течение газа. В короне картина течения определяется совместными действиями электрического ветра и естественной конвекции (рисунок 2.14, б). Видно, что уже при $I_c = 3$ мкА превалируют электрические силы, а естественная конвекция приводит к прокачке газа от нижнего сечения вдоль коронирующего электрода.

Радиальный поток газа движется из межэлектродного промежутка к внешнему электроду вдоль границы верхнего «большого» тороидального вихря. В отличие от картины течения (рисунок 2.12), окружающий газ всасывается в область коронирующего электрода короны через нижнее основание озонатора (рисунок 2.15, пунктир). Данный поток «холодного» газа охлаждает нижнюю часть коронирующего электрода, при движении от поверхности электрода нагревается и вовлекается в радиальном направлении электрическим ветром и тороидальными вихрями к внешнему коаксиальному электроду. Далее нагретый газ натекает на поверхность внешнего цилиндрического электрода, нагревает её и вытекает из озонатора через верхнее основание, смещаясь тороидальным вихрем в направлении к оси.

С увеличением электрического тока в коронирующем электроде I_c интенсивность тороидальных вихрей и радиального потока газа растет из-за усиления влияния электрического ветра. Это приводит к увеличению расхода «холодного» газа, протекающего через область короны в аксиальном направлении. При этом осевая температура (рисунок 2.15) и линии тока газа (рисунок 2.14, б) стремятся к симметричным распределениям относительно среднего сечения платиновой проволоки.

При горении коронного разряда для токов $I_c < 10$ мкА (рисунок 2.16), изменение «джоулева тепла» $P_j = IU$, в зависимости от протекания электрического тока, быстро возрастает. При токах $I_c > 10$ мкА скорость роста $P_j(I)$ замедляется и это связано с усилением теплообмена электрод – воздух [32, 17]. По-видимому, здесь большую роль играет электрический ветер, который охлаждает коронирующий электрод, дополняет действие

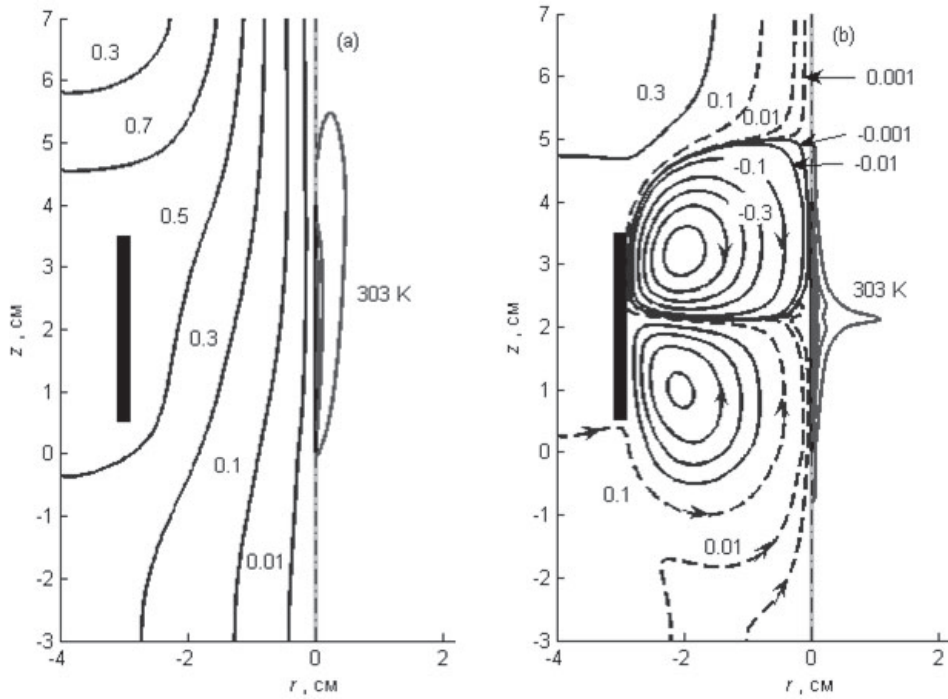


Рисунок 2.14 – Поля линий тока газа ($G(r, z) / G_{max}$, шаг 0.2) и изотерм (от 303 К, шаг 10 К): (a) – $I_c = 0$, $G_{max} = 1,04$ А, $G_{max} = 0,05$ г/с; (b) – $I_c = 3$ мкА, $I = 1,41$ А, $G_{max} = 0,27$ г/с

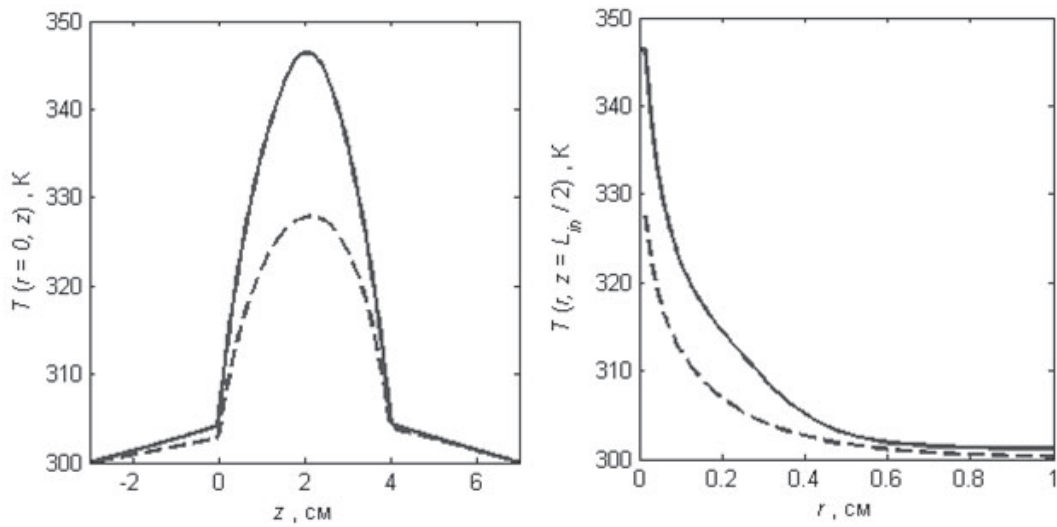


Рисунок 2.15 – Осевое и радиальное в сечении $z = L_m / 2$ распределения температуры: $I_c = 0$, $I = 1,04$ А (пунктирные линии); $I_c = 3$ мкА, $I = 1,41$ А (сплошные)

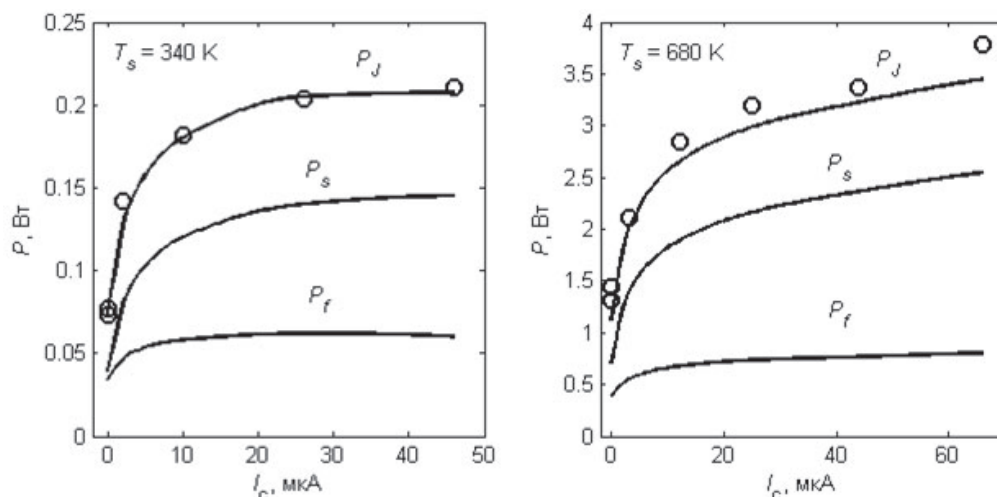


Рисунок 2.16 – «Джоулево тепло» и кондуктивные потоки тепла через боковую поверхность и торцы коронирующего электрода ($T_s = 340, 680\text{K}$): $\circ\circ\circ$ – эксперимент, сплошные линии – расчет

естественной конвекции, а затем и превалирует над ней. Например, для $I_c = 10$ мкА относительный коэффициент теплоотдачи (отношение мощностей $P(I_c)/P(0)$) возрастает в два раза по сравнению с $I_c = 0$.

В процессе расчета установлено, что интегральные характеристики и теплообмен платиновой проволоочки после достижения определенного числа итераций, практически не зависят от дальнейшей сходимости численного решения. Из баланса энергии (рисунок 2.16) видно, что теплосъем с боковой поверхности коронирующего электрода в несколько раз больше потока тепла через его торцы, а потери энергии на «серое излучение» – несущественны. Независимо от тока короны рассчитанные значения напряжения U на концах платиновой проволоочки и средняя температура коронирующего электрода, восстановленная по формуле $1/\sigma(T_s) = \pi R_{in}^2 I / (U L_{in})$, согласуются с экспериментом. Суммарная отводимая тепловая мощность от коронирующего электрода практически равна мощности «джоулева тепла».

2.3. Импульсный периодический коронный факельный разряд

Увеличение мощности коронного разряда сопровождается его переходом в объемную форму или факельный разряд, получение которого подобно описано в работах [38–40]. По аналогии с факельным свечением в высокочастотном контуре разряда, аномальную разновидность положительной короны, часто называют «факельным разрядом». Факельный разряд распространяется от коронирующего электрода до противоположного электрода, а диффузное свечение плазмы заполняет весь разрядный промежуток (рисунок 2.17).

Аномальный коронный факельный разряд положительной полярности реализуется при импульсном периодическом питании. При этом увеличивается энергетический вклад в разрядный промежуток, разряд приобретает объемную форму, а напряжение питания уменьшается на порядок [41–44]. Разряд существует при высоких напряжениях на разрядном контуре и электрический ток почти в 50 раз больше тока обычного коронного разряда при одинаковых условиях проведения эксперимента [38, 39].

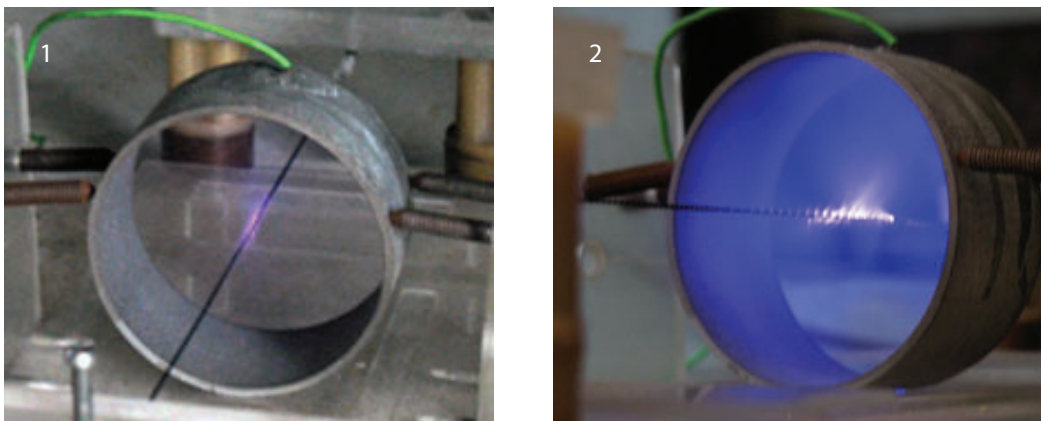


Рисунок 2.17 – Классический коронный разряд положительной полярности (1), коронный факельный разряд (2)

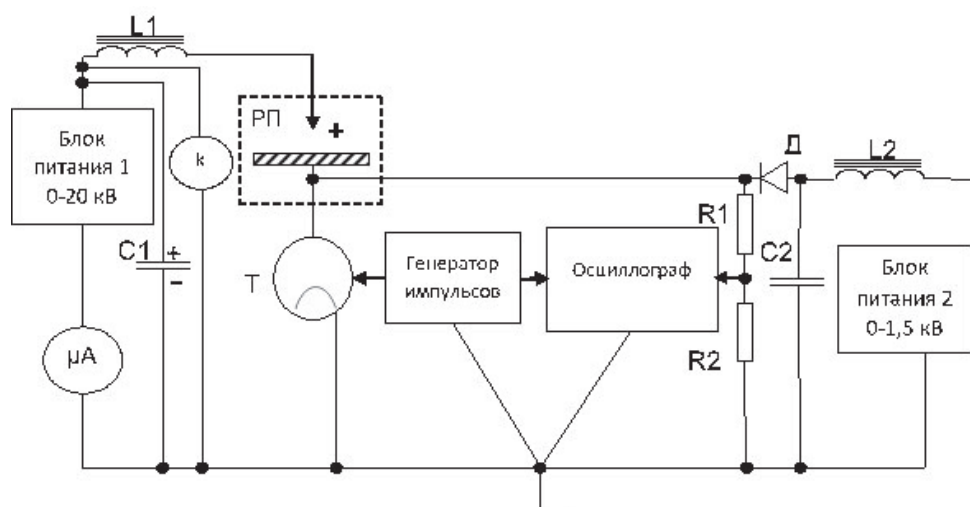


Рисунок 2.18 – Схема экспериментальной установки: Т – тиратрон ТГИ1-500/16; РП – разрядный промежуток; L1, C1, L2, C2 – LC-фильтры; Д – диод; R1, R2 – делитель напряжения; kV – киловольтметр; μ A – микроамперметр

Установлено, что характер горения импульсного периодического коронного факельного разряда положительной полярности включает в механизм формирования разряда следующие физические явления:

- 1) автоэлектронную эмиссию с поверхности катода;
- 2) ускорение электронов в катодной области;
- 3) генерацию ультрафиолетового и рентгеновского излучения в объеме разряда и на поверхности анода;
- 4) фотоионизацию газа во внешней области коронного разряда;
- 5) многоэлектронный пробой разрядного промежутка.

2.3.1. Схема экспериментального стенда для получения импульсного периодического коронного факельного разряда представлена на рисунке 2.18. В качестве коронирующего электрода использовалась нихромовая проволока диаметром 0,15 мм, длиной 8,2 см. Катодом являлся дюралевый цилиндр диаметром 58 мм, который охлаждался проточной водой для поддержания постоянной температуры. Зона разряда представляет

собой герметичный сосуд, через который прокачивается воздух или кислород с регулируемым расходом.

Электрическая схема работает следующим образом: от блока питания 1 через L1C1-фильтр высокое напряжение, регулируемое от 0 до 20 кВ, подается на разрядный промежуток (РП). Катод через тиратрон оторван от заземленного электрода, и при включении высокого напряжения от блока питания 1 в разрядном контуре загорается классический коронный разряд положительной полярности.

При его горении положительные ионы движутся к катоду и у его поверхности частично нейтрализуют электроны и образуют область положительного заряда. При этом потенциал области у катода становится положительным «положительный катод» относительно заземленного электрода. После зажигания классического коронного разряда относительно заземленного электрода, катод становится как бы аналогом анода, а коронирующий электрод остается фактическим анодом, но под более высоким потенциалом. Поэтому «положительный катод», чтобы не было путаницы, условно назовем «полевым катодом» относительно коронирующего провода. Полевой катод связан только электрическим полем с заземляющим электродом, а непосредственный электрический контакт отсутствует.

Классический коронный разряд горит до тех пор, пока на полевым катодом не накопится такой электрический заряд, что напряженность поля между коронирующим проводом и полевым катодом не станет ниже напряжения зажигания коронного разряда. В этом случае коронный разряд прекращает гореть. Однако если тиратрон периодически включать, то за время пролета электрона через тиратрон, заряд с полевого катода уходит на заземленный электрод. Тогда напряженность электрического поля между коронирующим электродом (анодом) и полевым катодом скачком возрастает, и вновь зажигается классический коронный разряд. Отметим, что время пролета электрона через тиратрон уменьшается с увеличением напряжения на полевым катодом.

С помощью дополнительного блока питания 2 через L2C2-фильтр напряжение на полевым катодом можно плавно увеличивать от 0 до 1,5 кВ. Диод Д служит для предохранения блока питания 2 от импульсов высокого напряжения, поступающих от блока питания 1. Сила тока от блока питания 2 гораздо больше, чем от высоковольтного блока питания 1. Поэтому период зарядки полевого катода до желаемого напряжения оказывается меньше, а частота зажигания коронного разряда и средняя мощность горения разряда получаются больше, чем без использования блока питания 2.

Генератор позволяет плавно изменять частоту импульсов электрического тока через тиратрон в интервале от 0 до 20 кГц. Через делитель напряжения R1R2 сигнал подается на осциллограф, что позволяет регистрировать зарядку тиратрона и промежутки времени между импульсами электрического тока. Сила тока и напряжение на разрядном промежутке регистрируются микроамперметром и киловольтметром.

2.3.2. Вольт-амперные характеристики импульсного периодического коронного факельного разряда (сокращенно ИКР), горящего на воздухе при атмосферном давлении, представлены на рисунке 2.19. Видно, что ВАХ при изменении эффективного напряжения на коронирующем электроде качественно ведут себя подобным образом, а изменяются только масштабы минимального и максимального значений силы электрического тока (рисунок 2.19).

При возрастании напряжения на полевым катодом общим для вариантов (а), (б), (с) является то, что сила тока в разряде вначале незначительно уменьшается. Это объясняется

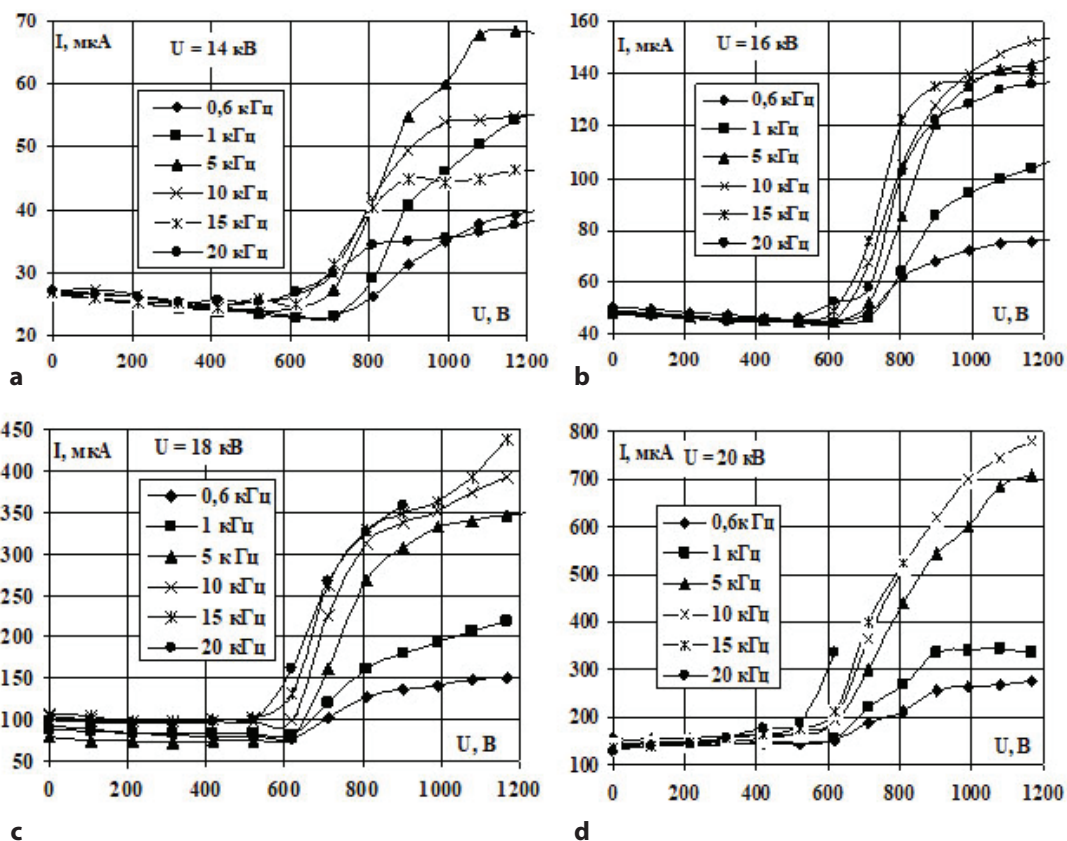


Рисунок 2.19 – Зависимость силы тока ИКР от эффективного напряжения на полевом катоде и частоты импульсов электрического тока при изменении эффективного напряжения на коронирующем электроде: а – 14, б – 16, с – 18, d – 20 кВ

тем, что при скачке напряжения электроны на длине свободного пробега приближаются по своим параметрам к энергии убегающих электронов, и потому их ионизационная способность снижается. Второй причиной уменьшения силы тока является то, что по мере зарядки полевого катода напряженность электрического поля между анодом и полевым катодом уменьшается. Однако рост напряжения на коронирующем электроде и связанное с повышением силы тока, все больше компенсирует уменьшение электрического тока за счет снижения ионизационной способности электронов в момент импульса тока и разности потенциалов между анодом и полевым катодом. В результате кривые ВАХ, до напряжения на полевым катоде около 600–700 В, постепенно меняют угол наклона: для варианта (с) они идут почти горизонтально, а для варианта (d) даже наблюдается некоторое возрастание силы тока при увеличении напряжения на полевым катоде.

Напряжение на полевым катоде, при котором начинает происходить увеличение тока, интерпретируется как начало зажигания новой разновидности ИКР. До этого горел классический коронный разряд, хотя он был и импульсный периодический. Далее начинает гореть неклассический импульсный периодический коронный факельный разряд с большей силой тока. ВАХ данного разряда заметно реагируют на любые изменения напряжения на коронирующем проводе, напряжения на полевым катоде, частоту импульсов тока и химический состав газа.

Общим для всех режимов горения является то, что по мере увеличения частоты следования импульсов тока, точка перегиба кривых ВАХ, интерпретируемая как момент зажигания неклассического импульсного периодического коронного факельного разряда, смещается в область менее высоких напряжений на полевом катоде. Однако чем выше напряжение на коронирующем электроде, тем это смещение происходит все слабее.

Полевой катод экспоненциально заряжается до амплитудного значения напряжения и при малых частотах импульсов нестационарный период его зарядки оказывается намного меньше периода между импульсами тока. Поэтому эффективное напряжение, измеряемое стрелочным вольтметром, практически совпадает с максимальным напряжением на полевом катоде, измеренным осциллографом. Если же частота следования импульсов высока, то к моменту очередного открытия тиратрона полевой катод, даже с помощью блока питания 2, не успевает заряжаться до максимального напряжения и поэтому эффективное значение напряжения оказывается меньше амплитудного. Чем выше частота следования импульсов тока, тем сильнее отличаются показания стрелочного вольтметра и измеренного с помощью осциллографа амплитудного напряжения на полевом катоде. Аналогично изменяется напряжение на коронирующем электроде, к которому заряд приходит через индуктивность LI .

Рассмотрим влияние частоты следования импульсов на силу электрического тока и мощность в разряде. На рисунке 2.20 видно, что существует оптимальная частота следования импульсов тока, при достижении которой наблюдается максимальное значение силы тока в разряде. Когда напряжение на полевом катоде не очень высоко, то вблизи напряжения зажигания разряда оптимальная частота соответствует 15 кГц (варианты а, б), а по мере роста напряжения на полевом катоде она смещается в сторону меньших частот.

При максимальном напряжении на полевом катоде оптимальная частота составляет 5 кГц (вариант а) и 8 кГц (вариант б). Из вариантов (с) и (д) следует, что электрический ток не достигает своих экстремальных значений и разряд, не доходя до максимальной частоты в 20 кГц, срывается в дугу или искру.

Осциллографические исследования показали, что при частотах выше оптимальной, наблюдается максимальное значение силы тока. Это связано с тем, что заряд проходит через индуктивность L и не успевает поднять напряжение на коронирующем проводе до уровня, который находится на индуктивности LI . Увеличивая частоту следования импульсов тока выше оптимального значения, фактически можно снижать напряжение на коронирующем проводе. Электрический ток уменьшается, и чем более развит разряд, тем сильнее снижается напряжение на коронирующем проводе. Эта закономерность была установлена благодаря тому, что цикл исследований был проведен при подключении киловольтметра по схеме до индуктивности LI .

Таким образом, увеличение напряжения на коронирующем электроде приводит к смещению оптимальной частоты следования импульсов тока в сторону высоких частот, а увеличение напряжения на полевом катоде смещает оптимальную частоту в сторону малых частот. Их совместное влияние способствует увеличению силы тока ИКР в воздухе в 3–7 раз относительно исходного значения силы тока коронного разряда.

Поэтому для получения больших значений силы тока следует переходить на более высокие значения напряжений на полевом катоде и коронирующем электроде при частоте следования импульсов тока менее 10 кГц. Для предотвращения срыва разряда в дугу или искру и увеличения диапазона устойчивого горения при высоких частотах, требуется регулировать значение индуктивности LI разрядного контура.

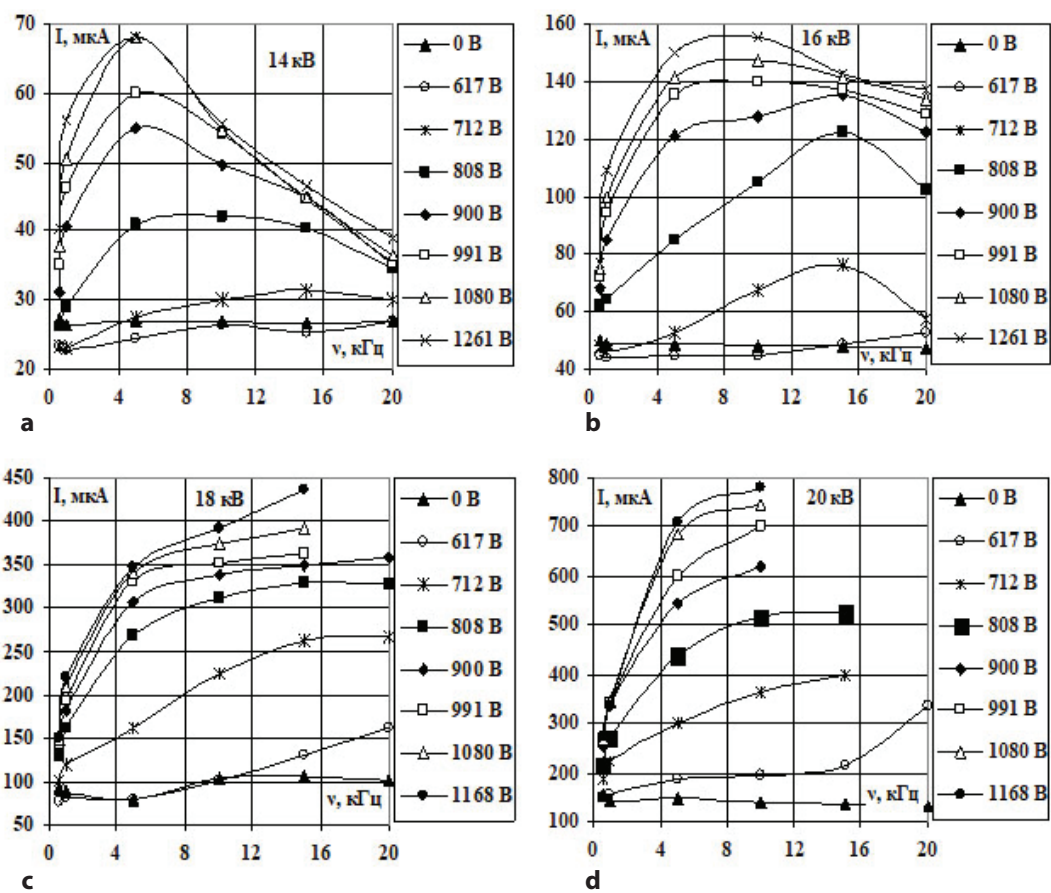


Рисунок 2.20 – Зависимость силы электрического тока ИКР от частоты следования импульсов тока и напряжения на полевом катоде, где эффективное значение напряжения перед индуктивностью L1: а – 14, б – 16, с – 18, d – 20 кВ

2.3.3. Влияние материала коронирующего электрода. В ходе исследований было установлено, что материал коронирующего электрода определяет величину напряжения зажигания U_z ИКР. В результате повышения напряжения на катоде наблюдается увеличение тока разряда в 4–10 раз, а для вольфрама даже в 13 раз (рисунки 2.21–2.29).

Для каждого материала электрода зажигание ИКР происходит при различных напряжениях (таблица 2.3). У молибдена, меди, алюминия, платины и вольфрама наблюдается дискретное повышение силы тока, т. е. скачку тока не предшествуют изменения в токе разряда. В то же время для углерода, ртути и свинца наблюдается сначала предварительное плавное до нескольких раз увеличение силы тока, а затем основной резкий скачок. Отметим, что в отличие от остальных элементов, у свинца наблюдается двухступенчатое повышение силы тока.

На электродах из алюминия и вольфрама ИКР горит неустойчиво и при повышении напряжения свыше напряжения зажигания, сразу срывается в дуговой разряд. У остальных элементов наблюдается протяженное «плато», на котором сила тока ИКР практически перестает зависеть от напряжения на катоде. У платины и свинца после зажигания ИКР наблюдается снижение тока примерно на 5 % при возрастании ускоряющего напряжения на катоде.

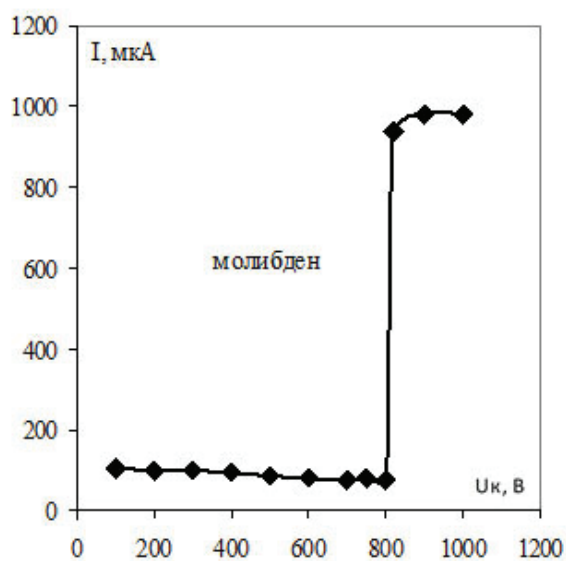


Рисунок 2.21 – Зависимость тока разряда от напряжения на катоде. Коронирующий электрод из молибдена

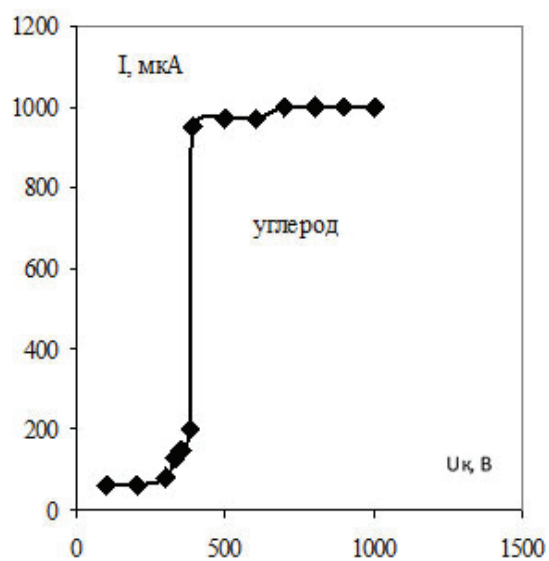


Рисунок 2.22 – Зависимость тока разряда от напряжения на катоде. Коронирующий электрод из углерода

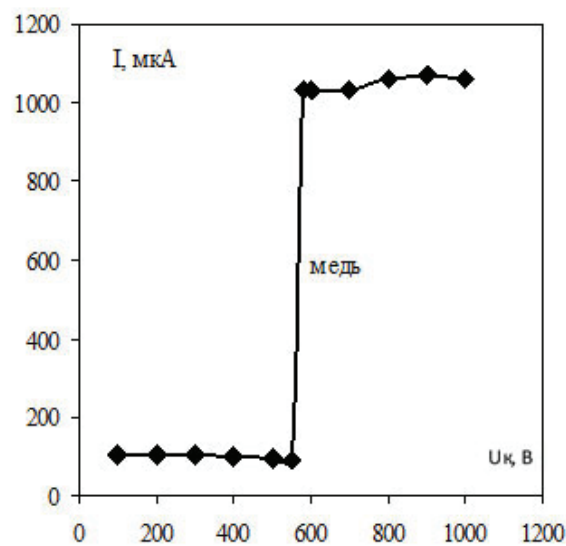


Рисунок 2.23 – Зависимость тока разряда от напряжения на катоде. Коронирующий электрод из меди

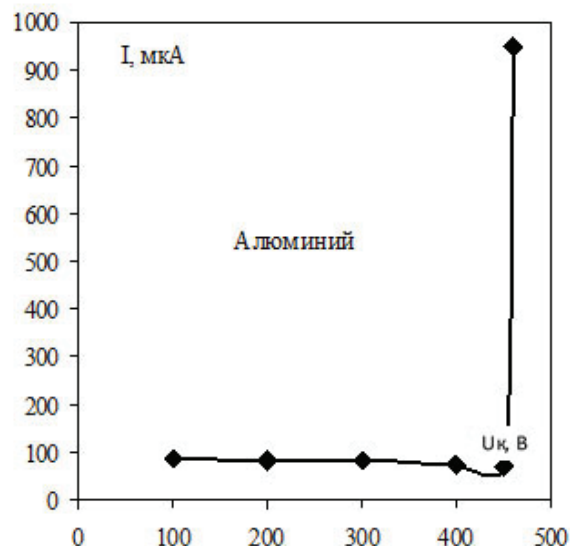


Рисунок 2.24 – Зависимость тока разряда от напряжения на катоде. Коронирующий электрод из алюминия

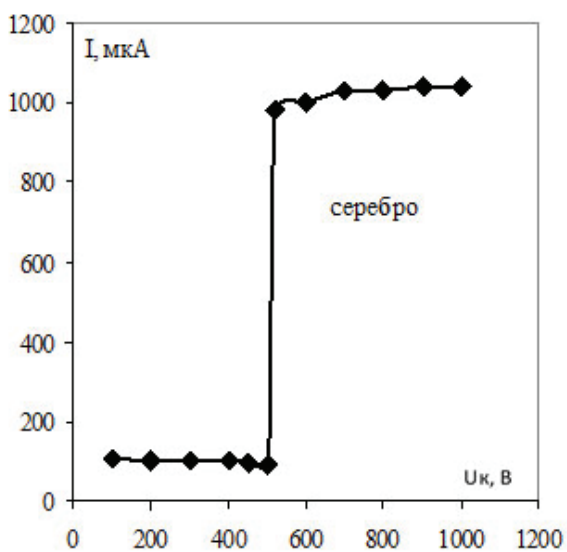


Рисунок 2.25 – Зависимость тока разряда от напряжения на катоде. Коронирующий электрод из серебра

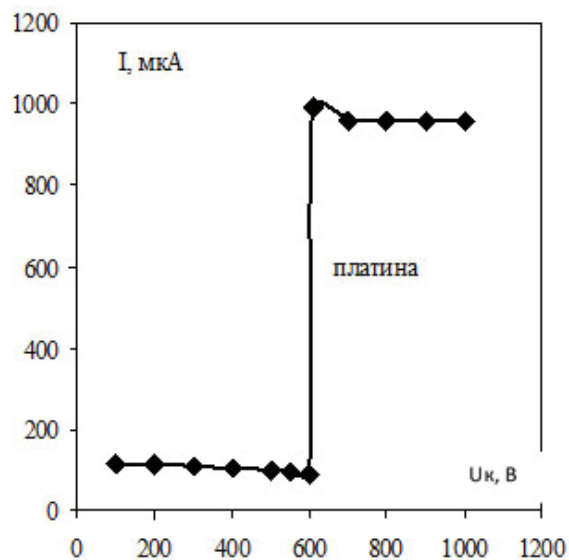


Рисунок 2.26 – Зависимость тока разряда от напряжения на катоде. Коронирующий электрод из платины

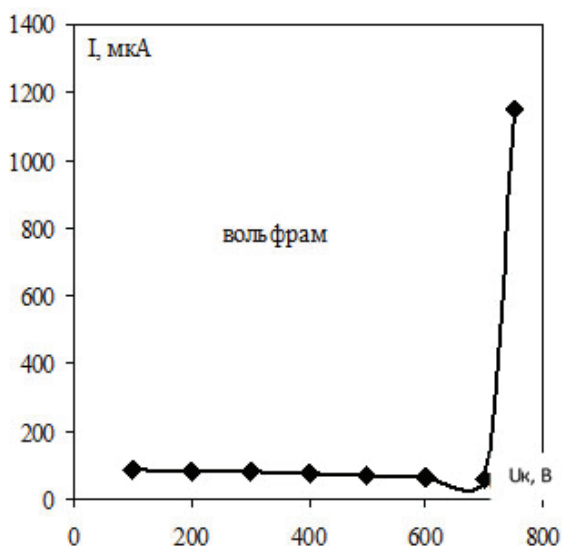


Рисунок 2.27 – Зависимость тока разряда от напряжения на катоде. Коронирующий электрод из вольфрама

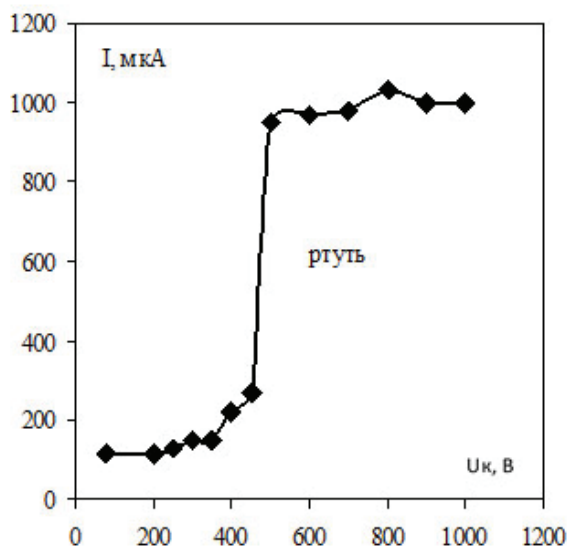


Рисунок 2.28 – зависимость тока разряда от напряжения на катоде. Коронирующий электрод из ртути

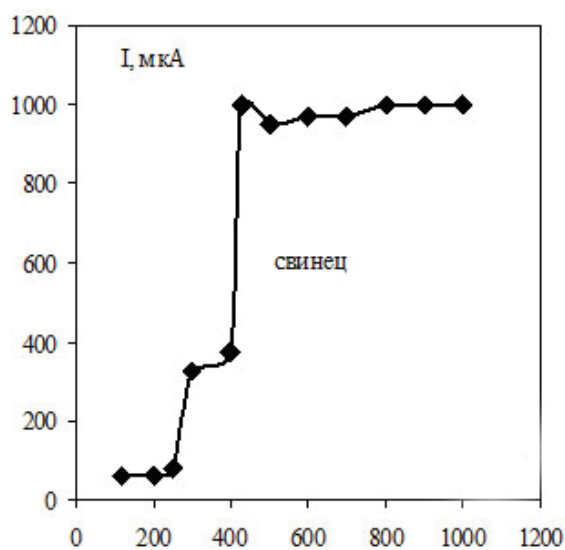


Рисунок 2.29 – Зависимость тока разряда от напряжения на катоде. Коронирующий электрод из свинца

Если сравнить результаты, полученные на нихромовом коронирующем проводе (рисунок 2.20, $d = 0,1$ мм) для других элементов (рисунки 2.21–2.29, $d = 0,3$ мм), то можно заметить влияние диаметра коронирующего электрода на изменения ВАХ. Видно, что на более тонком коронирующем проводе сила тока возрастает от напряжения на катоде не так существенно, чем на более толстых электродах. Переход от возрастающего участка ВАХ на «плато» осуществляется более плавно, а для частоты следования импульсов тока 3 кГц, выход на «плато» вообще отсутствует вплоть до напряжения 1200 В (рисунок 2.20).

Влияние материала коронирующего электрода на параметры ИКР, возможно, связано с генерацией мягкого характеристического рентгеновского излучения, воз-

никающего на аноде. При включении тиратрона на аноде формируются импульсы напряжения с фронтом порядка 10^{-9} с. За счет малой подвижности положительных ионов вблизи коронирующего электрода электрическое поле интенсивно ускоряет электроны до энергии, соответствующей электрическому потенциалу от ИП2. Далее электроны ударяются об электронную оболочку атомов материала анода и возбуждают электроны в атоме, которые в результате этого переходят на более высокие энергетические уровни атома. При рекомбинации возбужденных атомов возникает характеристическое излучение в рентгеновском диапазоне. Рентгеновское излучение поглощается воздухом или кислородом в объеме коронного разряда посредством ионизации, в основном, атомов кислорода и азота. Образующиеся при ионизации «дополнительные электроны» увеличивают проводимость разрядного промежутка и увеличивают электрический ток коронного разряда.

Таблица 2.3 – Напряжение зажигания для различных материалов коронирующего электрода, напряжение на разрядном контуре 18 кВ, частота включения тиратрона 14 кГц

Материал анода	C	Al	Fe	Cu	Mo	Ag	W	Pt	Au	H	Pb
$U_z, В$	385	455	720	565	810	580	725	610	760	475	440
Уровень	K	K	L_{III}	L_{III}	M_I	M_{III}	N_I	N_{II}	N_I	N_{III}	N_{IV}
Энергия, эВ	283	1559,6	707,5	930,9	504,6	571,4	595	609,2	758,8	571	435,2

Для эффективного поглощения рентгеновского излучения в плазме коронного разряда необходимо чтобы длина электромагнитной волны соответствовала краю поглощения молекул данного газа. Известно, что края поглощения азота и кислорода соответственно равны 400 и 531 эВ. Тогда из данных таблицы 2.3 видно, что энергия рентгеновских квантов, излучаемых коронирующим электродом, близка к краю поглощения

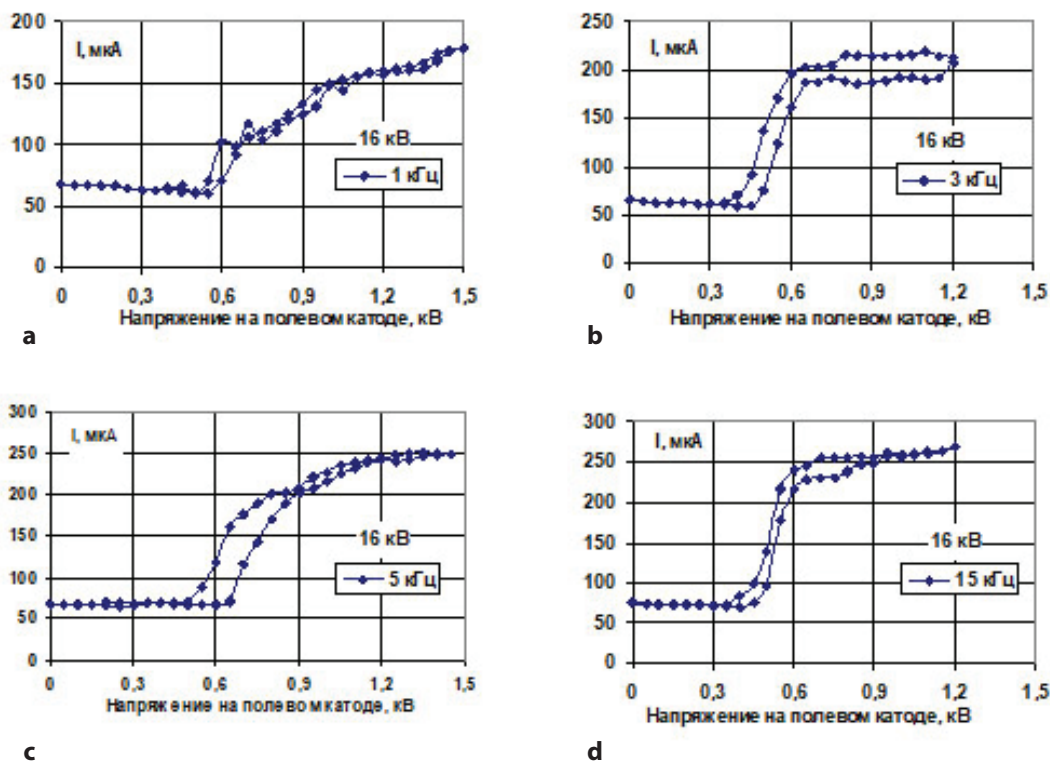


Рисунок 2.30 – Гистерезис силы тока ИКР от напряжения на полевом катоде и частоты следования импульсов тока при напряжении 16 кВ на коронирующем электроде

рентгеновского излучения кислородом и азотом на длинах, соизмеримых с размерами разрядного промежутка. Уровни энергии однократной ионизации атомов коронирующих электродов близки к краю поглощения рентгеновского излучения кислородом и азотом (таблица 2.3). Для железа, серебра, платины, золота, и свинца потенциалы однократной ионизации и напряжения зажигания имеют близкие значения. Для других материалов наблюдаются расхождения. Это говорит о том, что для данных материалов электродов, возможно, существуют и другие механизмы увеличения силы тока в коронном разряде.

2.3.4. Гистерезис вольт-амперных характеристик. При исследовании характеристик импульсного периодического коронного разряда было установлено, что при увеличении напряжения на полевом катоде реализуются определенные значения силы электрического тока, а при снижении напряжения, при всех прочих равных условиях горения разряда, сила тока оказывается всегда больше (рисунок 2.30). Наблюдается гистерезис вольт-амперных характеристик при горении импульсного периодического коронного разряда.

В результате исследований ВАХ при напряжении 16 кВ на коронирующем электроде было установлено, что гистерезис ВАХ начинает наблюдаться при частоте импульса тока ~ 1 кГц (рисунок 2.30, а). С увеличением частоты следования импульсов тока до 3 кГц (рисунок 2.30, б), сила электрического тока возрастает и наблюдается четкое разделение восходящей и нисходящей ветвей ВАХ. В области напряжений свыше 0,7 кВ расхождение восходящей и нисходящей ветвей ВАХ достигает 15 % на полевом катоде. При увеличении частоты следования импульсов тока до 5 кГц, наибольшее отклонение ветвей ВАХ достигает 0,1–0,15 кВ. Это происходит в области напряжений на полевом катоде

0,5–0,8 кВ. При увеличении частоты следования импульсов тока до 15 кГц, восходящая и нисходящая ветви ВАХ начинают сближаться.

Наличие гистерезиса вольт-амперных характеристик обусловлено тем, что на силу электрического тока в импульсном периодическом коронном разряде оказывают влияние:

1) электроны, которые ионизуют газ за счет энергии, приобретаемой в разряде на длине свободного пробега за счет нарастания импульса тока;

2) взаимодействие плазмы с импульсами тока, при котором заряженные частицы от предыдущего импульса легче ионизуют газ за счет ступенчатой ионизации, и чем выше частота следования импульсов тока, тем больше происходит актов ионизации;

3) при высоких напряжениях большое влияние на ионизацию газа в объеме коронного разряда оказывают ультрафиолетовое и рентгеновское излучение;

4) видимое свечение плазмы заполняет весь разрядный промежуток и поэтому ультрафиолетовое и рентгеновское излучение более интенсивно влияют на ионизацию газа, чем в разрядном промежутке классического коронного разряда;

5) коэффициент размножения электронов за счет высокого напряжения в межэлектродном промежутке возрастает не так эффективно, как коэффициенты размножения электронов за счет ступенчатой ионизации и действия ультрафиолетового и рентгеновского излучения.

2.3.5. Горение коронного разряда в азоте. Из всех применяемых в экспериментальных исследованиях газов: воздух, азот, кислород, углекислый газ, аргон – азот хорошо подходит для горения ИКР. В азоте ИКР горит устойчиво, ярко и развиваются максимальные электрические токи и мощности. В азоте при всех прочих равных условиях сила электрического тока почти в 80 раз превышает силу тока классического коронного разряда. Поведение этого разряда в азоте настолько необычно, что требует отдельного рассмотрения.

Экспериментально установлено (рисунок 2.31), что если напряжение на полевом катоде изменяется в интервале 0–0,4 кВ, то горит классический слаботочный коронный разряд и все кривые ВАХ практически совпадают друг с другом. Однако, как только напряжение на полевом катоде $U_{кп} = 0,5$ кВ, изменяется, поведение горения ИКР и сила тока в разряде возрастают в десятки раз. Сравним ИКР и классический коронный разряд при напряжениях: $U = 13,6$ кВ и $U_{кп} = 0,4–0,5$ кВ. В этом случае сила тока ИКР оказывается в 48 раз больше силы тока классического коронного разряда.

Ни в каком другом газе такого эффекта не наблюдается. За счет чего происходит большой скачек силы тока? Этот вопрос ждет объяснения.

По мере повышения напряжения на полевом катоде наблюдаются изменения в распределении ВАХ. При напряжениях $U_{кп} = 0,6; 0,8; 0,9$ и 1 кВ ВАХ доходят до максимума по напряжению на коронирующем электроде и начинают изменяться в обратную сторону. В этом случае электрический ток продолжает расти, а напряжение на коронирующем проводе снижается. Это означает, что при повышении низковольтного напряжения через ЛАТР в первичной обмотке высоковольтного трансформатора блока питания 1 высокое напряжение во вторичной обмотке высоковольтного трансформатора возрастает только до определенного значения. Далее напряжение через ЛАТР продолжает увеличиваться, а высокое напряжение во вторичной обмотке высоковольтного трансформатора уменьшается.

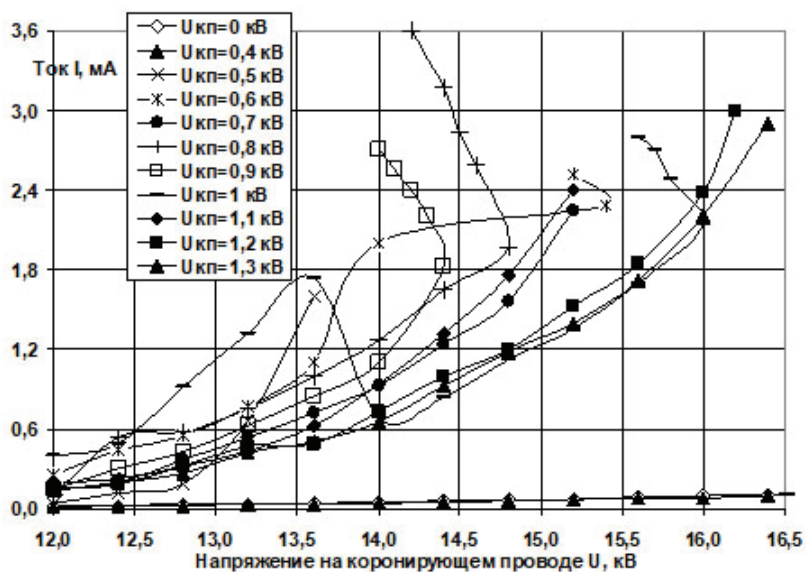


Рисунок 2.31 – Зависимость силы тока ИКР в азоте от напряжения на коронирующем проводе при изменении напряжения на полевом катоде $U_{кп}$ от 0 до 1,3 кВ

Казалось бы, в этом ничего особенно необычного нет. Просто блок питания 1 по мощности уже выходит на границу своих возможностей. При превышении тока свыше граничного значения ~ 2 мА, высоковольтный трансформатор блока питания 1 приближается к режиму работы короткого замыкания. Поэтому, несмотря на повышение напряжения в первичной обмотке высоковольтного трансформатора, во вторичной обмотке происходит снижение высокого напряжения.

При напряжениях на полевом катоде 0,7; 1,1; 1,2; и 1,3 кВ, сила электрического тока превышает 2 мА (при напряжениях 1,2 и 1,3 кВ сила электрического тока достигает 3 мА), а перегиба напряжения в обратную сторону не наблюдается.

Это вопрос, на который у авторов нет ответа.

Если проанализировать ход ВАХ при напряжении 1 кВ на полевом катоде, то обнаружится область при напряжении 13,6 кВ на коронирующем проводе с аномалиями электрического тока. Видно, что сила электрического тока превышает почти в три раза силу тока ВАХ при напряжении 1,1 кВ на полевом катоде. При дальнейшем увеличении напряжения на коронирующем проводе до 14 кВ, сила тока не увеличивается, а снижается почти в три раза.

Таким образом, в области напряжений от 12,5 до 14 кВ на коронирующем проводе складываются благоприятные условия, при выполнении которых горение ИКР происходит при менее высоких напряжениях на коронирующем проводе, реализуются большие значения силы электрического тока, чем при более высоком напряжении. В эту же область аномально высоких токов попадают экспериментальные точки при напряжениях 0,5 кВ на полевом катоде и 13,6 кВ – на коронирующем проводе, а также точка при напряжениях $U_{кп} = 0,6$ кВ и $U = 14$ кВ.

Это означает, что или закон Ома не выполняется, или следует найти ответ на этот вопрос.

Из визуальных наблюдений за горением ИКР замечено, что коронный разряд горит с переменной яркостью и громким шипением в различных участках коронирующего

провода. Иногда разряд «запирается» по невыясненным причинам и гаснет, но с существенным увеличением силы электрического тока, яркостью свечения и громкостью шипения. Чем больший объем занимает зона коронного разряда, тем более устойчиво горит разряд. Возможно, в этом случае ионизирующее излучение более эффективно используется для поддержания горения коронного разряда.

2.4. Синтез озона в коронном факельном разряде

Разработан озонатор на основе аномальной разновидности положительной короны – коронном факельном разряде [38, 45–46], который по энергетическим характеристикам значительно превосходит обычную положительную корону, удовлетворяет требованиям надежности и экономичности. Коронный факельный разряд зажигается в воздухе при атмосферном давлении на постоянном электрическом токе высокого напряжения положительной полярности. Electroды, имеющие форму дисков, расположены параллельно заземленной плоскости (рисунок 2.32). В озонаторах на данном типе разряда роль диэлектрика выполняет сам озонируемый газ.

Эксперименты с одиночным факелом показали, что разряд горит неустойчиво, и его параметры плохо воспроизводятся в различные периоды времени. Группа коронных разрядов наоборот, горит устойчиво за счет взаимного влияния и генерации заряженных частиц через механизм фотоионизации газовой среды в зоне разряда ультрафиолетовым излучением. Удельные энергетические затраты, идущие на синтез озона из атмосферного воздуха, заметно снижаются при увеличении количества коронирующих электродов. Удельная мощность озонатора на основе коронного факельного разряда более чем в 50 раз превосходит мощность озонатора на классических формах коронного разряда, что позволяет сократить массовые габариты озонирующего узла и тем самым уменьшить стоимость установки.

2.4.1. Экспериментальная установка для синтеза озона (рисунок 2.33), состоит из трансформатора 1, ваттметра 2, источника высокого напряжения постоянного тока 3, киловольтметра 4. Положительный электрод источника высокого напряжения подсоединяется к коронирующему электроду 5, а отрицательный электрод подсоединен к сетке 6. Под действием электрического ветра, возникающего при горении коронного разряда, озонная воздушная смесь через сетку 6 выносится из разряда и попадает на анемометр 7. Анализатор озона 8 регистрирует концентрацию озона в озонной воздушной смеси.

По концентрации озона, скорости озонной воздушной смеси и сечению трубы 9 вычисляются производительность озонатора и удельные энергетические затраты, идущие на синтез озона. Эксперименты проводятся в воздухе при атмосферном давлении и температуре 26 °С. В качестве коронирующих электродов используются пластинки из медной фольги толщиной 50 мкм и из нержавеющей стали толщиной 100 мкм.

2.4.2. Изменение напряжения на разрядном контуре. При горении коронного разряда на толстых коронирующих электродах из стали скорость электрического ветра (рисунок 2.34) и производительность озонатора (рисунок 2.35) изменяются более интенсивно, чем на тонких медных электродах. На электродах из меди толщиной 50 мкм напряжение, при котором зажигается факельный разряд и появляется озон, меньше чем на стальных электродах при одинаковых размерах разрядного промежутка d . С увеличением размеров разрядного промежутка напряжение зажигания возрастает до 3 кВ, а напряжение

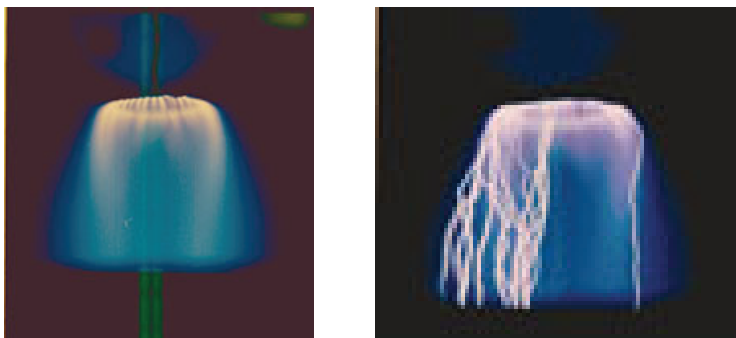


Рисунок 2.32 – Коронный факельный разряд, горящий с электродов в виде дисков расположенных параллельно заземленной плоскости. Развитие искрового проба (справа)

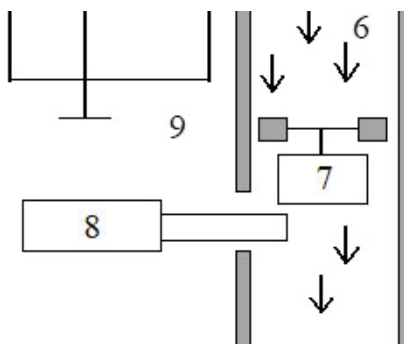


Рисунок 2.33 – Схема экспериментальной установки

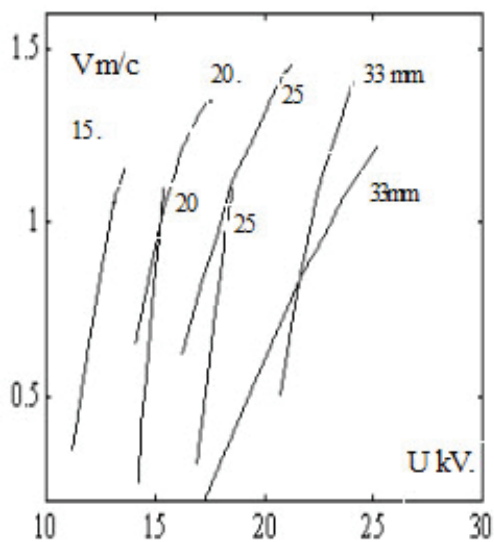


Рисунок 2.34 – Зависимость скорости электрического ветра от напряжения: (—) – медь, (---) – железо

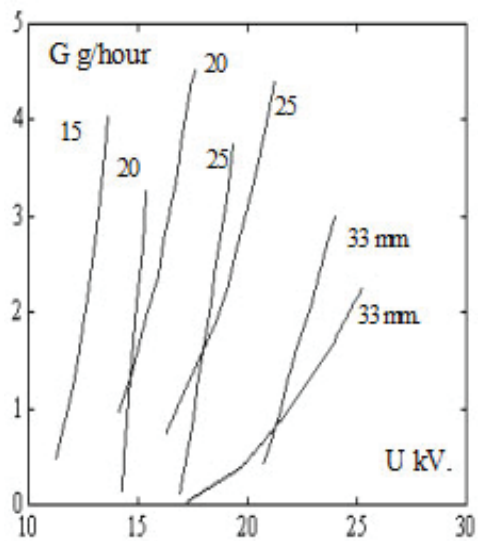


Рисунок 2.35 – Зависимости производительности озонатора от напряжения: (—) – медь, (---) – железо

перехода коронного разряда в искровой на 1,5 кВ больше на тонких медных электродах, чем на толстых электродах из стали.

При напряжениях до 21 кВ скорость электрического ветра с тонких электродов превосходит скорость с толстых электродов (рисунок 2.34). Однако при напряжении свыше 21 кВ наблюдается обратная картина: скорость электрического ветра с торцевой поверхности стальных электродов превосходит скорость с поверхности более тонких медных электродов.

При изменении напряжения зажигания коронного разряда (рисунок 2.36, левая граница кривых) до напряжения перехода его в искровой разряд (рисунок 2.36, правая граница кривых), удельные энергетические затраты, идущие на синтез озона из атмосферного воздуха, проходят через минимум. Относительно высокие энергетические затраты при напряжении близком к зажиганию коронного разряда, объясняется тем, что при малых напряжениях энергии электронов в разряде еще недостаточно для интенсивного синтеза озона и она идет, в основном, на нагрев газа. Увеличение удельных энергетических затрат после минимального значения связано с тем, что скорость электрического ветра недостаточно высока, чтобы вынести из зоны разряда весь образовавшийся озон и поэтому часть его разрушается в области разряда.

Подобная зависимость удельных энергетических затрат от напряжения наблюдается и при изменении толщины коронирующих пластин. Отметим, что на толстых стальных коронирующих электродах при изменении напряжения коронного разряда, удельные энергетические затраты очень велики, затем резко снижаются до минимума и вновь возрастают. Для более тонких медных коронирующих электродов эта зависимость выражена не так сильно.

Сравнение удельных энергетических затрат (рисунок 2.36) показало, что при напряжениях до 14 кВ имеют преимущество тонкие медные коронирующие электроды, а факельный разряд с толстых стальных электродов вообще не горит или сразу переходит в искровой. Удельные энергетические затраты на тонких и толстых электродах примерно одинаковы при напряжении 15–16 кВ и расстоянии $d = 33$ мм от коронирующих электродов до сетки. При напряжениях свыше 18 кВ, преимуществом обладают более толстые стальные электроды.

При больших межэлектродных промежутках реализуется малая производительность озонатора и высокие удельные энергетические затраты (рисунок 2.37). При расстояниях $d = 20$ мм на тонких электродах получается максимальная производительность 4,5 грамм озона в час и при этом реализуются относительно высокие удельные энергетические затраты до 48 кВт*ч/кг озона. При меньших расстояниях ($d = 15$ мм) на тонких электродах достигается высокая производительность озона в 4 грамма озона в час и вполне приемлемые удельные энергетические затраты ~ 32 кВт*ч/кг озона. Уменьшение межэлектродного расстояния, толщины диска и напряжения на разряде приводят к снижению удельных энергетических затрат, идущих на синтез озона, со 100 кВт*ч/кг до 25 кВт*ч/кг [47].

Если сравнить удельные энергетические затраты промышленных озонаторов – 18–35 кВт*ч/кг озона, то озонатор на факельном типе разряда удовлетворяет экономическим требованиям, значительно проще в конструктивном исполнении и более надежен в работе.

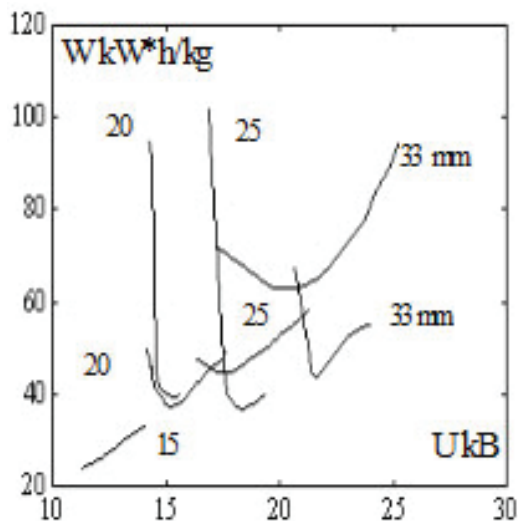


Рисунок 2.36 – Зависимость удельных энергетических затрат на синтез озона от напряжения и толщины коронирующих электродов: (—) – медь, (---) – железо

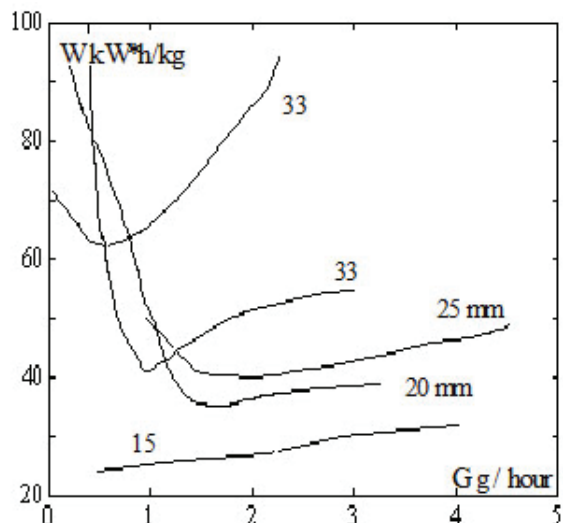


Рисунок 2.37 – Зависимость удельных энергетических затрат на синтез озона от производительности озонатора: (—) – медь, (---) – железо

2.4.3. Синтез озона из кислорода. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 2.38. Технический кислород из баллона проходит осушку на силикагеле и через ротаметр подается в разрядный узел, представляющий собой герметичную камеру из органического стекла, установленную на заземленный охлаждаемый водой электрод. В камеру предусмотрен ввод коронирующих электродов, выполненных в виде дисков с регулировкой межэлектродного расстояния. При подаче на коронирующий электрод высокого напряжения (до 20 кВ) в межэлектродном промежутке загорается КФР.

Озонная кислородная смесь, образующаяся в зоне разряда, поступает в реакционную колонну, содержащую раствор йодистого калия. Концентрация озона определяется по стандартной йодометрической методике. По известной мощности разряда, расходу кислорода, концентрации озона в смеси газов определяют удельные энергетические затраты, идущие на синтез озона. Для экспериментов применялись электроды, выполненные в виде дисков различной толщины и диаметров из медной фольги.

2.4.4. Влияние диаметра коронирующего диска. Электроды диаметрами от 3 до 25 мм выполнены из медной фольги толщиной 50 мкм и располагаются на расстоянии 15 мм от заземленной плоскости. Разряд происходит в среде осушенного кислорода при напряжении 20 кВ и расходе 0,046 м³/час.

В результате измерений установлено (рисунки 2.39, 2.40), что при увеличении диаметра диска от 3 до 25 мм мощность разряда линейно увеличивается с 4,6 до 9,8 Вт, так как длина коронирующей кромки пропорциональна диаметру. Зависимость концентрации озона от диаметра диска имеет ярко выраженный максимум 3,26 г/м³ в области изменения размеров диска 10–15 мм. С уменьшением размеров диска до 3 мм или при увеличении до 25 мм концентрация озона уменьшается и составляет ~2,2 г/м³. Зависимость производительности озонатора от диаметра диска имеет аналогичный характер (рисунок 2.41), а максимальная наработка озона составляет 0,15 г/час.

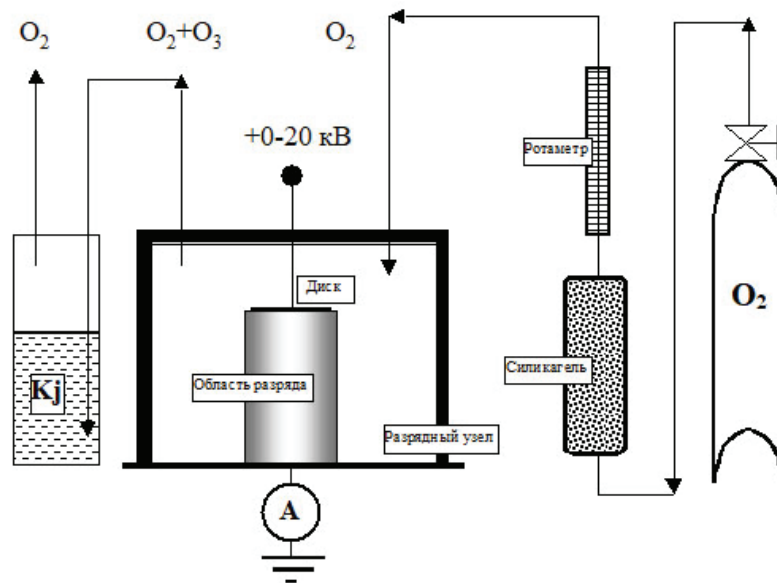


Рисунок 2.38 – Схема экспериментальной установки

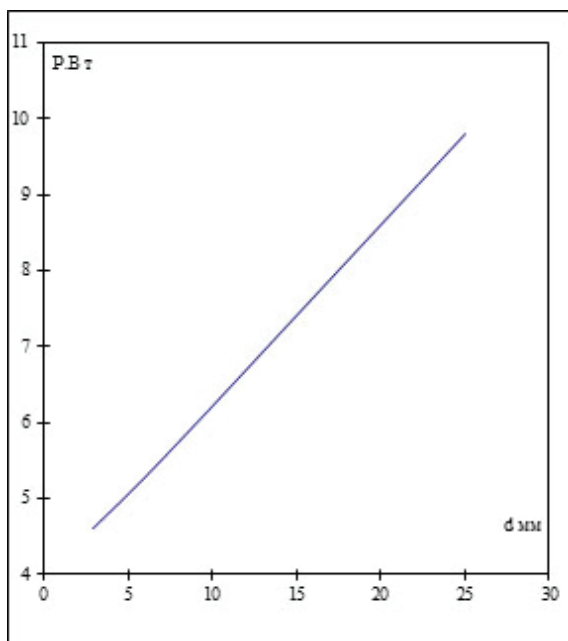


Рисунок 2.39 – Зависимость мощности разряда от диаметра диска

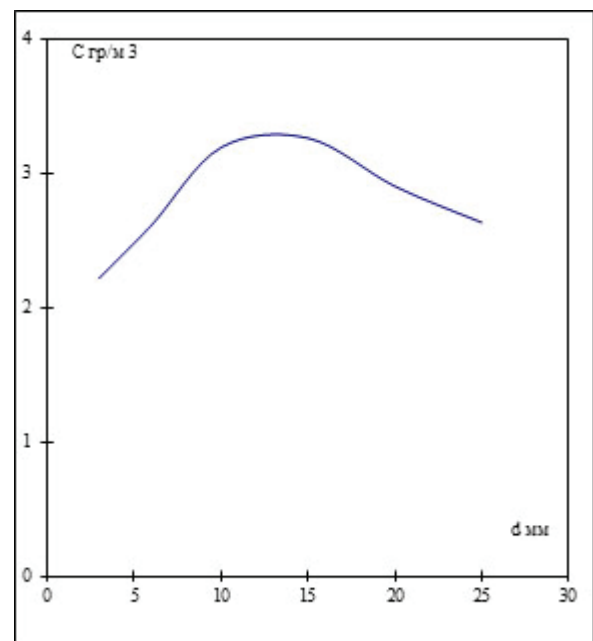


Рисунок 2.40 – Зависимость концентрации озона от диаметра диска

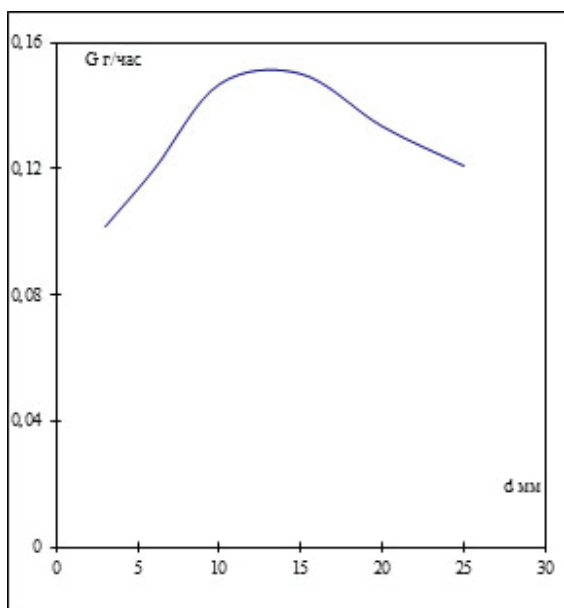


Рисунок 2.41 – Зависимость производительности озонатора от диаметра диска

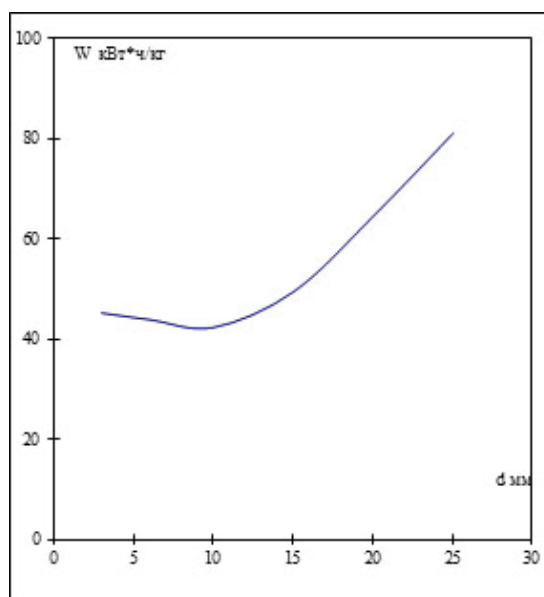


Рисунок 2.42 – Зависимость удельных энергетических затрат от диаметра диска

При малых диаметрах диска (3 мм) удельные энергетические затраты составляют 45,1 кВт*ч/кг озона (рисунок 2.42). При увеличении диаметра до 10 мм они уменьшаются до 41 кВт*ч/кг. При дальнейшем увеличении диаметра энергетические затраты возрастают до 84 кВт*ч/кг.

Из анализа приведенных зависимостей становится ясно, что наиболее оптимальными для синтеза озона являются коронирующие диски диаметром 8–12 мм. Это связано с тем, что при данной кривизне коронирующей кромки в разрядном промежутке формируется такое распределение электрического поля, при котором реализуется разряд с наиболее благоприятными характеристиками для синтеза озона.

2.4.5. Влияние толщины коронирующего диска. Мощность разряда, концентрация озона и производительность озонатора незначительно возрастают с увеличением толщины диска (рисунки 2.43–2.45). Удельные энергетические затраты (рисунок 2.46) заметно уменьшаются с 82 кВт*ч/кг при толщине диска 22 мкм, до 59 кВт*ч/кг для толщины 45 мкм.

2.4.6. Влияние размеров разрядного промежутка. Эксперименты проводились с диском из меди толщиной 50 мкм и диаметром 10 мм. Расстояние до заземленного электрода изменялось от 10 до 15 мм. Напряжение на разрядном контуре устанавливалось близким к напряжению перехода коронного разряда в искровой.

Установлено (рисунки 2.47–2.49), что увеличение мощности разряда, так же как концентрации озона и производительности озонатора от величины разрядного промежутка, носят практически линейный характер. Удельные энергетические затраты (рисунок 2.50) при расстояниях 10 мм составляют 58,7 кВт*ч/кг и увеличиваются до 78 кВт*ч/кг при 15 мм.

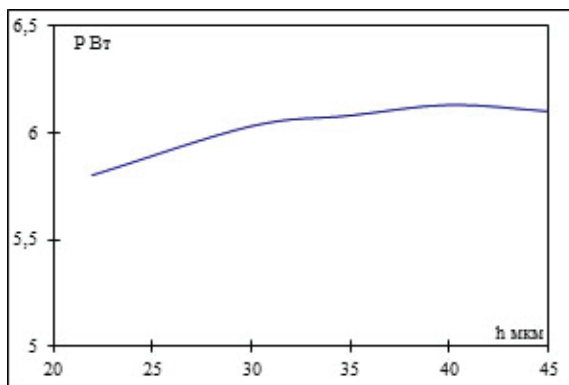


Рисунок 2.43 – Зависимость мощности разряда от толщины диска

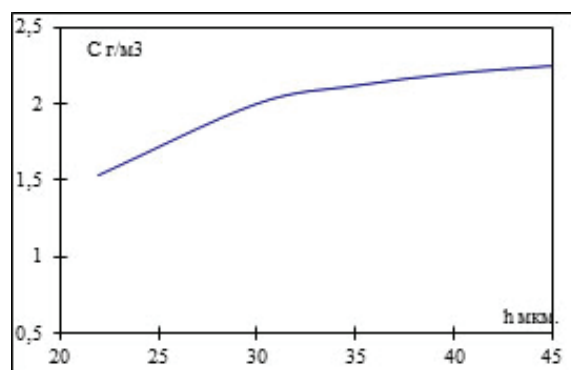


Рисунок 2.44 – Зависимость концентрации озона от толщины диска

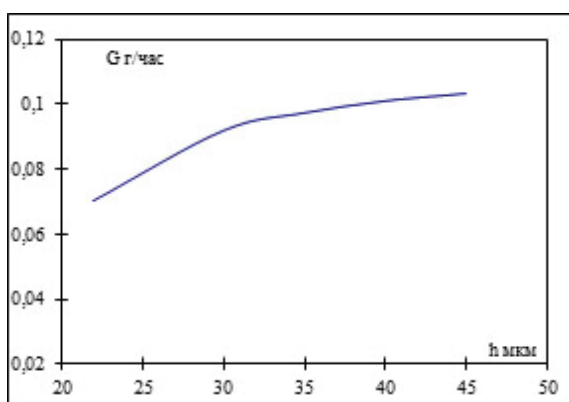


Рисунок 2.45 – Зависимость производительности озонатора от толщины диска

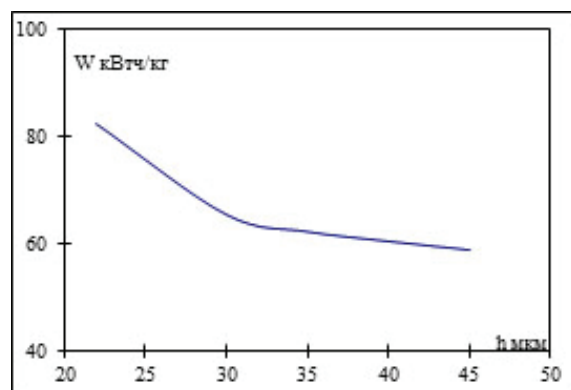


Рисунок 2.46 – Зависимость удельных энергетических затрат от толщины диска

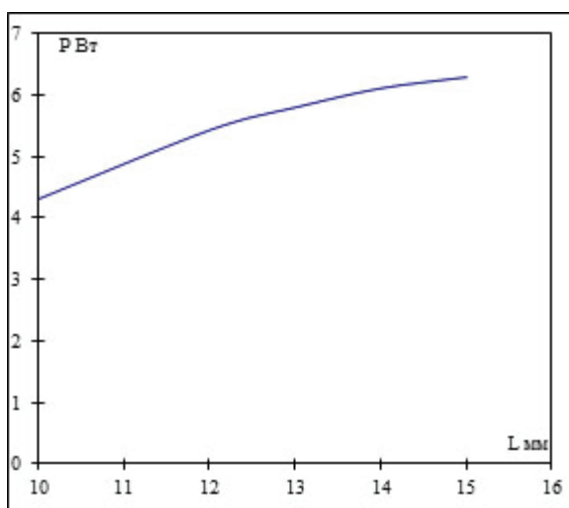


Рисунок 2.47 – Зависимость мощности разряда от межэлектродного расстояния

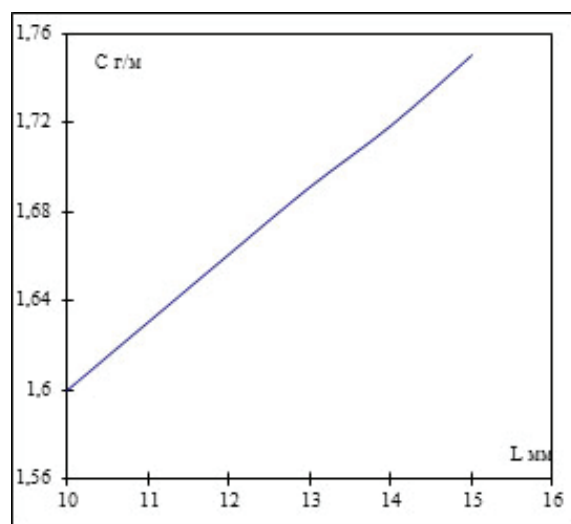


Рисунок 2.48 – Зависимость концентрации озона от межэлектродного расстояния

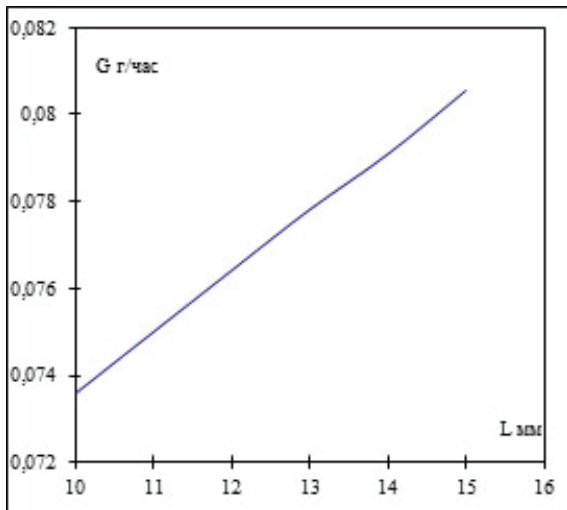


Рисунок 2.49 – Зависимость производительности озонатора от межэлектродного расстояния

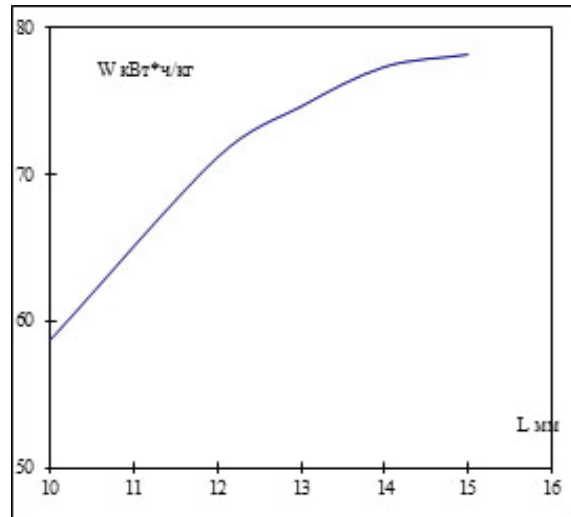


Рисунок 2.50 – Зависимость удельных энергетических затрат от межэлектродного расстояния

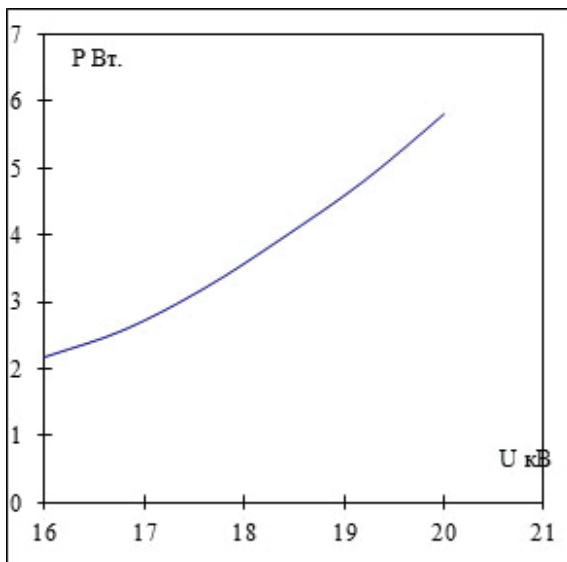


Рисунок 2.51 – Зависимость мощности разряда от напряжения на разрядном контуре

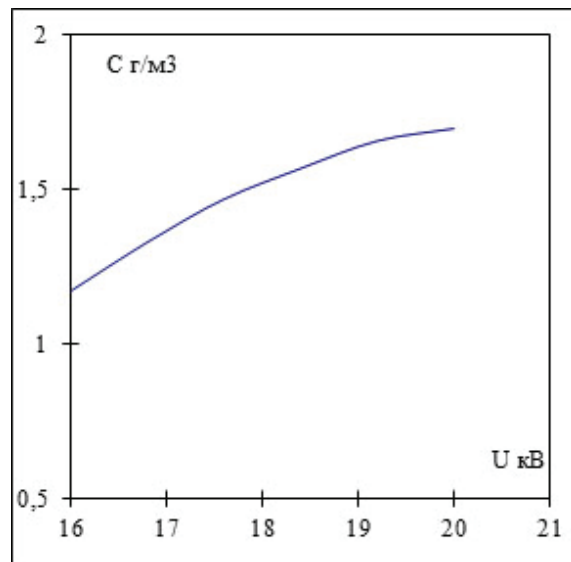


Рисунок 2.52 – Зависимость концентрации озона от напряжения на разрядном контуре

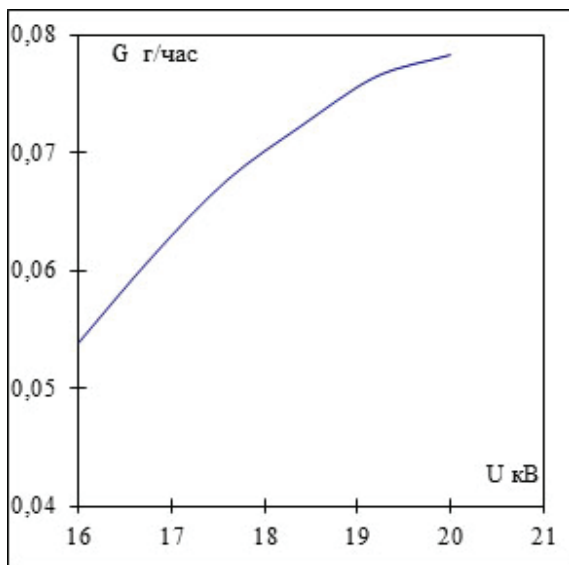


Рисунок 2.53 – Зависимость производительности озонатора от напряжения на разрядном контуре

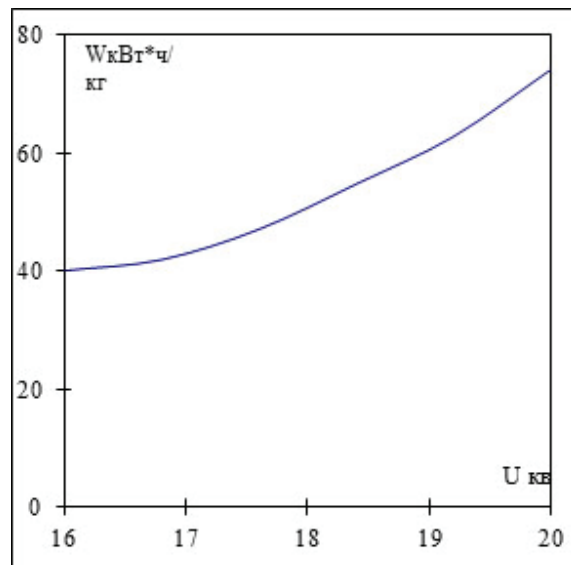


Рисунок 2.54 – Зависимость удельных энергетических затрат от напряжения на разрядном контуре

2.4.7. Изменение напряжения на разрядном контуре коронирующего электрода диаметром 10 мм варьировалось от 16 до 20 кВ. Расстояние между электродами 15 мм. С увеличением напряжения мощность разряда повышается и достигает максимального значения в 5,8 Вт при 20 кВ (рисунок 2.51). При этом концентрация озона возрастает с 1,17 до 1,7 г/м³. Аналогично ведет себя зависимость производительности озонатора (рисунок 2.52). Минимальные удельные энергетические затраты 40 кВт*ч/кг, идущие на синтез озона, соответствуют напряжению 16 кВ и возрастают с увеличением напряжения до 72 кВт*ч/кг (рисунок 2.53).

Следует отметить, что увеличение напряжения на разрядном контуре приводят к возрастанию мощности и к увеличению удельных энергетических затрат, идущих на синтез озона. Это связано с тем, что при постоянном расходе кислорода, с увеличением мощности разряда возрастает температура в области разряда и происходит перегрев газа, что в свою очередь снижает эффективность синтеза озона. То же самое происходит с увеличением расстояния разрядного промежутка и диаметра диска.

В результате исследований было выявлено, что оптимальные режимы синтеза озона в коронном факельном разряде наблюдаются при диаметрах коронирующих электродов 8–12 мм. Удельные энергетические затраты составляют 41 кВт*ч/кг при концентрации озона на выходе из озонирующего блока ~3 г/м³. Уменьшение напряжения с 20 до 16 кВ на разрядном промежутке позволяет снизить удельные энергетические затраты с 74 до 40 кВт*ч/кг (рисунок 2.54). Концентрация озона при этом уменьшается с 1,7 до 1,17 г/м³. Уменьшение межэлектродного расстояния с 15 мм до 10 мм приводит к снижению удельных энергетических затрат с 78 до 59 кВт*ч/кг. При уменьшении толщины диска с 45 до 22 мкм удельные затраты увеличиваются с 59 до 82 кВт*ч/кг, а концентрация озона на выходе уменьшается с 2,25 до 1,53 г/м³. Оптимальное расстояние 10 мм и толщина диска 45 мкм согласуется с данными [48].

2.5. Линейный коронный факельный разряд

В лаборатории «Плазменные технологии» КРСУ разработан озонатор на основе аномальной разновидности положительной короны – линейном коронном факельном разряде (ЛКФР) [49, 50]. Горение коронного разряда поддерживается между коронирующей проволочкой положительной полярности и заземленной плоскостью. Необходимым условием существования разряда является наложение на постоянное напряжение источника питания импульсной составляющей тока с помощью инициирующего разрядника [42–44].

2.5.1. Экспериментальная установка. Источник питания озонатора состоит из трансформатора T_1 (рисунок 2.55), напряжение которого подается на первичную обмотку высоковольтного трансформатора T_2 . Высокое напряжение вторичной обмотки поступает по схеме удвоения напряжения $D1, D_2, C_1, C_2$. Источник питания регулирует напряжение во вторичной цепи до 25 кВ при электрическом токе нагрузки $I = 10$ мА. Нагрузкой источника питания является разрядный узел, представляющий собой коронирующий электрод – провод (анод) из нихрома длиной 220 мм и диаметром 0,5 мм, расположенный на расстоянии $d = 20–30$ мм от параллельной плоскости катода. Линейный коронный факельный разряд зажигается на постоянном токе высокого напряжения в разрядном контуре между коронирующим электродом положительной полярности и заземленной плоскостью.

Электрические и энергетические параметры коронного разряда регистрируются мощностью ваттметра в первичной цепи источника питания. Измерения среднего тока разряда осуществляются с помощью микроамперметра и осциллографа с учетом импульсной и постоянной составляющих тока. Для осциллографической регистрации тока разряда последовательно с микроамперметром в схему вводится безиндуктивный шунт R_3 . Микроамперметр замыкается переключателем для предотвращения искажения формы импульса тока. Напряжение на разрядном контуре измеряется электростатическим киловольтметром.

В электрической схеме источника питания катод соединяется с заземляющим проводом через инициирующий разрядник (ИР). Величина зазора между электродами ИР регулируется в пределах $h = 0–5$ мм. При $h = 0$ образуется обычная «классическая» корона, а в остальных случаях в разрядном узле между коронирующим проводом и параллельной проводящей плоскостью зажигается ЛКФР. Для формирования ЛКФР катод необходимо отделить от отрицательного полюса источника питания инициирующим разрядником, и ввести в разрядную цепь со стороны анода индуктивность L . В качестве индуктивности переменной величины используется дроссель, состоящий из двух последовательно соединенных катушек по 20000 витков, намотанных на сердечник из электротехнической стали. Применяется витой магнитопровод П-образной формы с длиной средней линии 440 мм и площадью сечения 950 мм². Для изменения L на дросселе располагаются две последовательно соединенных обмотки по 250 витков, через которые пропускается регулируемый постоянный ток подмагничивания. Величина L определяется методом вольтметра-амперметра на частоте 50 Гц [51] и сравнивается с расчетной величиной для сердечника тороидальной формы [52]:

$$L_p = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \omega^2 a \ln \left(\frac{D+r}{D-r} \right) \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \omega^2 a \ln \left(\frac{D+r}{D-r} \right),$$

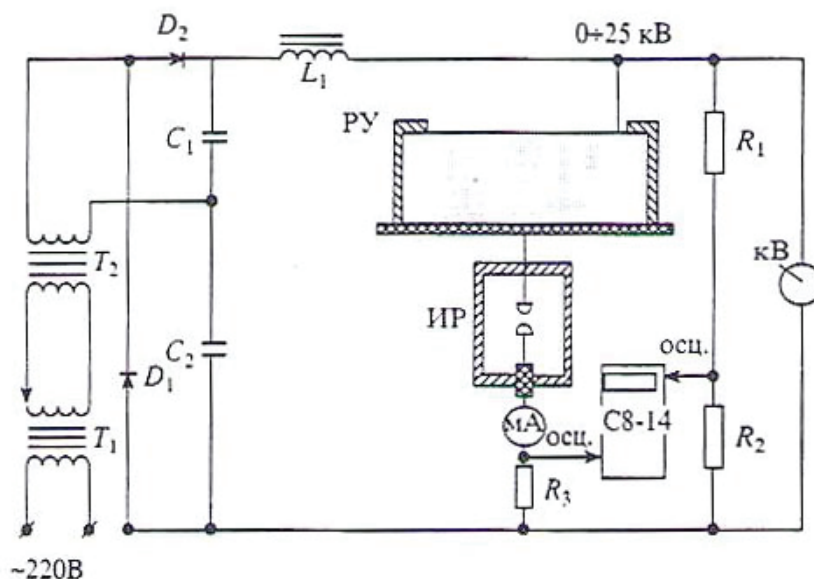


Рисунок 2.55 – Схема установки: T_1 – автотрансформатор, T_2 – высоковольтный трансформатор, D_1, D_2, C_1, C_2 – удвоитель напряжения, L_1 – дроссель, R_1, R_2 – делитель напряжения, кВ – киловольтметр, мА – микроамперметр, С8-14 – запоминающий осциллограф, ИР – инициирующий разрядник, РУ – разрядный узел

где μ_0, μ – магнитная постоянная и магнитная проницаемости сердечника; ω – число витков; D – средний диаметр сердечника; r, a – радиальный и аксиальный размеры среднего витка обмотки. Сравнение результатов расчета и эксперимента показали, что $L \sim L_p$

2.5.2. Формирование разряда. Формирование и горение аномальной разновидности положительной короны – ЛКФР возможно путем ее возбуждения в режиме автогенератора с включением индуктивности в цепь анода и инициирующего разрядника в качестве коммутирующего устройства в цепь катода. Параметры разряда регулируются в широких пределах изменением индуктивности в анодной цепи.

Путем визуальных и фотографических исследований выявлена последовательность развития ЛКФР: при возрастании напряжения искрового разряда, вплоть до пробоя разрядного промежутка, у коронирующего провода появляется слабое свечение, характерное для «классической» положительной короны. После первого искрового пробоя ИР корона быстро прорастает в область разрядного промежутка. При $U = 15$ кВ и $d = 30$ мм весь межэлектродный разрядный промежуток заполняется плазмой с диффузно-фиолетовым свечением (рисунок 2.56). На проводе наблюдаются точки, к которым стекаются заряды, формирующие ток коронного разряда.

С увеличением напряжения до $U = 17$ кВ, яркость свечения усиливается, ток возрастает до 600 мкА. При $U = 18,5$ кВ, $I = 1000$ мкА разряд становится практически однородным по всему объему (рисунок 2.56). Сечение разряда представляет собой овальную кривую, вершина которой расположена на коронирующем электроде, а ее ветви по нормали входят в плоскость второго электрода. Внутри овального разряда наблюдается периферийная зона фиолетового свечения, а центральная область имеет бледно-голубой цвет. В данных областях протекает основной ток разряда, а за их пределами ток обеспечивается медленным дрейфом ионов N^+, O^+, O . При замыкании электродов ИР ($h = 0$)

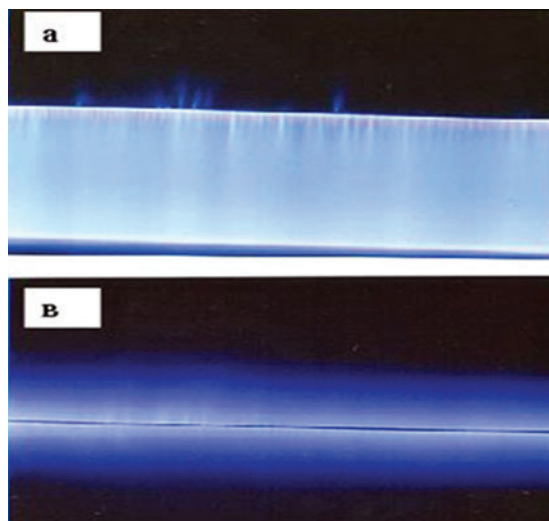


Рисунок 2.56 – Линейный коронный факельный разряд: $U = 17$ кВ, $d = 30$ мм, $h = 0,5$ мм, $L = 3640$ Гн, $I = 0,1$ мА (вид: а – спереди, б – сверху)

картина качественно меняется и в разрядном промежутке горит обычная «классическая» положительная корона ($U = 18,5$ кВ, $I = 100$ мкА) с характерным слабым свечением вокруг провода. При равных условиях ток в ЛКФР практически на порядок превышает ток положительной короны.

2.5.3. Характеристики разряда. Непосредственные наблюдения обнаруживают ряд прерывистых явлений, протекающих при горении в коронном факельном разряде: звуковой эффект в виде шипения, образование светящихся точек на коронирующей проволоке, появление отдельных стримеров, направленных по дугам от проволоки к противоположному электроду. Данные явления сопровождают разряд во всем диапазоне напряжений, подаваемых на разрядный контур, в отличие от обычного коронного разряда.

Вольт-амперные характеристики разряда. В результате измерений получены вольт-амперные характеристики (ВАХ) ЛКФР для различных межэлектродных расстояний (рисунок 2.57). Видно, что напряжение ВАХ снижается при уменьшении d с 30 до 20 мм. Возрастающая ветвь ВАХ при $I = 1250$ мкА переходит в падающую ветвь ВАХ. Тем не менее, разряд остается практически стационарным во всем диапазоне напряжения горения. Оценка устойчивости горения по Кауфману подтверждает экспериментальные наблюдения. Режим ЛКФР на падающем участке устойчив, так как угол между касательными к характеристике на данном участке и осью тока меньше, чем угол между прямой сопротивления и той же осью. Характеристики показывают, что максимальный ток разряда составляет 3200 мкА при напряжении 18,5 кВ и межэлектродном расстоянии 30 мм. Для сравнения, в классической положительной короне при замкнутом разряднике $h = 0$ и $d = 30$ мм реализуется максимальный ток 135 мкА, мощность 3 Вт, напряжение 21,5 кВ. Видно, что для данных условий электрический ток положительной короны практически в ~ 50 раз меньше, чем ток ЛКФР. Горение ЛКФР устойчиво при любых конфигурациях коронирующего электрода.

Стримерный механизм пробоя. Результаты показывают, что ЛКФР формируется и горит, минуя стадию классической положительной короны. При увеличении напряжения на разрядном контуре разряд не горит или зажигается внезапно после первого

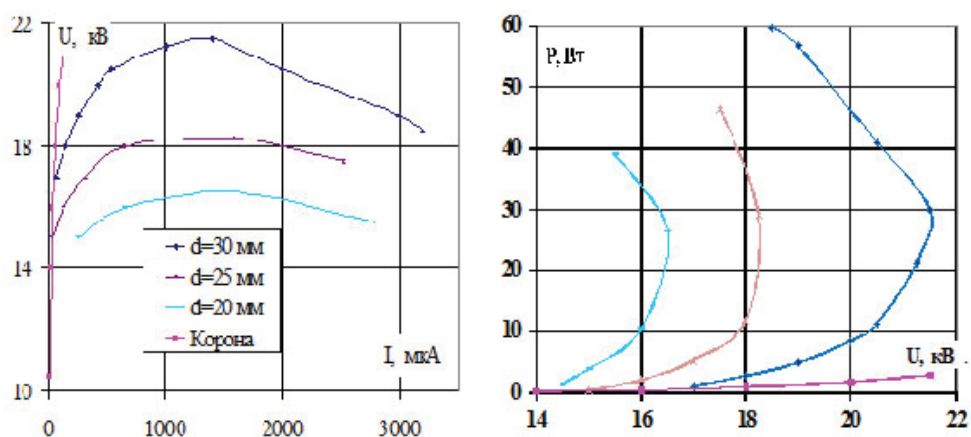


Рисунок 2.57 – Вольт-амперные характеристики и изменение мощности от напряжения в положительной короне ($h = 0, d = 30$ мм) и ЛКФР ($h = 0,5$ мм, $d = 20, 25, 30$ мм)

пробоя в разряднике и заполняет весь разрядный промежуток. Для классического коронного разряда применим таундсендовский механизм пробоя газового промежутка между электродами, связанный с размножением электронных лавин. Этот механизм работает при условии, когда произведение давления газа на расстояние между электродами составляет величину $pd < 200$ Тор*см. В интервале $pd = (200 \div 1000)$ наблюдаются лавинные и стримерные механизмы пробоя. В случае $pd > 1000$ Тор*см таундсендовский механизм пробоя неприменим. Поскольку экспериментальные исследования ЛКФР проводились в интервале $pd = (1520 \div 2280)$ Тор*см, то можно сделать вывод, что в данных разрядах реализуется стримерный механизм пробоя газового промежутка. Это и объясняет отсутствие плавного перехода от классического коронного разряда к ЛКФР.

Увеличение электрического тока разряда приводит к усилению интенсивности его свечения. Напряжение зажигания ЛКФР (15–17 кВ) определяется размерами разрядного промежутка 20–30 мм и зазором h в инициирующем разряднике. Этими условиями данный разряд отличается от коронного факельного разряда, горящего с диска, характеристики которого позволяют выделить область, как классической положительной короны, так и область аномальной разновидности короны – коронного факельного разряда.

Мощность разряда. Максимальная мощность ЛКФР порядка 60 Вт реализуется при напряжении 18,5 кВ и размерах разрядного промежутка 30 мм (рисунок 2.57). Обратный ход зависимостей обусловлен наличием падающей ветви вольт-амперной характеристики разряда. Сравнение мощностей положительной короны и ЛКФР показывает, что при равных напряжениях по мощности ЛКФР превосходит коронный разряд в 10 ÷ 40 раз.

Исследования показали, что погонная мощность ЛКФР достигает 2,7 Вт/см для коронирующего провода диаметром 0,5 мм. Удельная мощность составляет около 6 кВт/м² поверхности, покрытой этим разрядом. Очевидно, что ЛКФР обладает большими преимуществами в практическом применении. Условием технологического использования данного разряда является его стационарность во времени и возможность заполнения плазмой достаточно большего объема. Исследования показали, что сила тока не изменяется в течение 10 часов непрерывной работы.

Импульсный режим горения. Осциллографические измерения ЛКФР (рисунок 2.58) показали, что электрический ток ЛКФР носит импульсный характер.

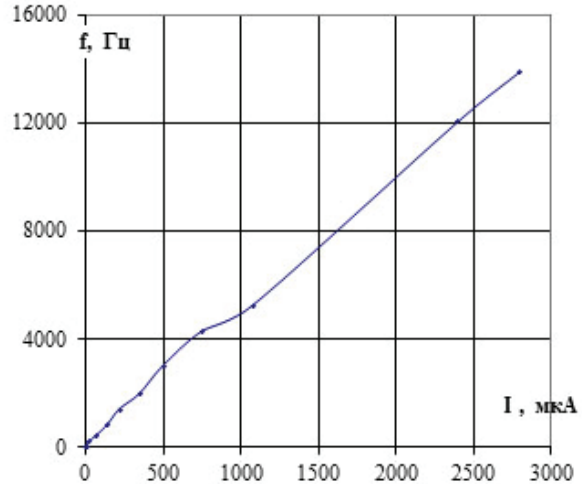
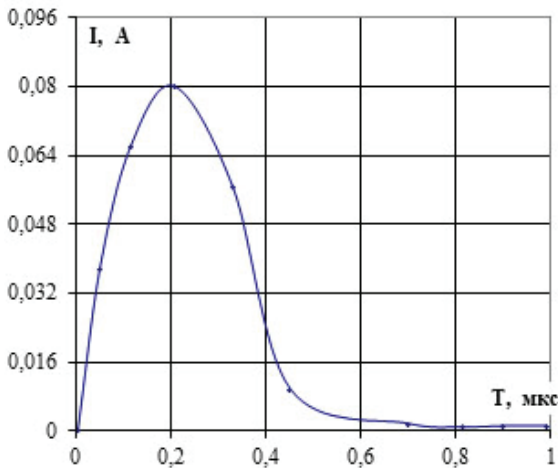


Рисунок 2.58 – Параметры импульса тока и изменение частоты импульсов от разрядного тока ЛКФР: $d = 30$ мм, $h = 0,5$ мм, $U = 18,5$ кВ, $I = 2,8$ мА, $V = 14$ кГц, $L = 3640$ Гн

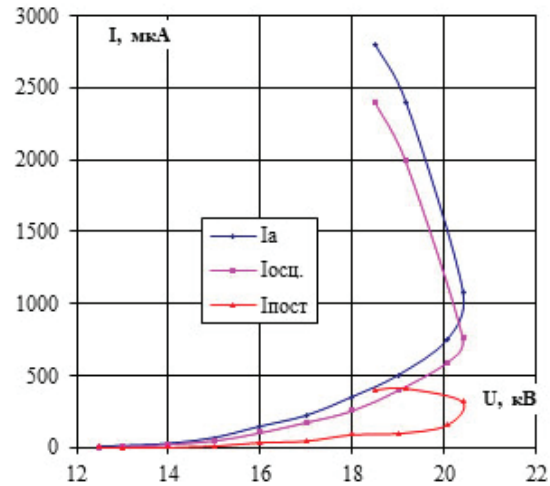
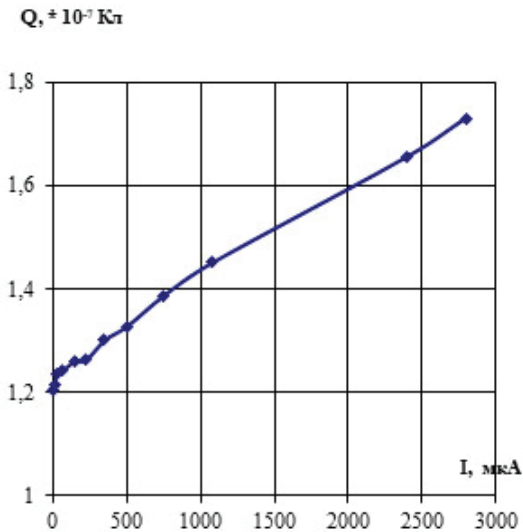


Рисунок 2.59 – Изменение заряда в импульсе от тока коронного разряда и вольт-амперные характеристики ($d = 30$ мм, $h = 0,5$ мм, $L = 3640$ Гн), измеренные: амперметром I_a (1); осциллографом I_{osc} (2) – импульсная, I_{const} (3) – постоянная составляющие тока

Длительность и амплитуда импульсов незначительно увеличиваются при возрастании тока разряда. За счет снижения сопротивления разрядного промежутка частота следования импульсов практически линейно растет с 10 Гц до 14 кГц (рисунок 2.59) при увеличении тока разряда с 5 до 2800 мкА. При возрастании напряжения существенно изменяются частота следования импульсов, сила тока и мощность в разряде, а заряд, переносимый одиночным импульсом, увеличивается незначительно – с 0,12 до 0,17 мкКл. Полагая, что импульсы тока соответствуют процессу роста стримеров в разрядном промежутке, оценим плотность зарядов в одиночном стримере, которая при средней длине стримера 3,5 см составляет $\sim 4,5 \cdot 10^{15}$ см³.

Наряду с импульсной составляющей тока I_{osc} (рисунок 2.59), в ЛКФР присутствует и постоянная составляющая I_{const} , которая составляет $\sim 10\%$ от всего разрядного тока.

Фактически I_{const} представляет собой электрический ток «классической» положительной короны, горящей в паузах между импульсами тока. Электрический ток I_{const} заряжает емкость катодной пластины и входную емкость осциллографа, включенную последовательно с катодом. При суммировании I_{OSC} с I_{const} получается ток I_a , измеренный амперметром. Отметим, что возможное протекание незначительного тока через иницирующий разрядник объясняется остаточной проводимостью среды после горения предыдущего разряда и обеспечивается за счет медленного дрейфа положительных ионов объемного пространственного заряда.

Роль иницирующего разрядника. Главной отличительной особенностью ЛКФР от классического коронного разряда является наличие иницирующего разрядника в электрической схеме источника питания.

Рассмотрим процессы, протекающие в промежутке между двумя импульсами тока. В этот момент напряжение на катоде и аноде достигает минимального значения и далее начинает возрастать. При этом вначале зажигается обычный коронный разряд, который некоторое время заряжает катод и емкость C , подключенную параллельно разряднику. Напряжение на катоде постепенно повышается до пробойного уровня (рисунок 2.60) и одновременно возрастает перепад напряжения между анодом и катодом. После достижения пробивного напряжения происходит искровой пробой промежутка.

При зазоре в разряднике $h = 0,4$ мм катод и емкость заряжается до 2,5 кВ. В момент искровой пробоя напряжение на катоде уменьшается на 1,7 кВ, с 2,5 до 0,8 кВ. Нулевых значений напряжения на катоде не наблюдается, так как сопротивление искрового канала не равно нулю. В период горения через искровой канал протекает одновременно ток разряда конденсатора и основной ток ЛКФР. После погасания искрового разряда конденсатор в разряднике вновь заряжается от 0,8 до 2,5 кВ, и цикл разряда-заряда повторяется.

При уменьшении напряжения на катоде на 1,7 кВ, перепад напряжения между анодом и катодом возрастает с 17,3 до 19 кВ, практически на ту же величину – 1,7 кВ. Изменение на 10 % амплитуды импульса тока оказывается достаточным для экспоненциального лавинного размножения электронов, которые переходят в стримеры и быстро увеличивают проводимость разрядного промежутка. Зажигается импульсная составляющая тока ЛКФР, достигающая максимального значения ~ 100 мА за время 150–300 нс.

При горении ЛКФР включаются, как минимум, три механизма, сдерживающие переход ЛКФР в искровой или дуговой разряды:

1) наличие дросселя в цепи питания разряда, который при малых длительностях импульса обладает большим индуктивным сопротивлением и не пропускает ток больше определенной величины;

2) за короткий период импульса тока 150–300 нс электрические заряды в емкости, расположенной за дросселем, не успевают прийти в движение, когда импульс тока в разряде заканчивается;

3) вблизи коронирующего катода возникает большой положительный пространственный заряд, понижающий напряженность электрического поля, и импульс тока сопровождается падением напряжения на коронирующем электроде.

Поскольку три механизма действуют одновременно, то размножение электронов и развитие стримеров уменьшается или даже прекращается. Электроны рекомбинируют с положительными ионами или прилипают к молекулам кислорода или озона. Большой пространственный заряд уходит к катоду и в цепи возникает слабый электрический ток

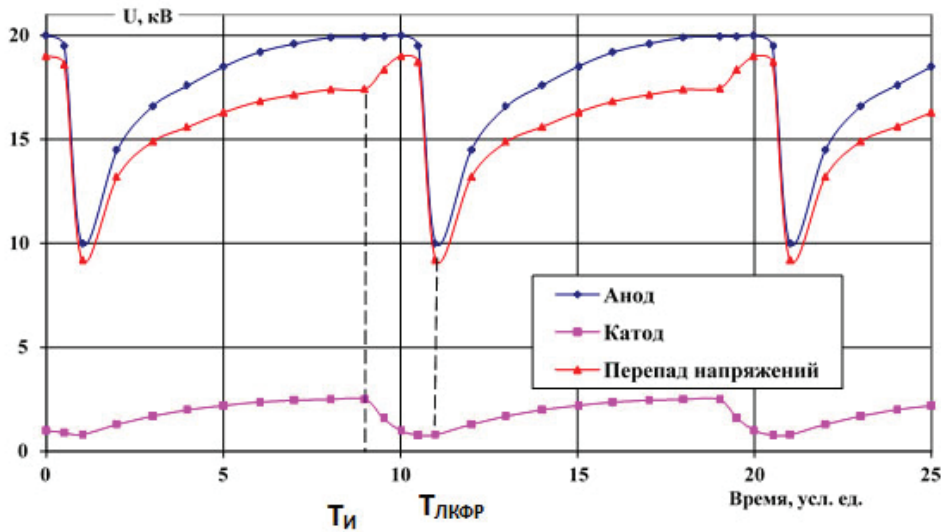


Рисунок 2.60 – Изменение напряжения на электродах и в области разряда: $T_{и}$ – период зажигания искрового разряда в разряднике, $T_{ЛКФР}$ – период окончания горения ЛКФР

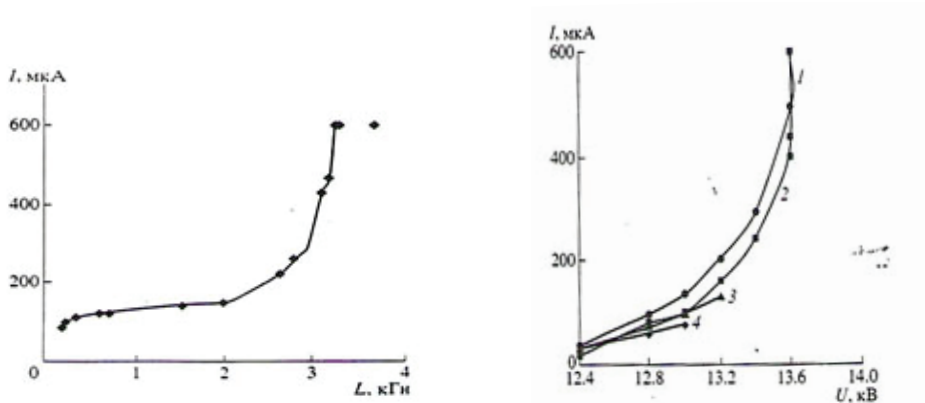


Рисунок 2.61 – Изменение максимального тока от индуктивности и вольт-амперные характеристики ЛКФР ($d = 15$ мм, $h = 0.5$ мм): $L = 3640$ (1); 3092 (2); 1990 (3); 198 (4) Гн

положительной короны, заряжающий конденсатор инициирующего разрядника до следующего пробоя. В промежутке времени между $T_{и}$ и $T_{ЛКФР}$ (рисунок 2.60) зажигается и горит ЛКФР, а в другие промежутки времени между импульсами тока горит классический коронный разряд или коронирующий провод не коронирует. Поэтому ЛКФР не переходит в дугу или искру.

Влияние индуктивности. Важную роль в формировании ЛКФР играет индуктивность, включенная последовательно в цепь разряда. Исследования влияния L в цепи разряда на его характеристики проводятся на разрядном контуре с размерами основного разрядного промежутка $d = 15$ мм. В этом случае переход ЛКФР в дуговой разряд происходит при меньших напряжениях и величине предпробойного тока, чем при $d = 30$ мм. В анодной цепи ЛКФР величина L регулируется в пределах 150–3640 Гн и оказывает существенное влияние на процессы, происходящие в разряде (рисунок 2.61).

При $L = 200$ Гн, $U = 13$ кВ и токах менее 50 мкА, ЛКФР переходит в дуговой разряд. С увеличением L до 3640 Гн, устойчивый ЛКФР существует до напряжений $\sim 13,6$ кВ

при $I = 40\text{--}600$ мкА. Изменение индуктивности приводит не только к увеличению максимального тока разряда, но и к возрастанию напряжения с 0,6 до 1,2 кВ. Это соответствует интервалу устойчивого горения ЛКФР при изменениях напряжения. Обобщенная кривая зависимости максимального тока разряда от величины индуктивности при неизменных параметрах ИР, носит ярко выраженный нелинейный характер (рисунок 2.61). Максимальный ток изменяется от 100 до 600 мкА, а насыщение происходит при $L = 3200$ Гн. Это позволяет увеличить ток в несколько раз при сохранении основных характеристик разряда.

Пульсирующий коронный факельный разряд в воздухе. Исследования характера протекания тока разряда, регистрация падения напряжения на безиндуктивном шунте в цепи разряда и последующий расчет величины тока проводились с помощью запоминающего осциллографа С8-14 (рисунок 2.62). По времени развертки осциллографа, чувствительности дифференциального усилителя, площади регистрируемого импульса определялись следующие характеристики разрядного тока: 1 – импульсная $I_{\text{имп}}$ и 2 – постоянная $I_{\text{пост}}$ составляющие тока; 3 – заряд, переносимый одиночным импульсом, Q ; 4 – частота следования импульсов тока; 5 – форма импульсов тока. Одновременно производилась регистрация среднего тока I_a с помощью микроамперметра типа М82.

В экспериментах разряд зажигался в воздухе при напряжениях до 20 кВ. Расстояние от коронирующей проволоки до противоположного электрода составляло 19 мм. Амплитуда импульсов тока во всем спектре сигнала при фиксированном напряжении на разряде может отличаться до двух раз. Амплитуда наблюдаемых на осциллограмме импульсов тока изменяется от 3 до 6,8 мА при напряжении на разрядном контуре 12 кВ (рисунок 2.63). В девяносто процентов случаев импульсы имеют амплитуду в интервале между первым и вторым импульсами. Для напряжения 12 кВ это составляет 3–4 мА. Наблюдается рост частоты импульсов тока с 10 до 7000 Гц при увеличении напряжения с 11 до 13 кВ (рисунок 2.64). При дальнейшем возрастании напряжения частота уменьшается до 6000 Гц и сохраняет данную величину до перехода коронного разряда в дуговой разряд.

Зависимость амплитудного значения тока от напряжения имеет вид, типичный для вольт-амперной характеристики коронного разряда (рисунок 2.65). Амплитуда тока изменяется от единиц мА (при низких напряжениях) до 200 мА при напряжении 20 кВ. Заряд, переносимый одиночным импульсом, увеличивается с $0,76 \cdot 10^{-9}$ Кл до $40 \cdot 10^{-9}$ Кл при изменении напряжения с 11 до 22 кВ (рисунок 2.66). При напряжении близком к пробойному напряжению, форма импульсов искажается (рисунок 2.67).

Импульсная составляющая тока находится следующим образом: с помощью осциллографа определяется частота импульсов и средний заряд, переносимый одиночным импульсом, а произведение заряда на частоту позволяет найти среднюю величину тока, переносимого импульсами. На рисунке 2.62 видно, что половина среднего тока приходится на импульсы, а остальная часть – на постоянную составляющую. Сумма импульсной и постоянной составляющей тока, в пределах погрешности эксперимента, совпадает с током, измеренным микроамперметром.

Полученные результаты объясняются лавинным и стримерным механизмами формирования коронного разряда. Коронирующий провод имеет дефекты (шероховатости, неровности, заусенцы), которые являются местами концентрации больших значений напряженности электрического поля и развития ионизационных процессов. Это приводит в данных областях к формированию лавин, стримеров и объемного заряда, что в конечном

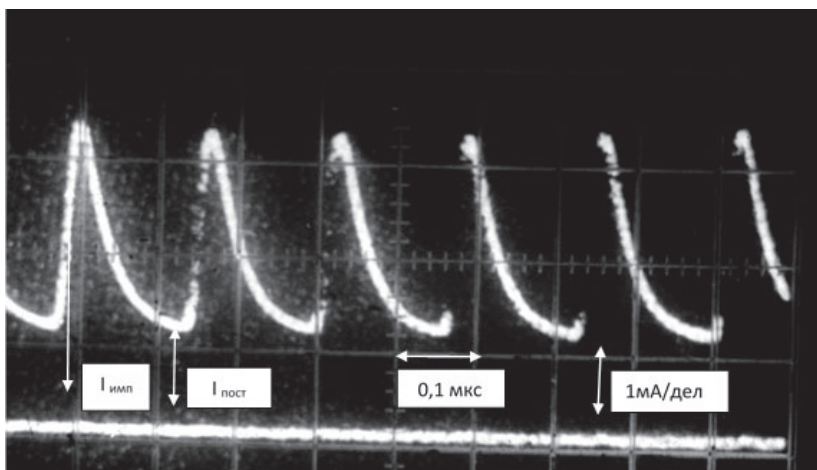


Рисунок 2.62 – Типичная осциллограмма импульса тока: импульсная ($I_{имп}$) и постоянная ($I_{пост}$) составляющие тока коронного разряда

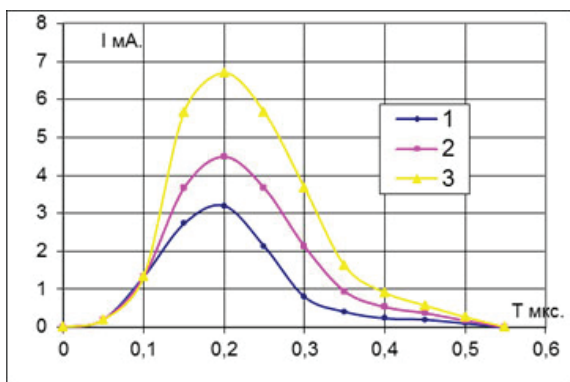


Рисунок 2.63 – Три характерных импульса, наблюдаемые в осциллограммах разрядного тока

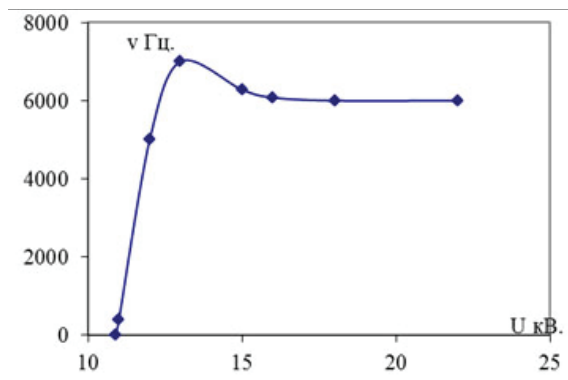


Рисунок 2.64 – Зависимость частоты следования импульсов тока от напряжения

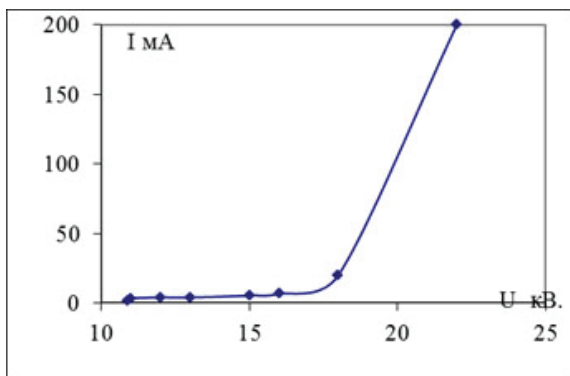


Рисунок 2.65 – Зависимость амплитудного значения тока от напряжения

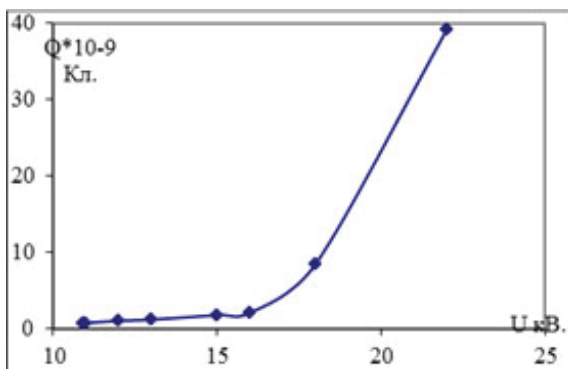


Рисунок 2.66 – Зависимость величины заряда, переносимого импульсом тока, от напряжения

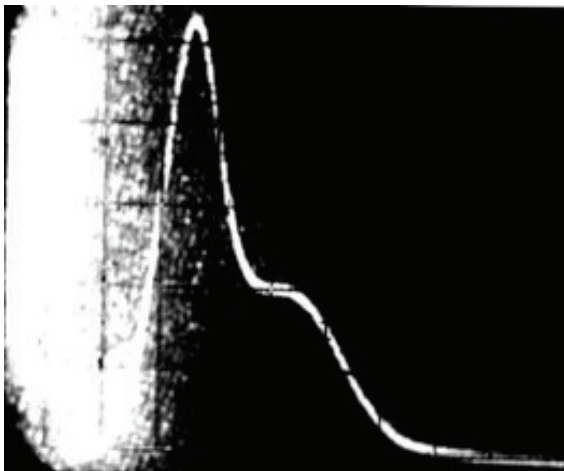


Рисунок 2.67 – Форма импульса тока при напряжениях, близких к пробойному напряжению

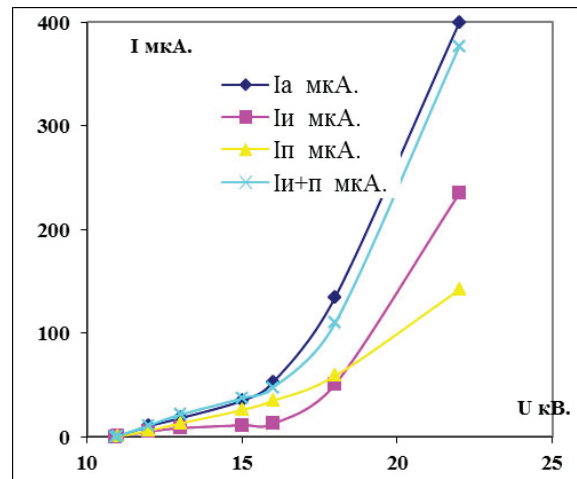


Рисунок 2.68 – Вольтамперные характеристики. Ток: I_a – регистрируемый микроамперметром, I_p – постоянная составляющая, I_u – импульсная составляющая, I_{u+p} – сумма импульсной и постоянной

итоге сказывается на амплитуде, частоте и форме наблюдаемых импульсов тока. Стримеры, представляющие собой нитевидные разряды, простираются вглубь разрядного промежутка [15, 26]. При низких напряжениях в положительной короне образуются лавины, возникающие от коронирующей проволоки, где реализуются условия для отрыва электронов ($E/p > 90$ В/см/мм ртутного столба). По мере роста напряжения лавины увеличиваются в размерах и распространяются в боковых направлениях от коронирующего провода. За счет фотоионизации возникают вспышечные импульсы, наблюдаемые в виде слабого свечения, покрывающего коронирующий провод.

Импульсы на осциллограммах тока короны вызваны образованием облака положительных ионов в разрядном промежутке. Когда лавины создают положительные ионы в количестве, достаточном для уменьшения поля вблизи коронирующего провода, то дальнейшего образования лавин не происходит и разряд прекращается. В зависимости от напряжения облако положительных ионов расплывается за промежуток времени 0,0001–0,1 с. Это происходит до тех пор, пока электрическое поле вблизи коронирующего провода не станет достаточно большим, чтобы вновь вызвать образование лавин. Постоянная составляющая тока коронного разряда обусловлена медленным дрейфом положительных и отрицательных ионов в разрядном промежутке.

Стабильность горения ЛКФР. На устойчивость горения коронного разряда влияют многие факторы: величина LCR-контура источника питания, напряжение, межэлектродное расстояние, состав газа, содержание воды в воздухе или кислороде, поверхность коронирующих электродов, температура. Исследования показали, что дестабилизирующим фактором горения является оседание на электроды образующейся в разряде азотной и азотистой кислоты с последующим образованием солей металлов $Cu(NO_3)_2$. Средняя скорость снижения силы тока во времени составляет порядка 10 мкА/час. Полной стабилизации не происходит из-за оседания на электродах высших окислов азота N_2O_5 .

Осушенный силикагелем воздух способствует стабилизации горения коронного факельного разряда. Для неосушенного воздуха прослеживаются длинные периодические колебания тока, связанные с изменением влажности атмосферного воздуха в течение дня. В осушенном воздухе электрический ток ЛКФР примерно на 20 % выше, чем во влажном неосушенном воздухе. Это обусловлено наличием паров воды в воздухе, электроотрицательные молекулы которого приводят к захвату свободных электронов в зоне разряда.

Горение ЛКФР недостаточно стабильно во времени: через 10–50 минут наблюдается падение силы тока вплоть до полного погасания разряда, или среднее значение силы тока проходит через минимум и далее увеличивается или остается на одном уровне. При этом наблюдаются как короткопериодичные (секунды, минуты) колебания силы тока с амплитудой около ~5 % от среднего значения, так и долгопериодичные (десятки минут) с амплитудой около ~ 20 %.

2.5.4. Физика горения разряда. Формирование и горение ЛКФР определяются процессами, протекающими при заряде катодной пластины. При подаче высокого напряжения транспортировка положительного заряда на поверхность катода осуществляется положительными ионами, присутствующими во внешней области «классической» положительной короны. Удаленный катод со слабым электрическим полем практически не принимает участия в размножении электронов. Воспроизведение электронов обеспечивают вторичные процессы в зоне коронирующего проводника [26]. Положительные ионы на подлете к катоду нейтрализуются путем вырывания из него электронов. Энергия возбуждения расходуется на излучение и соударение с окружающими молекулами газа. Коэффициент вторичной эмиссии на поверхности катода незначителен. Нейтрализация ионов идет до тех пор, пока катод не зарядится до потенциала, при котором налетающий ион не сможет вырвать электрон из металла. Процесс зарядки конденсатора продолжается за счет того, что налетающие ионы удерживаются у катода силами электростатического притяжения и формируют положительный объемный заряд, плотность которого больше, чем в разрядном промежутке.

После того, как напряжение на катодной пластине достигнет напряжения пробоя иницирующего разрядника, катодная пластина разряжается до низкого потенциала. При пробое разрядника в основной разрядный промежуток эмитируется большое количество электронов, часть из которых рекомбинирует с объемным зарядом положительных ионов у катода, часть прилипает к кислороду, а остальные – участвуют в формировании электронных лавин с последующим переходом в стримеры в направлении анода. Рекомбинация объемного заряда на катодной пластине приводит к увеличению проводимости разрядного промежутка за счет следующих процессов:

1. В момент пробоя иницирующего разрядника происходит значительное увеличение коэффициента γ – эмиссии электронов за счет повышения вероятности передачи энергии рекомбинации электронам металла;

2. После пробоя иницирующего разрядника происходит быстрая нейтрализация объемного положительного заряда, тогда как прикатодный объемный заряд практически не успевает сдвинуться с места. Реализуется подобие конденсатора, обкладками которого являются катод и слой положительных ионов над его поверхностью.

Эта ситуация сходна с заряженной диэлектрической пленкой на поверхности катода, где холодная эмиссия начинается уже при $E \approx 10^6$ В/см, быстро возрастает при $E \approx 10^7$ В/см и плотности тока 10^6 А/см² [26]. В результате эмиссии электронов проводимость

разрядного промежутка резко возрастает, объемный заряд уменьшается и перестает ограничивать ток коронного разряда. За время ~ 300 нс через проводящий промежуток происходит разряд конденсатора, образованного коронирующим электродом относительно катода и земли. Ток разряда конденсаторов суммируется с током «классической» положительной короны. Большая величина индуктивности в цепи анода ограничивает скорость нарастания электрического тока через разряд, «джоулево» тепловыделение уменьшается, сопротивление возрастает.

Частота повторения импульсов тока через разряд зависит от напряжения питания, напряжения пробоя иницирующего разрядника и емкости катодной пластины. Период следования импульсов оценивается стандартным выражением:

$$\tau = R_x C_2 \ln \left(\frac{U_n}{U_n - U_2} \right),$$

где R_x – полное сопротивление цепи заряда емкости катодной пластины; C_2 – емкость конденсатора; U_n , U_2 – напряжение источника питания и напряжение пробоя иницирующего разрядника [53].

При подаче постоянного напряжения от источника питания ток в ЛКФР носит импульсный характер. Амплитуда импульсов, их длительность и частота повторения регулируются изменениями индуктивности и напряжением пробоя иницирующего разрядника. Стационарный режим горения ЛКФР приобретает свойства импульсного коронного разряда.

2.6. Синтез озона в линейном коронном факельном разряде

В настоящее время технология синтеза озона в ЛКФР практически не изучена, так как нет озонаторов на данном типе разряда. Поэтому ниже приводится описание экспериментальных исследований по синтезу озона из воздуха и кислорода в ЛКФР на разработанной установке (рисунок 2.69) [49, 50].

2.6.1. Устройство для синтеза озона. Вода для охлаждения зоны разряда подается через ротаметр и устройство для капельного разрыва струи в катод с водяным охлаждением. Воздух или кислород из баллонов вводятся через ротаметр для газа внутрь диэлектрического корпуса разрядного блока. Коронирующий проволочный электрод – анод из нихрома диаметром 0,5 мм, расположен параллельно катоду, расстояние между которыми изменяется от 10 до 30 мм. На анод подается высокое напряжение, регулируемое в интервале от 0 до 25 кВ.

Воздух или кислород поступают в озонатор. При достаточном для зажигания разряда напряжении в плазме ЛКФР при поступлении газа вырабатывается озон. Выделяющаяся в зоне разряда тепловая энергия через стенку катода нагревает проточную воду, которая проходит через устройство капельного разрыва на выходе из охлаждаемого водой катода и собирается в емкость. Катод подсоединяется к заземленному проводу через иницирующий разрядник. Поскольку катод находится под высоким пульсирующим напряжением, то необходимо устройство для капельного разрыва струи воды на входе в охлаждаемый водой катод и на выходе из него. Величина напряжения и частота следования импульсов зависят от напряжения на аноде и от зазора в разряднике. Если капельного разрыва нет, то катод оказывается заземленным через воду. При этом иницирующий

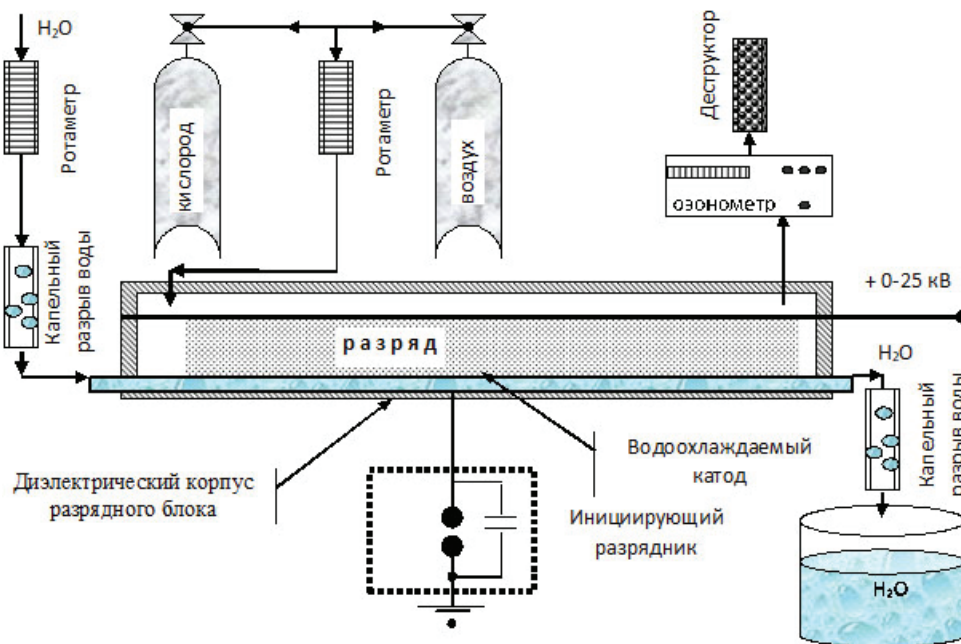


Рисунок 2.69 – Схема экспериментальной установки для синтеза озона из кислорода или воздуха

разрядник перестает работать, ЛКФР гаснет и в камере реализуется условие для горения обычной положительной короны.

Исследование синтеза озона в ЛКФР проводилось при атмосферном давлении с использованием неосушенного воздуха или кислорода при температуре 20 °С. Изменяемыми параметрами являлись: расход газа (0,037–0,55 м³/час), размеры разрядного промежутка (20–30 мм), напряжение на разрядном контуре (0–25 кВ).

2.6.2. Синтез озона из воздуха. При межэлектродном зазоре $d = 30$ мм результаты измерений ЛКФР (рисунок 2.70) показали, что вольт-амперные характеристики имеют вид, характерный для горения коронного факельного разряда с поверхности диска (рисунок 2.71). С увеличением расхода воздуха уменьшается кривизна наклона кривых. Зависимость мощности разряда от приложенного напряжения (рисунок 2.72) имеет аналогичный вид как при горении коронного факельного разряда. Это объясняется тем, что при увеличении расхода воздуха уменьшается концентрация озона (рисунок 2.73), хотя производительность озона при этом возрастает (рисунок 2.74). При меньшей концентрации озона и постоянном напряжении реализуются сильные электрические токи. Если же расход воздуха небольшой и накапливается высокая концентрация озона, то электроны в разряде активно прилипают к молекулам озона, как к более электроотрицательному газу, чем кислород. При этом сила электрического тока снижается и для поддержания постоянного значения тока необходимо увеличить напряжение.

Чем больше расход воздуха и приложенное напряжение, тем выше производительность генерации озона (рисунок 2.74). Следует отметить, что промышленные озонаторы работают в интервале удельных энергетических затрат 20–35 кВт*ч/кгО₃, а результаты измерений (рисунок 2.75) показали, что генерация озона в ЛКФР находится в данном интервале. Некоторое расхождение кривых в области 13–17 кВ и удельных энергетических затрат около 20 кВт*ч/кг связано, вероятно, с высокой погрешностью измерения

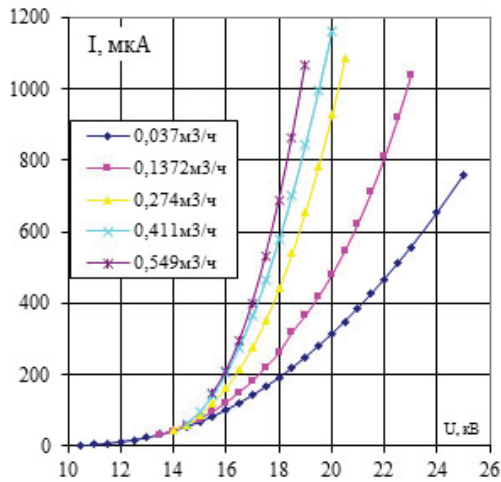


Рисунок 2.70 – ВАХ ЛКФР для различных расходов газа ($d = 30$ мм)

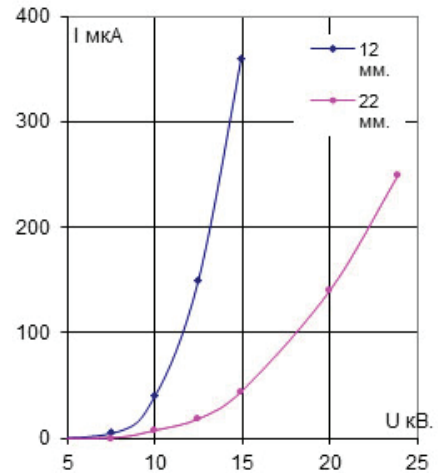


Рисунок 2.71 – ВАХ ЛКФР с диска для различных расстояний d

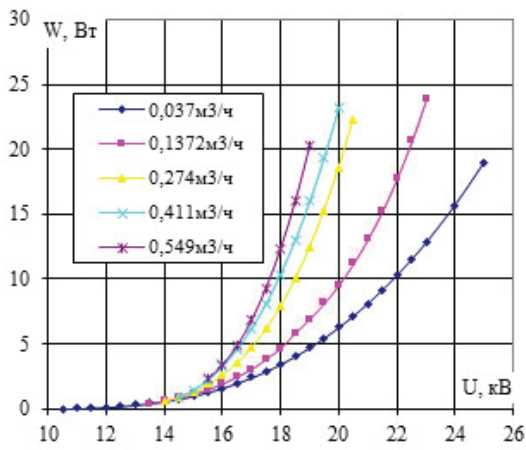


Рисунок 2.72 – Зависимость мощности ЛКФР от U , кВ для различных расходов газа

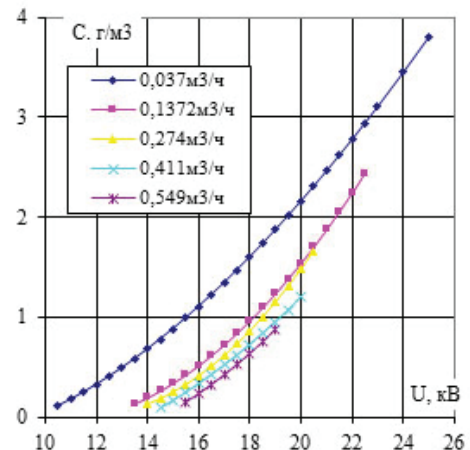


Рисунок 2.73 – Зависимость концентрации озона от U , кВ различных расходов газа

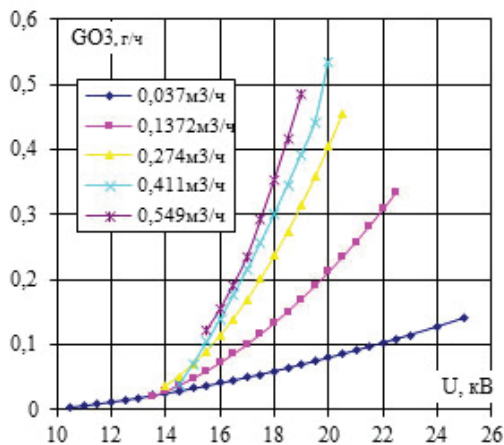


Рисунок 2.74 – Зависимость производительности по озону от U , кВ

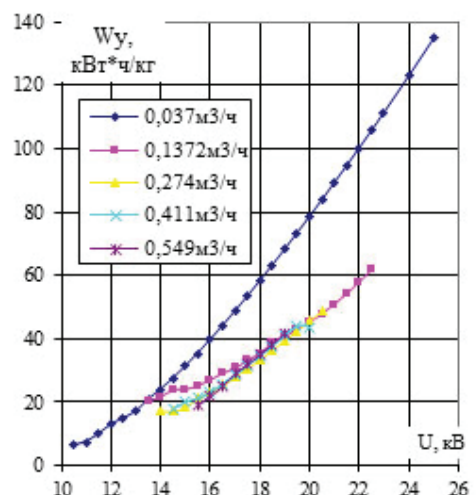


Рисунок 2.75 – Зависимость удельных энергетических затрат от напряжения

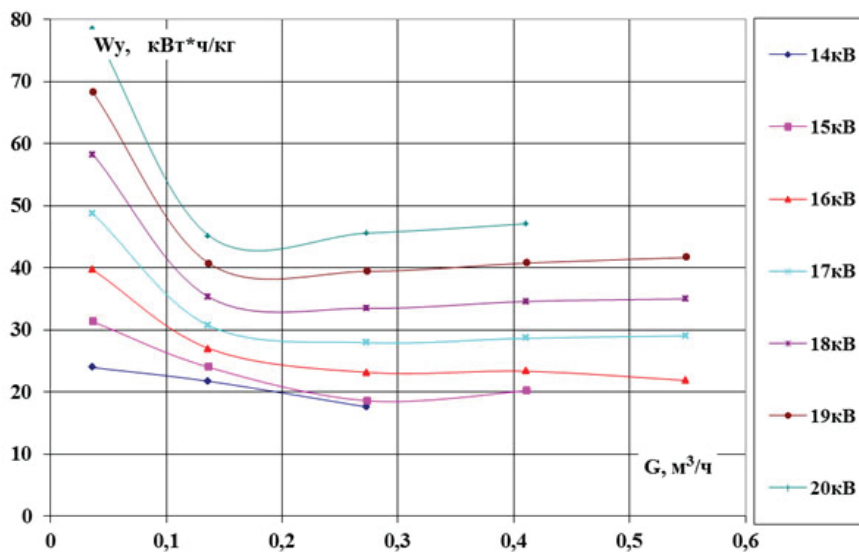


Рисунок 2.76 – Зависимость удельных энергетических затрат от расхода воздуха

концентрации озона при указанных напряжениях. Зависимости на рисунке 2.73 показывают, что в данной области напряжений озон регистрируется озонометром, работающим вблизи предела своей чувствительности. Следует отметить, что кривые для расхода воздуха $0,037 \text{ м}^3/\text{ч}$ ложатся не так, как остальные кривые (рисунки 2.73 и 2.75).

В области расхода воздуха свыше $0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$, удельные энергетические затраты, идущие на синтез озона, при одном и том же напряжении практически не зависят от расхода (рисунок 2.76). Это объясняется тем, что при увеличении расхода воздуха одновременно нелинейно возрастает и производительность генерации озона, так что повышенная производительность в существенной мере компенсирует уменьшение концентрации озона за счет его разбавления большим расходом воздуха.

В области расхода меньше $0,1372 \text{ м}^3/\text{ч}$, наблюдается резкое возрастание удельных энергетических затрат с увеличением приложенного напряжения. Очевидно, что чем выше напряжение, тем больше озона, образовавшегося в разряде, разрушается этим же разрядом.

Поэтому для каждого расхода воздуха существует свое оптимальное напряжение, при котором генерация озона происходит с экономически приемлемыми энергетическими затратами.

Если взять отношение мощности в разряде к расходу воздуха, прокачиваемого через разряд, то получается кинетическая кривая синтеза озона в ЛКФР. На рисунке 2.77 видно, что при любых межэлектродных расстояниях не нужно делать большие энергетические затраты в обрабатываемый воздух, так как энергия возрастает существенно, а концентрация озона практически не увеличивается.

2.6.3. Влияние межэлектродного расстояния на синтез озона. Рассмотрим горение ЛКФР на воздухе с расходом $0,037 \text{ м}^3/\text{ч}$, протекающего через зону разряда с межэлектродными расстояниями $d = 20, 25, 30 \text{ мм}$ и зазором в разряднике $0,4 \text{ мм}$. Анализ экспериментальных данных показывает существенное влияние межэлектродного расстояния на характеристики разряда. Установлено, что максимальные значения тока, мощности, концентрации, удельных энергетических затрат и производительности в разряде

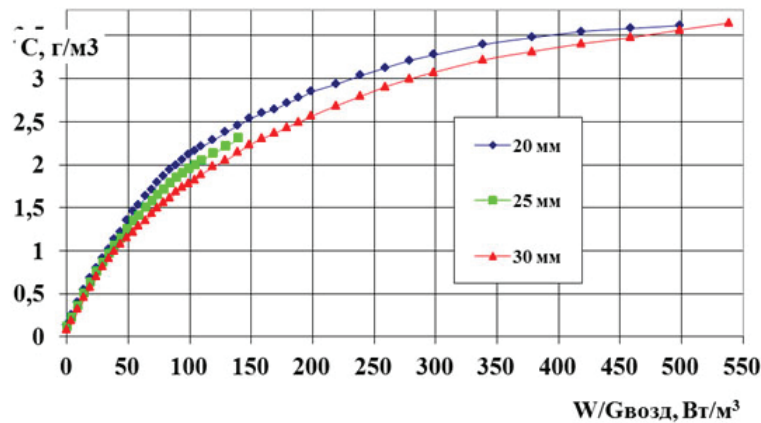


Рисунок 2.77 – Кинетические кривые синтеза озона в ЛКФР в неосушенном воздухе, $d = 30$ мм

достигаются при наименьшем межэлектродном расстоянии $d = 20$ мм (рисунки 2.78–2.81). Увеличение расстояния на каждые 5 мм сопровождается уменьшением силы тока, мощности в разряде, концентрации озона и производительности установки. Максимальная удельная мощность на воздухе достигает 60 Вт/м. Ограничением сближения электродов в данном случае ближе, чем на 20 мм, является усиление неустойчивости горения, когда разряд срывается в дугу или искру.

Чем дальше стоят электроды в зоне разряда, тем экономичнее происходит синтез озона. Ограничением на увеличение межэлектродного расстояния является напряжение источника питания, при котором разряд зажигается и, несмотря на повышение концентрации озона, продолжает гореть. При напряжениях, близких к напряжению пробоя межэлектродного промежутка искровым или дуговым разрядами, удельные энергетические затраты, идущие на синтез озона быстро возрастают.

При напряжениях вблизи напряжения зажигания разряда (рисунок 2.82) наблюдаются наименьшие удельные энергетические затраты, которые стремятся к термохимическому пределу – 0,836 кВт*ч/кг озона. Это соответствует тому, что весь озон выносится из зоны разряда без разрушения. С точки зрения экономии энергии, синтез озона выгодно проводить при напряжениях вблизи напряжения зажигания ЛКФР. Для достижения высокой производительности озона необходимо увеличивать габариты разрядного блока и период нахождения воздуха в зоне разряда.

Оптимальный режим горения коронного разряда по концентрации, производительности, удельным энергетическим затратам и габаритам озонатора находится в промежутке между напряжением зажигания и напряжением перехода ЛКФР в дугу или искру.

2.6.4. Синтез озона из кислорода. Рассмотрим горение коронного разряда в кислороде при аналогичных параметрах, как и в воздухе. Качественно все установленные выше закономерности при горении ЛКФР в кислороде остаются без изменения. Количественно коронный разряд в кислороде зажигается при более высоких напряжениях. Например, при $d = 30$ мм разряд на воздухе зажигается при 10,5 кВ (рисунок 2.78), а на кислороде при 16 кВ (рисунок 2.83), т. е. задержка в зажигании разряда достигает 5,5 кВ. Это объясняется тем, что к молекулам кислорода, как к более электроотрицательному газу, прилипает больше электронов, чем к воздуху. В разрядном промежутке оказывается меньше электронов, производящих ионизацию газа. Поэтому для зажигания и поддержания

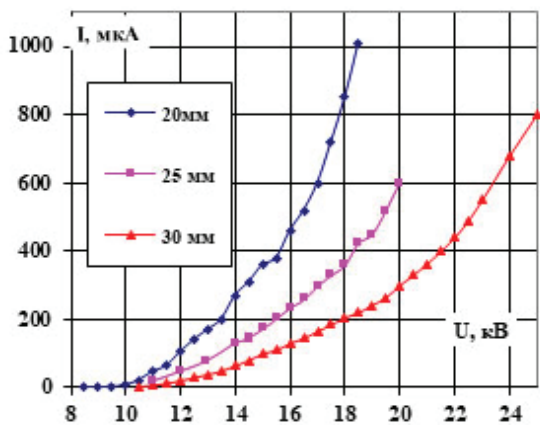


Рисунок 2.78 – ВАХ при различном межэлектродном расстоянии d при горении ЛКФР в воздухе

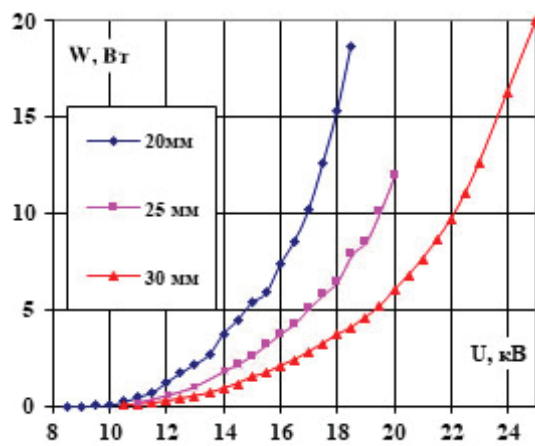


Рисунок 2.79 – Зависимость мощности от напряжения при различном d и горении ЛКФР в воздухе

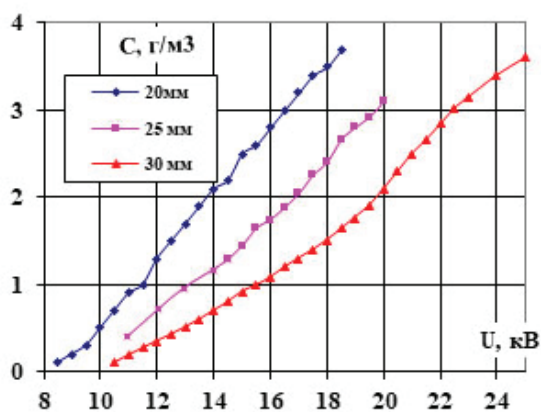


Рисунок 2.80 – Зависимость концентрации от напряжения при различном d и горении ЛКФР в воздухе

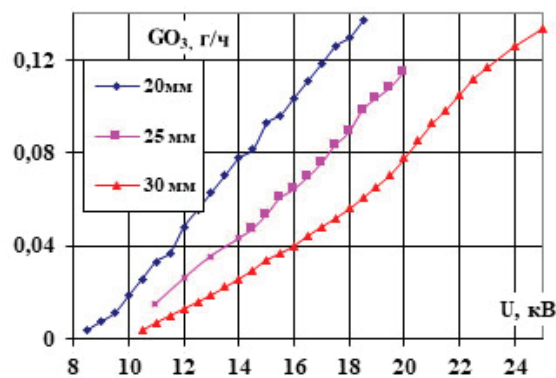


Рисунок 2.81 – Зависимость производительности от напряжения при различном d и горении ЛКФР в воздухе

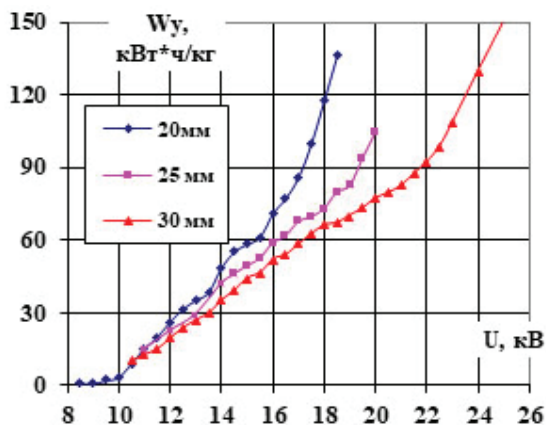


Рисунок 2.82 – Зависимость удельных энергетических затрат озонатора на воздухе от напряжения при различных d

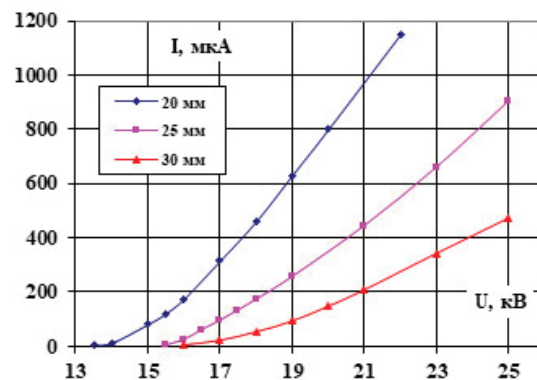


Рисунок 2.83 – ВАХ при различном межэлектродном расстоянии d при горении ЛКФР в хлороде

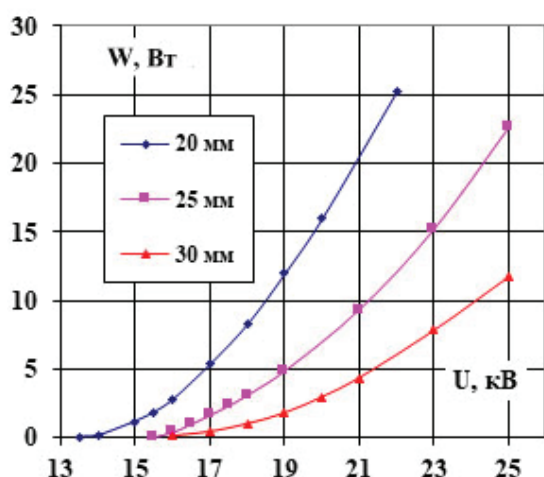


Рисунок 2.84 – Зависимость мощности озонатора на кислороде от напряжения при различном d кислороде

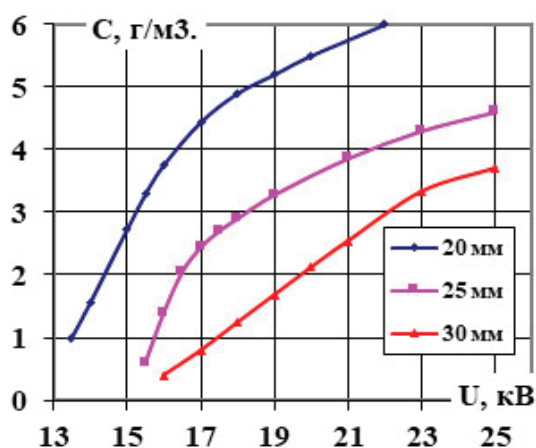


Рисунок 2.85 – Зависимость концентрации озонатора на кислороде от напряжения при различном d

горения коронного разряда требуются более высокие напряжения, а сила электрического тока и мощность в разряде (рисунки 2.83, 2.84) возрастают не так интенсивно, как в воздухе (рисунки 2.78–2.79). При напряжениях, близких к искровому пробое в кислороде, реализуются более высокие значения тока и мощности, чем в воздухе.

С увеличением напряжения концентрация озона в кислороде возрастает интенсивнее, чем в воздухе (рисунки 2.83–2.85). Эта же закономерность наблюдается и для производительности по озону (рисунок 2.86).

Удельные энергетические затраты при равных напряжениях на кислороде оказываются в 1,5–3 раза меньше, чем в воздухе. При равных мощностях и межэлектродных расстояниях производительность и концентрация озона на кислороде примерно в полтора раза больше, чем на воздухе (рисунок 2.88). Оптимальное значение удельной мощности в кислороде при экономически приемлемых удельных энергетических затратах достигает 10 Вт/м коронирующего проводника. При этом достигается концентрация озона в 2–4 г/м³ и удельная производительность 0,2–0,45 г/ч на метр коронирующего проводника. По сравнению с воздухом, в кислороде достигается в 2–4 раза более высокая концентрация озона.

С увеличением межэлектродного расстояния в зоне разряда разряд горит более устойчиво и реже переходит в дугу или искру, что увеличивает экономичность синтеза озона. Вдали от коронирующего электрода энергия электронов относительно мала и недостаточна для разрушения молекул озона, а затрачивается на синтез озона. Условно эту зону можно назвать «зоной синтеза озона». Вблизи коронирующего электрода энергия электронов может оказаться настолько большой, что электроны при столкновении с молекулами озона преимущественно разрушают их и эта область называется «зоной разрушения озона». Поэтому при одном и том же напряжении, чем в большем объеме горит разряд (большее расстояние между электродами), тем меньшую долю в этом объеме занимает зона разрушения озона и тем более экономично происходит синтез озона.

При напряжениях, близких к напряжению зажигания ЛКФР, зона разрушения озона настолько плотно прилегает к коронирующему электроду, что ее объемом, по сравнению

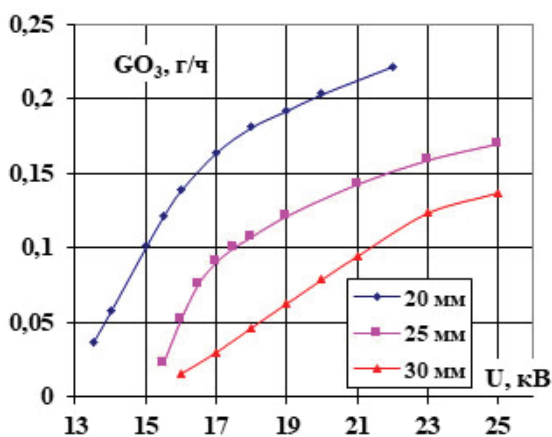


Рисунок 2.86 – Зависимость концентрации озонатора на кислороде от напряжения при различном d

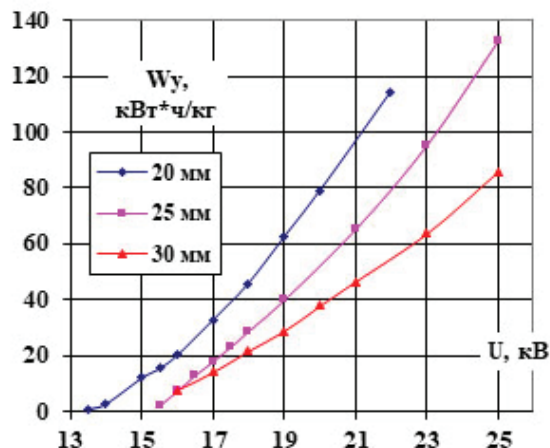


Рисунок 2.87 – Зависимость удельных энергетических затрат озонатора на кислороде от напряжения при различном d

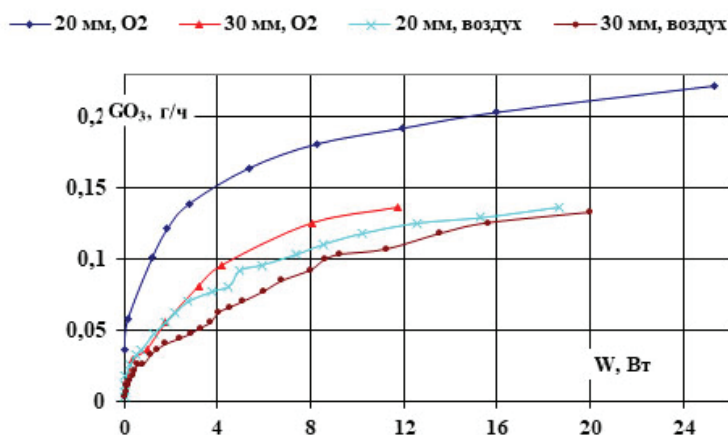


Рисунок 2.88 – Зависимость производительности синтеза озона в озонаторе от мощности, вкладываемой в разряд

с объемом разряда, можно пренебречь. Этому способствует больший диаметр коронирующего электрода, на котором горит ЛКФР, по сравнению с обычным коронным разрядом. Увеличение диаметра коронирующего электрода сокращает напряженность поля вблизи него и объем зоны разрушения озона.

Осциллографические исследования показали, что в пределах промежутка времени, который составляет десятки процентов от периода между импульсами тока, напряжение в зоне разряда оказывается существенно ниже среднего значения. Поэтому зона разрушения озона в этот период существенно уменьшается.

За период импульса тока в непосредственной близости от коронирующего электрода образуется большой пространственный заряд положительных ионов. Ионы, при их коллективном движении к противоположному электроду, сталкиваются с нейтральными молекулами, передают им свой импульс и создают «электрический ветер». Поэтому в период времени, следующий за импульсом тока, вблизи коронирующего проводника образуется зона разрежения воздуха. Особенно сильно этот эффект проявляется при горении ЛКФР с проволоки, натянутой вдоль оси цилиндра. В этом случае может создаваться

цилиндрическая ударная волна и скорость электрического ветра вблизи коронирующего проводника, возможно, превышает скорость звука. Поэтому зона разрушения озона оказывается в области разрежения, где количество молекул озона незначительно, а стало быть, и их разрушение незначительно.

2.7. Моделирование линейного коронного факельного разряда

2.7.1. Физическая модель коронного разряда. Для моделирования процессов, протекающих в поле линейного коронного факельного разряда, рассматривается коронирующий электрод с положительным потенциалом, расположенный параллельно заземленной плоскости (рисунок 2.56). Равновесная газодинамическая модель коронного разряда [31], описанная в п. 2.2.3, позволяет качественно показать распределение усредненной температуры разряда, оценить напряженность электрического поля, определить потоки газа, тепла и скорость электрического ветра от коронирующего электрода.

Неравновесность плазмы в коронном факельном разряде проявляется в заметном отрыве температур электронов и тяжелых частиц. Температура электронов T_e в коронном разряде составляет несколько электронвольт, в то время как температура тяжелых частиц T (молекул, атомов, ионов) не превышает 0,1 электронвольта. Максимальный отрыв температуры электронов от температуры тяжелых частиц можно оценить из баланса энергии, предполагая, что все выделенное в коронном разряде «джоулево тепло» передается тяжелым частицам путем столкновения с электронами [35]:

$$\vec{j}_e \vec{E} = \alpha (T_e - T), \quad T_e = T + \frac{2\sigma m_h E^2}{3k_B n_2 v_{2h} m_2}.$$

Поскольку температура электронов «отслеживает» изменение напряженности электрического поля, то в коронном разряде (из-за больших E) наблюдается заметная температурная неравновесность плазмы ($T_e \gg T$), а степень ионизации неравновесной плазмы всегда ниже равновесной. Это связано с тем, что в неравновесной плазме существуют каналы рекомбинации заряженных частиц, скорость протекания которых на порядки выше, чем при обратных процессах ионизации. Градиенты температуры и концентрации частиц вызывают диффузионные потоки, приводящие к пространственному перераспределению плотности плазмы и степени её ионизации по сравнению с равновесным состоянием. Ионизация нейтральных частиц происходит в сильных электрических полях, особенно вблизи поверхности коронирующего электрода. Из зоны ионизации во внешнюю область разряда движутся положительные ионы, а электроны ускоряются по направлению к коронирующему электроду и уходят из облака положительных ионов. Образующийся во внешней зоне объемный заряд уменьшает электрическое поле вблизи коронирующего электрода, тормозит развитие процессов ионизации и смещает её к поверхности линейного токопровода.

Поэтому для корректного описания характеристик линейного коронного факельного разряда необходимо применять неравновесную модель плазмы [54], учитывающую термическую, ионизационную и химическую неравновесности плазмы.

2.7.2. Математическая модель. Для теоретического моделирования физических процессов, протекающих в области линейного коронного факельного разряда (рисунок 2.56), предполагается, что существует распределение Максвелла электронов по скоростям, учитываются упругие и неупругие столкновениями частиц.

Система уравнений. Для математического описания ЛКФР воспользуемся уравнениями двухтемпературной многокомпонентной газовой динамики [55, 33, 36], которые включают баланс потоков массы, заряда, импульса и энергии для каждой компоненты плазмы (электронов, ионов, нейтральных и возбужденных частиц) и уравнениями Максвелла для электромагнитного поля.

Закон сохранения массы:

$$\frac{\partial n_k m_k}{\partial t} + \nabla \cdot (n_k m_k \vec{V}_k) = S_k m_k, \quad \sum_k S_k m_k = 0.$$

Закон сохранения заряда:

$$\frac{\partial n_k e_k}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{j}_k = S_k e_k, \quad \sum_k S_k e_k = 0.$$

Закон сохранения импульса:

$$\frac{\partial \rho_k \vec{V}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \vec{V}_k \vec{V}_k) = -\nabla P_k + \nabla \cdot \vec{\tau}_k + \vec{j}_k \times \vec{B} + e_k n_k \vec{E} + \sum_{i \neq k} n_k v_{ki} m_{ki} (\vec{V}_i - \vec{V}_k) + m_k \vec{V}_k S_k.$$

Закон сохранения энергии:

$$\frac{\partial n_k h_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k h_k \vec{V}_k) = \nabla \cdot (\lambda_k \nabla T_k) + \vec{j}_k \cdot \vec{E} + \sum_{i \neq k} n_k v_{ki} \Delta \varepsilon_{ki} - W_k^{\text{C}} + Q_k^{\text{EXC}}.$$

Уравнения Максвелла:

$$\text{div} \varepsilon_0 \vec{E} = \sum_k e_k n_k, \quad \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \text{div} \vec{B} = 0, \quad \text{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}.$$

Система дополняется уравнениями плазмохимической кинетики:

$$\frac{\partial n_k}{\partial t} = S_k = \sum_{ij} \xi_{ij} K_{ij}^k n_i n_j - \sum_{kj} \xi_{kj} K_{kj}^k n_k n_j,$$

плотностью тока, уравнением состояния и следующими выражениями:

$$\vec{j} = \sum_k \vec{j}_k = \sum_k e_k n_k \vec{V}_k, \quad P_k = n_k k_B T_k,$$

$$v_{ki} = n_k u_{ki} Q_{ki}, \quad u_{ki} = \sqrt{\frac{8k_B}{\pi} \left(\frac{T_k}{m_k} + \frac{T_i}{m_i} \right)}, \quad m_{ki} = \frac{m_k m_i}{m_k + m_i}, \quad \Delta \varepsilon_{ki} = \frac{2m_{ki}}{m_k + m_i} \frac{3}{2} k_B (T_i - T_k).$$

Обозначения: \vec{V} – скорость; S – источник рождения и гибели частиц; T – температура; P – давление; \vec{E} – напряженность электрического поля; \vec{B} – магнитная индукция; v_{ki} – частота столкновений; Q – эффективное сечение столкновений; u_{ki} – относительная скорость частиц; m – масса частицы; m_{ki} – приведенная масса; h – энтальпия; $\vec{\tau}$ – тензор вязких напряжений; n, e – концентрация и заряд частицы (для электронов и отрицательных ионов $e_k = -e$); k_B – постоянная Больцмана; $\Delta \varepsilon_{ki}$ – энергия, передаваемая частицам в одном упругом столкновении; W^{ny} – неупругие потери энергии; s, l – электропроводность и теплопроводность; m – подвижность; K – коэффициенты скоростей химических реакций; x – стехиометрические коэффициенты; Q^{XLM} – энергия, выделяемая (затрачиваемая) в химических реакциях; ε_0, μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемость.

Индексы: i, j, k – под знаком суммы определяют участвующие в реакциях компоненты плазмы (m, a, e, i^+, i^-).

Упрощенная модель. Решение данной системы трехмерных, нелинейных, нестационарных уравнений представляет собой сложную задачу. Поэтому для теоретических оценок характеристик неравновесной плазмы ЛКФР сделаем некоторые упрощения.

Будем рассматривать процессы, протекающие в линейном коронном факельном разряде (рисунок 2.56): установившиеся, стационарные, в плоскости x, y прямоугольной системы координат, расположенной в поперечном сечении в середине коронирующего электрода (рисунок 2.89).

Пренебрегаем излучением, вязкостью и термодиффузией плазмы. Изменение концентрации частиц в поле разряда происходит за счет диффузии, дрейфа и химических реакций, среднемассовая скорость газа равна нулю:

$$\sum n_k m_k \vec{V}_k = 0.$$

В уравнениях движения пренебрегаем изменением импульса частиц в процессе химических реакций. Как показывают оценки, в условиях коронного разряда их вклад не превышает 0,1 %. Тогда уравнения движения сводятся к диффузионному приближению вида

$$0 = -\nabla P_k + e_k n_k \vec{E} + \sum_{i \neq k} n_k v_{ki} m_{ki} (\vec{V}_i - \vec{V}_k).$$

Учитываем, что в коронном разряде плазма является слабоионизованной ($n_e, n_i \ll n_m$) и столкновения частиц происходят главным образом с нейтральной компонентой, скорость которой $V_i = 0$. С учетом подвижности заряженных частиц и учитывая связь между подвижностью и электропроводностью k -ой компоненты плазмы, плотность потока зарядов для электронного и ионного токов (обобщенный закон Ома) запишется в следующем виде:

$$\vec{j}_k = e_k n_k \vec{V}_k = e_k \mu_k n_k \vec{E} - \mu_k \nabla P_k, \quad \vec{j}_k = \sigma_k \left(\vec{E} - \frac{1}{e_k n_k} \nabla P_k \right), \quad \text{где } \mu_k = \frac{e_k}{v_{ki} m_{ki}}, \quad \sigma_k = e_k n_k \mu_k.$$

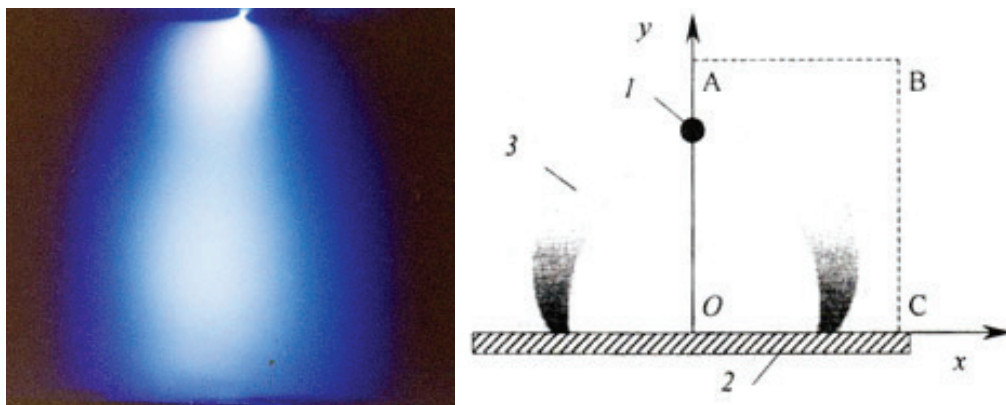


Рисунок 2.89 – Линейный коронный факельный разряд: вид сбоку, $U = 17$ кВ, $d = 30$ мм, $h = 0,5$ мм, $L = 3640$ Гн, $I = 0,1$ мА. Схема бокового сечения x, y : OABC – расчетная область, 1 – коронирующий электрод, 2 – плоский электрод, 3 – граница разряда

Из уравнения Максвелла и закона сохранения заряда следует, что плотность электрического тока удовлетворяет условию:

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0, \text{ где } \vec{j} = \sum \vec{j}_k.$$

Пренебрегая термодиффузионным переносом, выделяя дрейфовую и диффузионную составляющие скоростей, используя выражение для коэффициента диффузии и уравнение состояния, получим:

$$\frac{\vec{j}_k}{e_k n_k} = \vec{V}_k = \vec{V}_k^{4@} + \vec{V}_k^{48D} = \mu_k \vec{E} - \frac{D_k}{n_k} \nabla n_k, \text{ где } D_k = \frac{\mu_k k_B T_k}{e_k}.$$

Баланс числа частиц каждого сорта представляется в виде уравнений непрерывности:

$$\nabla \cdot (n_k \vec{V}_k^{4@}) = S_k + \nabla \cdot (D_k \nabla n_k), \text{ где } S_k = \sum_{ij} \xi_{ij} K_{ij}^k n_i n_j - \sum_{kj} \xi_{kj} K_{kj}^k n_k n_j, \vec{V}_k^{dp} = \pm \mu_k \vec{E}.$$

Дрейфовая скорость заряженных частиц \vec{V}_k^{dp} устанавливается за время порядка времени между столкновениями, что позволяет не рассматривать ускорения частиц.

Для преобразования уравнений баланса энергии частиц воспользуемся двухтемпературным приближением плазмы, полагая, что электронный газ и газ тяжелых частиц находятся по отдельности в термодинамическом равновесии с характерными температурами T_e и T ($T_m = T_a = T_i = T$). Тогда уравнения баланса энергии электронов и тяжелых частиц с учетом сделанных выше предположений запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left(\frac{5}{2} k_B T_e n_e \vec{V}_e \right) &= \vec{j}_e \vec{E} + \nabla (\lambda_e \nabla T_e) - \alpha (T_e - T) \pm \sum_Y K_Y^{kj} n_k n_j \varepsilon_{Ye}, \\ \nabla (\lambda \nabla T) + \alpha (T_e - T) \pm \sum_Y K_Y^{kj} n_k n_j \varepsilon_{Yh} &= 0. \end{aligned}$$

Модель дополняется уравнением Пуассона, выражениями для диффузионных скоростей частиц, полным током, протекающим в ЛКФР, коэффициентом упругого взаимодействия электронов с тяжелыми частицами, частотой столкновения, уравнениями состояния, законом Дальтона, плотностью электрического тока:

$$\begin{aligned} \nabla^2 (\varepsilon_0 \varphi) &= \sum_k e_k n_k, \vec{V}_k = \pm \mu_k \vec{E} - \frac{D_k}{n_k} \nabla n_k, I = \int_{(S)}^{\text{xy}} \vec{j} \cdot \vec{n} ds, \\ \alpha &= 3 k_B m_e n_e v_{eh} / m_h, v_{kj} = n_j u_{kj} Q_{kj}, P_k = \kappa_e n_k T_k, P = \sum_k P_k, \nabla \cdot \vec{j} = 0, \\ \vec{j}(j_x, j_y, 0) &= \sum_k e_k n_k \vec{V}_k = \sigma \vec{E} - \sum_k e_k D_k \nabla n_k. \end{aligned}$$

Коэффициенты переноса определяются в рамках элементарной кинетической теории с учетом различия температур электронов и тяжелых частиц:

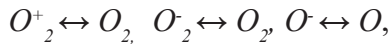
$$\mu_k = \frac{e}{k_B T_k} D_k, D_k = \frac{k_B T_k}{m_{kj} v_{kj}}, \sigma_e = e \mu_e n_e = \frac{e^2 n_e}{m_e v_{em}}, \lambda_e = \frac{5}{2} \cdot \frac{k_B^2 n_e T_e}{m_e v_{em}}.$$

Диффузия нейтральных частиц рассматривается как диффузия атомов в молекулярном газе, и как диффузия молекул сорта j в смеси атомарного и молекулярного газов:

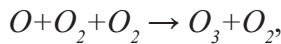
$$\begin{aligned} D_\alpha &= \frac{3}{16} \sqrt{\frac{3\pi kT}{m_\alpha}} \cdot \frac{1}{n Q_{\alpha m}}, \quad D_m = \frac{3}{16} \cdot \sqrt{\frac{3\pi kT}{m_\alpha}} \cdot \frac{1}{n_{\alpha m} Q_{m\alpha}}, \\ n &= \sum n_j = n_{O_2} + n_{O_2} + n_{O_2^{возб}}, \quad n_{\alpha m} = n_\alpha + n_{j \neq m}, \\ Q_{\alpha m} &= \sum_{j \neq \alpha} \frac{n_j}{n} Q_{\alpha j}, \quad Q_{m\alpha} = \sum_{j \neq m} \frac{n_j}{n_{\alpha m}} Q_{mj}. \end{aligned}$$

Химическая модель. Механизмы химических реакций в неравновесной плазме исключительно разнообразны и в зависимости от степени ионизации, температуры, давления среды и других характеристик могут осуществляться различным образом. Химические процессы в неравновесной плазме коронного разряда включают десятки частиц и сотни реакций [57, 58].

Предполагаем, что в состав кислородной плазмы коронного разряда включены молекулярные O_3 , O_2 , $O_2(a')$, O , O^- , O_2^- , O_2^+ атомные, ионные и электронные e компоненты, эволюция которых описывается 24 реакциями (таблица 2.4). При движении и взаимодействиях ионов кислорода:



учитываются резонансные перезарядки [26], которые влияют на подвижность молекулярных ионов в электрическом поле и их диффузию. В газе этот процесс является определяющим, так как в акте перезарядки происходит полная потеря направленного движения иона. Сечения столкновений $O_2^- \leftrightarrow O$, $O_2^+ \leftrightarrow O$, $O^- \leftrightarrow O_2$ определяются поляризационными взаимодействиями. Синтез озона осуществляется через диссоциацию молекулярного кислорода электронным ударом с последующей конверсией атомарного кислорода в реакции:



а также в реакциях ассоциативной рекомбинации молекулярных и атомарных ионов. Разрушение озона происходит при электронной бомбардировке и в столкновениях с атомами кислорода. Основной реакцией размножения электронов принята ионизация атома кислорода прямым электронным ударом. Образование отрицательных ионов происходит путем резонансного захвата электрона атомом или молекулой кислорода. Константы скоростей химических реакций с участием электронов полагаются функциями $f(T_e)$ или $f(E/n)$ и выбираются из данных [58–61].

Источники (таблица 2.4), входящие в уравнения непрерывности компонент плазмы, и учитывающие процессы возбуждения, диссоциацию, ионизацию и прилипание представляются в виде:

$$S_e = n_{O_2} (K_6 n_e + K_{13} n_{O^-}) + K_{12} n_{O_2^-} n_{O_2^*} - n_e [n_{O_3} (K_7 + K_{17})] - n_e [n_{O_2} (K_8 n_{O_2} + K_{14} + K_{16} n_O)],$$

$$S_{O_2^*} = K_6 n_e n_{O_2} - n_{O_2^*} n_{O_2} (K_{22} n_{O_2^-} + K_{23} n_{O^-}),$$

$$S_{O_2^-} = n_{O_2} (K_8 n_{O_2} n_e + K_{14} n_{O^-}) + K_{15} n_{O^-} n_{O_2^*} + K_{17} n_e n_{O_3} - n_{O_2^-} [K_{10} n_O + K_{12} n_{O_2^*} + K_{22} n_{O_2} n_{O_2^*}],$$

$$S_{O^-} = n_e [K_7 n_{O_3} + (K_{16} n_O + K_9) n_{O_2}] + K_{10} n_O n_{O_2^-} - n_{O^-} [n_{O_2} (K_{13} + K_{14} + K_{23} n_{O_2^*}) + K_{15} n_{O_2^*}],$$

$$\begin{aligned}
S_{O_2} &= n_e n_{O_3} (K_2 + K_{17}) + n_{O_2} n_e \left[n_e (2K_4 + K_9) + n_{O^-} (K_{13} + K_{14} + K_{23} n_{O_2^*}) \right] + \\
& n_{O_2^*} (K_{15} n_{O^-} + K_{19} n_{O_3}) - n_{O_3} \left[n_{O_3} (K_3 + K_{24}) + K_{18} n_{O_2^-} \right] - \\
& n_{O_2} n_{O_2} \left[K_1 n_{O_2} + 2n_{O_2} (K_5 + K_{18}) + K_{16} n_e \right], \\
S_{O_2^*} &= (K_{11} n_e + K_{18} n_{O_2} n_{O_2}) + K_{24} n_{O_2} n_{O_3} - \\
& n_{O_2^*} \left[K_{12} n_{O_2^-} + K_{15} n_{O^-} + K_{19} n_{O_3} + K_{20} n_{O_2} + K_{21} n_{O_2} \right], \\
S_{O_3} &= K_1 n_{O_2} n_{O_2} n_{O_2} - n_{O_3} \left[n_e (K_2 + K_7 + K_{17}) + n_{O_2} (K_3 n_{O_2} + K_{24}) + K_{19} n_{O_2^*} \right],
\end{aligned}$$

где $n_{O_2^*}$ – концентрация возбужденных молекул. Концентрация основной компоненты O_2 связывается с заданным давлением и составом плазмы соотношением:

$$n_{O_2} = \frac{P}{k_B T} - \sum_k \frac{T_k n_k}{T}.$$

Таблица 2.4 – Коэффициенты скоростей химических реакций

№ п/п	Реакция	Коэффициенты скоростей реакции (м ³ /с, * – м ⁶ /с)
1*	$O + O_2 + O_2 \rightarrow O_3 + O_2$	$K_1 = 6.9 \cdot 10^{-46} (300/T)^2$
2	$O_3 + e \rightarrow O + O_2 + e$	$K_2 = 4 \cdot 10^{-14} \exp(-64550/T_e)$
3	$O_3 + O \rightarrow O_2 + O_2$	$K_3 = 1.8 \cdot 10^{-17} \exp(-2300/T)$
4	$O_2 + e \rightarrow O + O + e$	$K_4 = 4.23 \cdot 10^{-14} \exp(-64550/T_e)$
5*	$O + O + O_2 \rightarrow O_2 + O_2$	$K_5 = 3.8 \cdot 10^{-42} / T \exp(-170/T)$
6	$O_2 + e \rightarrow O_2^+ + e + e$	$K_6 = 6.7 \cdot 10^{-24} T_e^2 \exp(-146160/T_e)$
7	$O_3 + e \rightarrow O^- + O_2$	$K_7 = 10^{-17}$
8*	$O_2 + e + O_2 \rightarrow O_2^- + O_2$	$K_8 = 4.2 \cdot 10^{-39} / T_e \exp(-600/T_e) \exp(-700(T_e - T) / T T_e)$
9	$O_2 + e \rightarrow O^- + O$	$K_9 = 8.8 \cdot 10^{-17} \exp(-51080/T_e)$
10	$O_2^- + O \rightarrow O^- + O_2$	$K_{10} = 3.3 \cdot 10^{-16}$
11	$O_2 + e \rightarrow O_2(a^1) + e$	$K_{11} = 10^{-6} \exp(-23.510^{-20} n/E)$
12	$O_2^- + O_2(a^1) \rightarrow O_2 + O_2 + e$	$K_{12} = 2 \cdot 10^{-16}$
13	$O^- + O_2 \rightarrow O^- + O_2 + e$	$K_{13} = 3 \cdot 10^{-16}$
14	$O^- + O_2 \rightarrow O_2^- + O$	$K_{14} = 3.4 \cdot 10^{-18}$
15	$O^- + O_2(a^1) \rightarrow O_2^- + O_2$	$K_{15} = 1.0 \cdot 10^{-15}$
16*	$O + e + O_2 \rightarrow O^- + O_2$	$K_{16} = 10^{-43}$
17	$O_3 + e \rightarrow O_2^- + O$	$K_{17} = 10^{-15}$
18*	$O + O + O_2 \rightarrow O_2(a^1) + O_2$	$K_{18} = 2.45 \cdot 10^{-43} T^{0.63}$
19	$O_2(a^1) + O_3 \rightarrow O_2 + O_2 + O$	$K_{19} = 9.7 \cdot 10^{-19} \exp(-1564/T)$
20	$O_2(a^1) + O_3 \rightarrow O_2 + O_2$	$K_{20} = 2.2 \cdot 10^{-24} (T/300)^{0.8}$
21	$O_2(a^1) + O \rightarrow O_2 + O$	$K_{21} = 7 \cdot 10^{-22}$
22*	$O_2^- + O_2^+ + O_2 \rightarrow O_2 + O_2 + O_2$	$K_{22} = 2 \cdot 10^{-37} (300/T)^{2.5}$
23*	$O^- + O_2^+ + O_2 \rightarrow O + O_2 + O_2$	$K_{23} = 2 \cdot 10^{-37} (300/T)^{2.5}$
24	$O + O_3 \rightarrow O_2(a^1) + O_2$	$K_{24} = 10^{-17} (-2300/T)$

Очевидно, что скорость генерации положительных ионов (скорость их образования и гибели) в объеме плазмы, следует из закона сохранения заряда и соответствует сумме скоростей образования и гибели всех отрицательно заряженных частиц:

$$S_{O_2^+} = S_e + S_{O^-} + S_{O_2^-}.$$

Граничные условия ставятся по всему расчетному контуру: на внешних (свободных) границах области (рисунок 2.89, АВ, ВС) задаются «мягкие» условия для всех искомым функций $\partial^2 f / \partial x^2 = \partial^2 f / \partial y^2 = 0$, температура тяжелых частиц и значение потенциала на электродах считаются заданными, а для температуры электронов выполняются условия адиабатичности стенок.

Особенностью приэлектродных областей является то, что они должны обеспечивать переход электрического тока из плазмы в твердое тело и согласовать плотность тока в разряде с плотностью тока на электродах. В стационарном коронном разряде не происходит накопления зарядов, и суммарный ток сохраняется постоянным во всех сечениях разряда. Однако роль носителей тока (e, i) в области разряда несколько различна: вблизи заземленной плоскости преобладающим является ток положительных ионов, а вблизи коронирующего электрода – электронов.

Предполагается, что коронирующий электрод не эмитирует положительные ионы, а заземленная плоскость – электроны и отрицательно заряженные ионы [56]. При положительном потенциале коронирующего электрода электроны, а также отрицательные ионы дрейфуют в сторону коронирующего электрода. Поток частиц из тонкого пристеночного слоя плазмы по нормали к поверхности электрода задаем таким же, как в равновесном случае. Полагая, что этот слой достаточно тонкий – порядка длины свободного пробега – находим значение n_k на стенке из выражения:

$$\frac{1}{4} n_k \left(\frac{8k_B T_k}{\pi m_k} \right)^{1/2} = \mu_k E_n n_k - D_k \nabla_n (n_k).$$

2.7.3. Численная модель. Запишем исходную систему дифференциальных уравнений в обобщенной форме декартовой системе координат:

$$\frac{\partial}{\partial x} (F_x \Phi) + \frac{\partial}{\partial y} (F_y \Phi) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) = S,$$

где Φ – зависимая переменная (n_k, T_e, T, j). Нелинейные коэффициенты Γ, F_x, F_y, S , зависят от искомым функций $\Phi(x, y)$ и устанавливаются из соответствия дифференциальным уравнениям системы.

Дискретизация дифференциальных уравнений в плоскости x, y осуществляется методом контрольного объема [34] на неравномерной сетке. Расчетная область разбивается на некоторое число непересекающихся контрольных объемов, в центр которых помещается одна узловая точка Р (рисунок 2.90). Интегрируя дифференциальное уравнение по каждому контрольному объему, находим дискретный аналог искомого уравнения.

В методе контрольного объема необходимо обеспечить равенство потоков (массы, заряда и т. п.) через общую границу для двух прилегающих контрольных объемов, положительность коэффициентов A_k в дискретном аналоге дифференциального уравнения $A_p f_p = \sum A_k f_k + B$, отрицательность коэффициента S_p при линеаризации источника

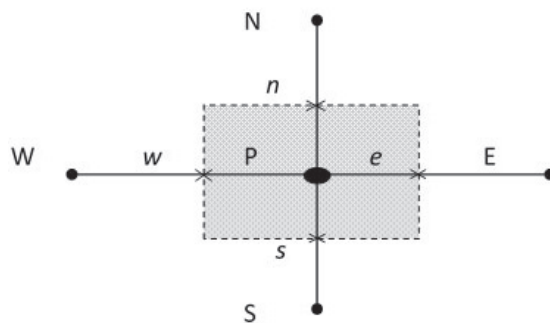


Рисунок 2.90 – Контрольный объем (заштрихованная область)

$S = R_p + S_p \Phi$, равенство суммы соседних коэффициентов $A_p = \sum A_k$ дискретного аналога. Более подробно метод решения можно найти в работе [34]. Особенностью метода является то, что коэффициенты дискретного аналога уравнений зависят от искомых функций. Поэтому для решения уравнений применяется метод итераций с использованием прогнозов по переменным направлениям. Для устойчивости итерационной процедуры используется метод нижней релаксации.

Следует отметить, что системы уравнений, описывающих плазмохимическую кинетику, относятся к жестким системам дифференциальных уравнений, которые обусловлены несоответствием во временных масштабах различных реакций. В связи с этим, решение уравнений непрерывности расщепляется на два шага, связанные общим итерационным процессом. На первом шаге учитываются процессы переноса (конвекция и диффузия), на втором – химическая кинетика путем решения уравнений вида $\partial n_k / \partial t = S_k$ для каждого контрольного объема. Время интегрирования определяется нахождением частиц в контрольном объеме, а шаг интегрирования выбирается по наименьшему масштабу химической реакции. При этом допускается, что время установления локальной температуры меньше времени протекания химической реакции. Линеаризация источника в уравнениях непрерывности проводится по схеме $n_k = R_k + S_k n_k$ с коэффициентом $S_k < 0$ (R_k описывает процесс образования частиц, а $S_k n_k$ – процесс гибели). Решение дискретных аналогов дифференциальных уравнений осуществляется итерационным методом с использованием прогнозов с переменными направлениями. Для устойчивости решения применяется метод нижней релаксации.

Как показывают эксперименты [30, 61], при любом напряжении на электродах большем, чем напряжение зажигания короны и меньшем, чем напряжение пробоя, объемный заряд внешней зоны имеет такую величину и распределение, при которых градиент поля у поверхности коронирующего электрода остается практически неизменным и близким к градиенту начала зажигания короны. Поэтому решение уравнения Лапласа $\nabla^2 \varphi = 0$ служит оценкой величины и распределения напряженности электрического поля в зоне ионизации коронного разряда в качестве начального приближения при решении дифференциальных уравнений.

Итерационный процесс заканчивается при выполнении критерия сходимости ε , выбор которого различный для уравнений переноса заряда, массы и энергии. Значение ε устанавливалось по относительному изменению переменных в узловых точках в двух

последних итерациях: для потенциала $\varepsilon = 0,1$, температуры $\varepsilon = 0,001$ и концентрации частиц $\varepsilon = 0,01$.

Проведена проверка сходимости решения от произвольного начального приближения в распределении потенциала и коэффициентов релаксации. При заданном параметре сходимости это сказывалось только на числе итераций, что косвенно указывает на достоверность полученных решений. Как показывают методические расчеты, использование грубой (21×31) сетки по сравнению с мелкой (61×91) дает физически правдоподобное решение, поскольку метод контрольного объема гарантирует удовлетворение интегральных балансов во всей расчетной области. Незначительные отличия проявляются в значениях локальных характеристик и связаны с погрешностью аппроксимаций производных на грубой сетке.

2.7.4. Результаты расчета:

1. Линейный коронный факельный разряд. Проведен расчет при заданных параметрах внешней среды (температура, давление атмосферное), геометрии разрядного контура, межэлектродного расстояния $d = 15 \div 30$ мм, подводимого напряжения $U = 10 \div 20$ кВ и диаметра линейного токопровода 0,5 мм.

Результаты расчета показали (рисунки 2.91–2.93), что вблизи коронирующего электрода реализуются неоднородные электрические поля напряженностью $\sim 30\text{--}50$ кВ/см (рисунок 2.91). Сила тока в пересчете на всю пространственную область разряда составляет 30–100 мкА. Температура электронов достигает 40–80 кК (рисунок 2.92), а температура газа (тяжелых частиц) остается сравнительно низкой $\sim 350\text{--}400$ К. Максимальная концентрация частиц в коронном разряде:

$$O_3 \sim 10^{16}\text{--}10^{17}, O \sim 10^{16}, e \sim 10^{11}\text{--}10^{12}, O_2^+ \sim O_2^- \sim 10^{12}\text{--}10^{13}, 1/\text{см}^3.$$

Установлено, что прилипание электронов к молекулам кислорода является одним из основных каналов гибели электронов в поле коронного разряда: $e < O_2^- \sim O_2^- < O$.

Изменения температуры электронов и продуктов химических реакций практически отслеживаются распределением напряженности электрического поля в разрядной области. В неравновесной плазме ($T_e \gg T$) процессы диссоциации и ионизации частиц происходят в основном при столкновениях с электронами и носят нетермический характер [3]. Этим объясняется сравнительно высокая концентрация озона в поле коронного разряда, так как обеспечивается необходимое направление реакции $O + O_2 + O_2 \rightarrow O_3 + O_2$. Данные условия в коронном факельном разряде делает их перспективными для реализации синтеза озона в кислороде.

Объемный заряд деформирует внешнюю область «лапласовского» поля, и в меньшей степени – внутреннюю. Формируется слабо выраженная «шатровая» форма токопроводящей области. Перенос тока во внешней области разряда осуществляется в основном ионами, где их концентрация на несколько порядков превышает концентрацию электронов.

С уменьшением межэлектродного расстояния или с увеличением подводимого напряжения коронный разряд диффузно заполняет практически весь разрядный промежуток (аналог факельного разряда), происходит вынос активных процессов ионизации в направлении второго электрода и итерационное решение уравнений становится неустойчивым. В экспериментах это может соответствовать искровой пробой разрядного промежутка.

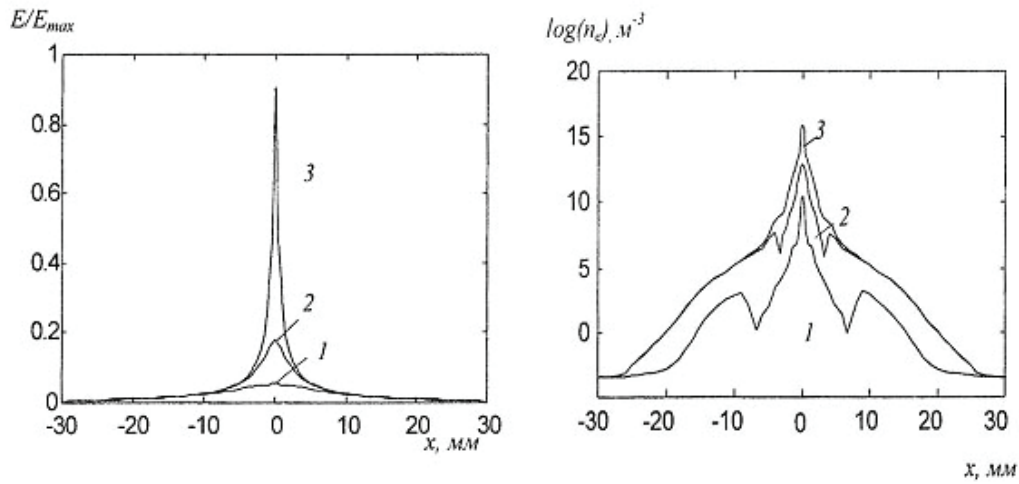


Рисунок 2.91 – Распределения E/E_{max} ($E_{max} = 37$ кВ/см) и концентрации электронов в сечениях: $y = 10$ (1), 14 (2), 15 (3) мм

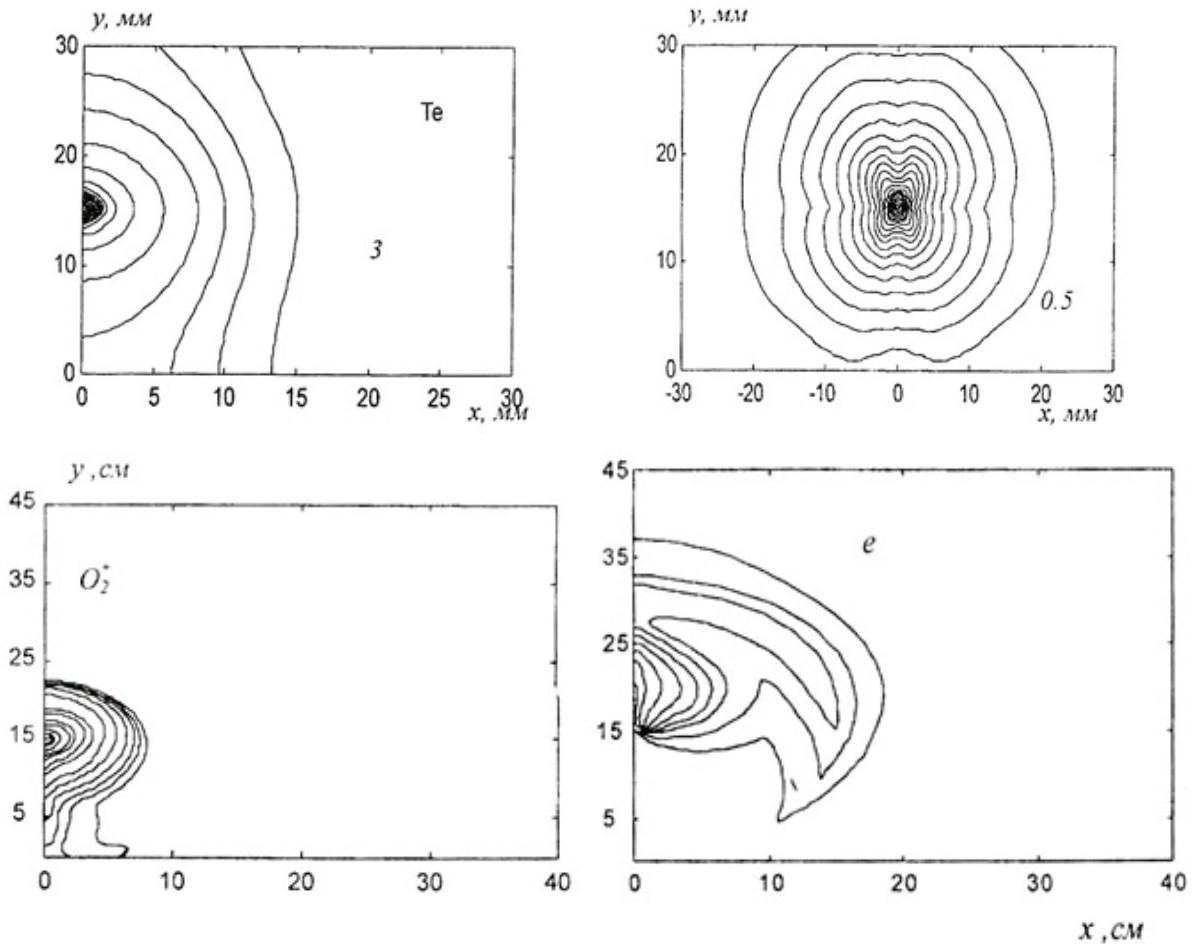


Рисунок 2.92 – Распределения температуры электронов ($T_{e, макс} = 45$ кК, с шагом 2 кК), потенциала электрического поля (с шагом 0,5 кВ), концентраций положительных ионов кислорода и электронов (максимум концентраций: $O_2^+ \sim 10^{12}$, $e \sim 10^{11}$, $1/см^3$) в сечении x, y при $d = 15$ мм, $U = 10$ кВ

2. Коронный факельный разряд. Проведем расчет положительной короны (рисунок 2.32) при следующих параметрах: диаметр диска коронирующего электрода $5 \div 10$ мм, межэлектродное расстояние $10 \div 20$ мм, длина ножки крепления дисков I стержневого коронирующего электрода $10 \div 15$ мм, диаметр стержневого электрода и ножки 0,2 мм, подводимое напряжение $10 \div 15$ кВ, расстояние между центрами соседних дисков в разрядной кассете 20–30 мм, толщина коронирующих дисков 0,1 мм.

Из результатов расчета следует (рисунок 2.93), что в положительной короне коронного факельного разряда реализуются сильные электрические поля напряженностью ~ 30 кВ/см, температура электронов достигает ~ 40 кК, а максимальные значения концентраций частиц ($O_3 - 1.6 \cdot 10^{17}$, $O - 2.3 \cdot 10^{17}$, $e - 8.7 \cdot 10^{12}$, $1/\text{см}^3$) наблюдаются вблизи кромки коронирующего диска. При изменении геометрии разрядного контура, формы и размеров коронирующего электрода распределение напряженности электрического поля качественно не изменяется. Вместе с тем уменьшение диаметра коронирующего диска с 10 до 0,2 мм сопровождается увеличением напряженности электрического поля до 30 % и поджатием изолиний полей к коронирующему электроду, возрастанием температуры электронов и концентрации заряженных частиц во внутренней области короны и их незначительным уменьшением во внешней.

Взаимодействия электрических полей соседних коронирующих дисков при их сближении усиливают и деформируют электрические поля во внешней области коронного разряда и практически не влияют на внутреннюю область, примыкающую к коронирующим электродам.

Увеличение длины ножки коронирующего электрода не приводит к изменениям распределения характеристик разряда на кромке острия диска и во всей межэлектродной области.

С уменьшением межэлектродного расстояния коронный разряд диффузно заполняет практически весь разрядный промежуток (аналог факельного разряда). Наблюдается более высокое напряжение на электродах и вынос активных процессов ионизации на значительные расстояния от коронирующего электрода. В этих условиях малое увеличение

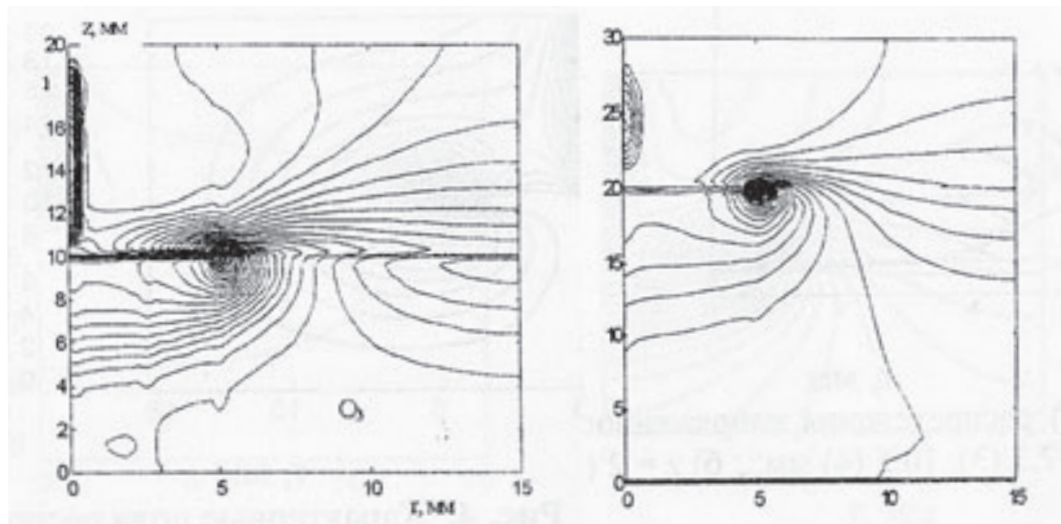


Рисунок 2.93 – Распределение концентраций озона и атомарного кислорода (максимум: $O_3 = 1,6 \cdot 10^{17}$, $O = 2,3 \cdot 10^{17}$, см^3), $U = 10$ кВ

напряжения приводит к резкому возрастанию плотности тока и «джоулева» тепловыделения. В экспериментах это соответствует искровому пробое разрядного промежутка.

Ионизация нейтральных частиц происходит вблизи коронирующего электрода в области сильных электрических полей. Это объясняется тем, что из зоны ионизации во внешнюю область движется поток положительных ионов, а размножение электронных лавин идет по направлению к коронирующему электроду за счет ионизации молекул электронным ударом. Образующийся во внешней зоне объемный заряд тормозит развитие процессов ионизации, уменьшает электрическое поле вблизи коронирующего электрода и локализует зону ионизации вблизи его поверхности.

Учет неравновесности плазмы и кинетики химических реакций приводит к вытягиванию изолиний напряженности электрического поля, температуры электронов и концентраций частиц к ближайшим электродам разрядной кассеты с формированием радиальных и аксиальных потоков плазмы от кромки коронирующего электрода (электрический ветер). Изменения температуры электронов и продуктов химических реакций практически отслеживаются распределением электрического поля в разрядной области.

2.8. Взаимодействие линейного коронного факельного разряда с водой

В настоящее время развиваются новые экологические методы очистки и обеззараживания питьевых и сточных вод [62], среди которых прогрессируют технологии (Advanced Oxidation Technology – AOT), основанные на совместном воздействии на воду окислителей: хлор, озон, перекись водорода, ультрафиолетовое излучение, кавитационные явления, ультразвук [63].

В то же время применение электрических разрядов в воде или над ее поверхностью позволяют реализовать AOT в одном устройстве. Используются следующие виды воздействия на воду электрическими разрядами: 1) импульсные разряды под водой [64, 65], 2) импульсные разряды по поверхности воды [66], 3) импульсная корона по поверхности воды [67], 4) коронный и барьерный разряды на воду [68, 69], 5) коронный факельный разряд на поверхность воды [70]. Данные разряды обладают широким набором факторов, воздействующих на микробиологические объекты и органические соединения. В их числе ультрафиолетовое излучение, ударные волны, активные радикалы: озон, перекись водорода и другие соединения, возникающие в разряде.

Линейный коронный факельный разряд (ЛКФР) является генератором окислителей, воздействующим на микробиологические объекты и другие органические соединения в воде. При горении ЛКФР в воздухе образуется более 30 различных химических соединений молекул, атомов, ионов и электронов (см. таблицу 2.5, как продолжение результатов расчета состава воздуха, приведенных в таблицах 1.1, 1.2), многие из которых, например, озон, перекись водорода, атомарный кислород и другие гидроксильные группы являются сильнейшими окислителями. Отметим, что максимум концентрации данных окислителей при атмосферном давлении лежит в области температур 2500–4000К, что и у озона (таблица 1.1).

Рассмотрим механизмы, влияющие на синтез и разложение окислителей в линейном коронном факельном разряде, горящем в воздухе над поверхностью воды. Показана эффективность обеззараживания проточной воды данным разрядом в сравнении с озонированием или хлорированием, при этом удельные энергетические затраты составляют

~1 кВт*ч/м³. Эксперименты на искусственно зараженной воде выполнялись совместно с бактериологической лабораторией Государственного департамента гигиены и санитарии Кыргызской Республики.

Таблица 2.5 – Состав некоторых компонент газовой фазы воздуха, 1/см³

T, °K	H ₂ O	H ₂ O ₂	NO ₂	OH	OH ⁻	OH ⁺
500	55597+18	19488+04	46104+03	39270+04	0	
1000	27798+18	33890+09	34195+10	53281+12	0	
1500	18520+18	17158+11	57148+12	23774+15	0	
2000	13654+18	11253+12	66864+13	45675+16	60692+04	
2500	96547+17	28974+12	25195+14	23766+17	11630+08	
3000	48195+17	31542+12	41923+14	53206+17	64181+09	
3500	91912+17	85621+11	24578+14	47164+17	27314+10	
4000	58786+15	50782+10	46245+13	16949+17	24585+10	82965+08
4500	30686+14	19081+09	59309+12	44161+16	11243+10	48876+09
5000	22260+13	95711+07	76376+11	12466+16	46472+09	17866+10
5500	23265+12	70505+06	13368+11	40717+15	19882+09	49540+10
6000	31850+11	69016+05	27666+10	14808+15	87077+08	11127+11
6500	52286+10	81014+04	63725+09	57570+14	38515+08	20691+11
7000	10002+10	11152+04	16172+09	23665+14	18394+06	31422+11
7500	23528+09			10772+14		39506+11
8000	70569+08			55972+13		44885+11
8500	25902+08			32456+13		49640+11
9000	10924+08			20217+13		54370+11
9500	50608+07			13167+13		58846+11
10000	25019+07			88165+12		62706+11

2.8.1. Экспериментальная установка. Разработана установка (рисунок 2.94), состоящая из диэлектрической прямоугольной трубы длиной 70 см, шириной и высотой 10 см, по которой протекает проточная вода слоем в несколько миллиметров. Над поверхностью проточной воды на высоте до 30 мм натянут коронирующий провод диаметром 0,5 мм, подключенный к положительному полюсу регулируемого высоковольтного источника питания с напряжением до 25 кВ.

Проточная вода является вторым электродом и заземляется через иницирующий разрядник. ЛКФР зажигается на воздухе или азоте, где расход газа, как и воды, измеряется с помощью ротаметров. Подача воды в разрядную камеру осуществляется через устройство капельного разрыва, позволяющее осуществить диэлектрическую развязку камеры с водой относительно земли. Энергетические характеристики разряда измеряются с помощью киловольтметра и микроамперметра. Мощность установки до 20 Вт. Суммарная концентрация окислителей ($H_2O_2 + O_3$) в воде, после воздействия на нее ЛКФР, определяется йодометрическим способом. Изменение концентрации азотсодержащих соединений в воде проводится арбитражным методом: NH_3^- – с реактивом Несслера, NO_2^- – с реактивом Грисса, NO_3^- – с салициловой кислотой.

2.8.2. Роль азота в синтезе перекиси водорода. Результаты экспериментов показали, что зависимость производительности установки по окислителям ($O_3 + H_2O_2$) сложным образом зависит от расхода воды и от состава газа, в котором горит ЛКФР (рисунок 2.94).

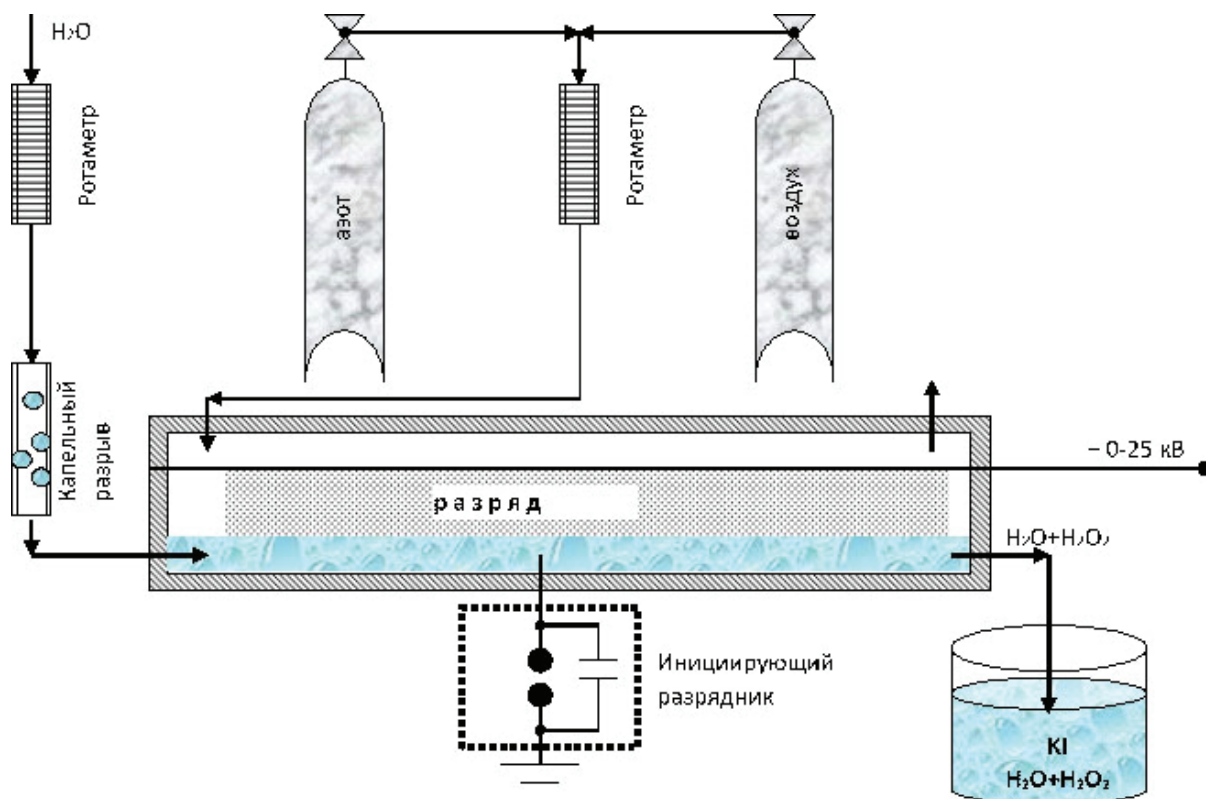


Рисунок 2.94 – Схема экспериментальной установки

Было установлено, что для всех исследуемых расходов воды концентрация окислителей при горении ЛКФР в воздухе оказалась меньше, чем при горении ЛКФР в азоте.

Для объяснения данного явления рассматривались механизмы, синтезирующие и разлагающие окислители. Известно, что азот (N_2) стимулирует синтез озона [3] и перекиси водорода (H_2O_2). В работе [57] приведены данные по сечениям колебательного возбуждения электронным ударом различных молекул. Для азота (N_2) область эффективного возбуждения составляет $1,7 \div 3,5$ эВ с максимальным сечением $3 \cdot 10^{-16}$ см². Для воды (H_2O) и кислорода (O_2) эти параметры соответственно равны: $5 \div 10$ эВ, $6 \cdot 10^{-17}$ см² и $0,1 \div 1,5$ эВ, 10^{-17} см². Как видно из сравнения, область эффективного возбуждения N_2 ближе к области эффективного возбуждения H_2O , чем у O_2 . Поэтому возбужденный N_2 легче передает энергию молекулам H_2O , чем возбужденный O_2 .

Основная реакция получения перекиси водорода протекает с участием колебательно возбужденных молекул азота. Максимальное сечение колебательного возбуждения электронным ударом у N_2 в 30 раз больше чем у O_2 и в 5 раз больше чем у H_2O . Содержание паров воды в воздухе или азоте при температуре проточной воды 14°C составляет 1 % по массе или 10 г/кг воздуха или азота. Поэтому электроны в ЛКФР взаимодействуют преимущественно с азотом, а уже от возбужденного азота энергия переходит к парам воды и способствует синтезу перекиси водорода. В ЛКФР, горящем в азоте на проточную воду, протекают следующие химические реакции:





Азот переносит энергию в разряде от электронов к молекулам воды. Если не рассматривать все промежуточные химические реакции, то можно предположить, что плазма ЛКФР окисляет воду с образованием перекиси водорода:



2.8.3. Синтез и разрушение окислителей. Результаты эксперимента позволили установить зависимость концентрации H_2O_2 от периода нахождения обрабатываемой воды в зоне разряда (рисунки 2.95, 2.96). Видно, что при воздействии плазмы ЛКФР на проточную воду одновременно происходят процессы, образующие и разрушающие окислители (H_2O_2 и O_3). Рассмотрим подробнее механизмы, протекающие в воде при горении ЛКФР в азоте (рисунок 2.96).

1. В воде, при воздействии плазмы, синтез H_2O_2 происходит по реакциям (1)–(4). При отсутствии разрушающих механизмов концентрация H_2O_2 линейно возрастает в зависимости от периода обработки воды (рисунок 2.97, прямая 1).

2. Горение ЛКФР сопровождается ультрафиолетовым излучением, которое способствует фотохимическому разложению образовавшейся перекиси водорода. Концентрация H_2O_2 , при увеличении периода обработки воды и при отсутствии разрушения другими механизмами, выходит на равновесный уровень $C_{равн}$ и далее не меняется (рисунок 2.97, кривая 2). Расчеты показывают, что вне зависимости от выхода на равновесный уровень $T_{равн}$, концентрация перекиси водорода $C_{равн}$ в данный момент времени оказывается примерно вдвое меньше, чем в случае, без ее разрушения (рисунок 2.97, прямая 1, при $T = T_{равн}$).

3. После достижения максимума, концентрация перекиси водорода снижается (рисунок 2.95) из-за поступления в обрабатываемую воду продуктов эрозии электродов (Fe , Ni), которые являются катализаторами разрушения H_2O_2 . Концентрация продуктов эрозии электродов линейно возрастает в зависимости от времени обработки воды и снижает концентрацию H_2O_2 на стационарном уровне $T_{равн}$. Линейное экстраполирование H_2O_2 (рисунок 2.97, кривая 3) в область нулевой концентрации, показывает время накопления катализатора в воде $T_{кр}$, начиная с которого концентрация H_2O_2 практически отсутствует. Это означает, что вся образовавшаяся перекись водорода полностью разрушается за период $T \approx T_{кр}$. При распаде перекиси водорода выделяется атомарный кислород, который является сильным окислителем загрязнителей воды. Поэтому синтезированная и каталитически разрушенная перекись водорода полезно используется для очистки и обеззараживания воды.

4. В ЛКФР, горящем в воздухе и взаимодействующим с водой, кроме химического взаимодействия (1)–(4), протекают следующие реакции:



Поскольку йодометрический метод регистрирует сумму обоих окислителей ($H_2O_2 + O_3$), то можно ожидать, что их концентрация при горении ЛКФР в воздухе должна быть более высокой, чем при горении в азоте. С другой стороны, известно, что H_2O_2 и O_3 реагируют между собой как в газовой фазе, так и в растворе:

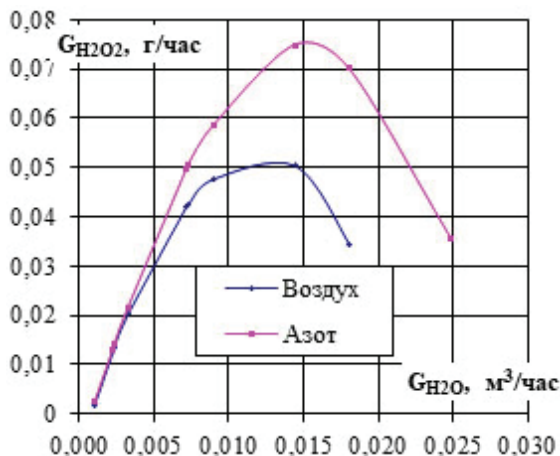


Рисунок 2.95 – Зависимость концентрации H_2O_2 от расхода проточной воды

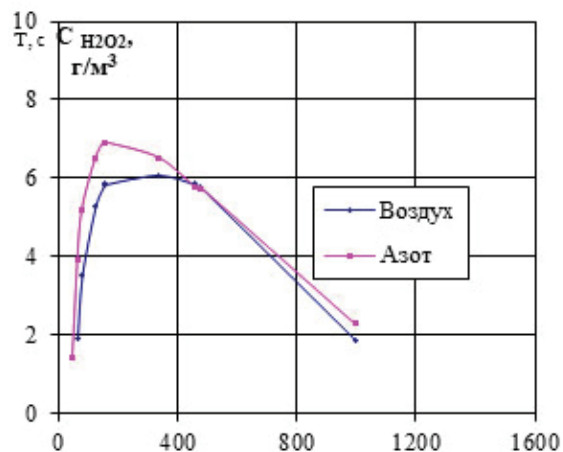


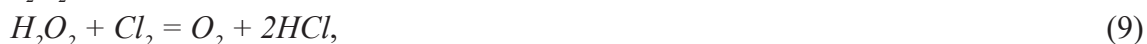
Рисунок 2.96 – Зависимости концентрации H_2O_2 от периода обработки проточной воды



Поэтому суммарная концентрация $H_2O_2 + O_3$ в обрабатываемой воде, с одной стороны, должна повышаться при увеличении периода обработки воды за счет реакций (6)–(7), а с другой стороны, уменьшаться по мере протекания реакции (8), которая протекает через промежуточные радикалы, способствующие обеззараживанию воды. Однако трудно предсказать, какой из конкурирующих факторов будет доминировать в реальных условиях. Период накопления критической концентрации катализатора (рисунок 2.96) для воздуха и азота составляет около 22 минут и соизмерим с периодом измерения йодометрическим способом (15 мин). За суммарное время ~37 мин часть выработанных окислителей каталитически разрушается или реагирует между собой.

5. В проточной воде содержится некоторое количество солей, являющихся катализаторами разрушения H_2O_2 и, даже при отсутствии эрозии электродов, часть образующейся H_2O_2 будет разрушаться солями.

6. Водопроводная вода содержит в себе хлор или его соединения, которые реагируют с H_2O_2 в результате химических реакций:



7. Органические соединения, присутствующие в водопроводной воде, окисляются с образованием углекислого газа и воды. Поэтому механизмы 5, 6 и 7 при горении ЛКФР протекают одновременно и приводят к тому, что концентрации окислителей от времени обработки воды (рисунок 2.96) в начальный момент времени несущественны: первые 35 секунд для N_2 , 50 секунд для O_2 . Это период является нулевым в производительности T_0 . В период $T^3 T_0$ нельзя утверждать, что вклад от механизмов 6 и 7 разрушает окислители, а наработка окислителей начинает превышать их распад.

Расчеты показывают (рисунок 2.97, кривая 3), что линейный участок изменения концентрации H_2O_2 от периода обработки воды, экстраполированный в начальный момент времени, можно считать значением $C_{равн}$ при отсутствии катализаторов, поступающих от эрозии электродов. Концентрация перекиси водорода при отсутствии катализатора и фотохимического разложения должна примерно вдвое превосходить значение

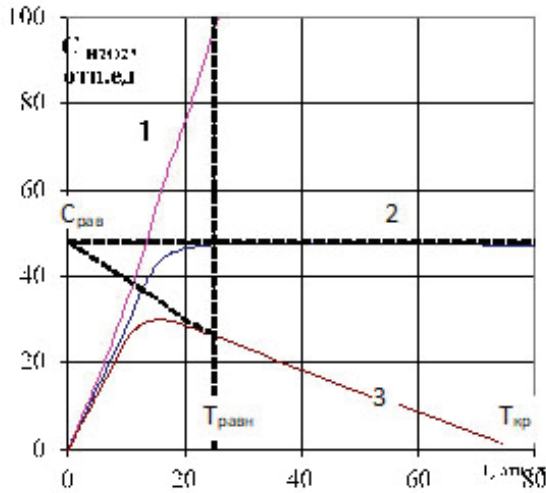


Рисунок 2.97 – Зависимость концентрации H_2O_2 от периода обработки проточной воды (в относительных единицах)

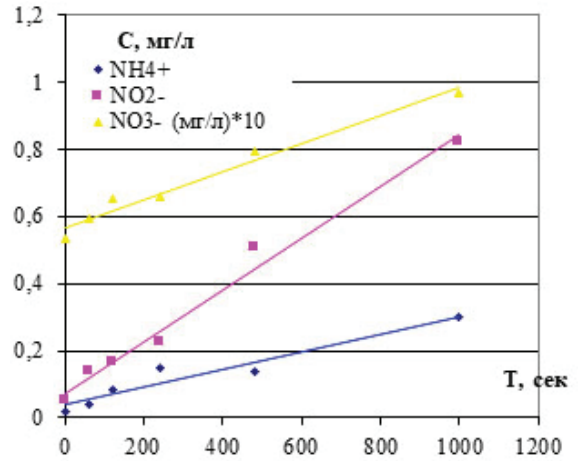


Рисунок 2.98 – Зависимость концентрации азотсодержащих соединений в воде от периода ее обработки

равновесной концентрации в момент достижения $T_{равн}$. Поэтому скорость изменения концентрации H_2O_2 в воде будет определяться так:

$$U \cong \frac{2C_{равн}}{T_{равн} - T_0} \quad (11)$$

По известным значениям мощности P в ЛКФР, скорости и объему воды V , протекающему через зону разряда за $T_{равн}$, определяется часовая производительность генерации (г/час) и удельные энергетические затраты, идущие на синтез H_2O_2 :

$$G_{H_2O_2} = 3600VU, \quad W = \frac{P}{G_{H_2O_2}} \quad (12)$$

Прямые измерения для $T_{равн}$ при горении ЛКФР в азоте дают удельные энергетические затраты $903 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг } H_2O_2$, а вычисления по выражениям (12) – $318 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг } H_2O_2$. Несмотря на то, что в образовании перекиси водорода принимают участие дополнительные механизмы генерации и разложения окислителей, расчет по формулам (12) можно использовать для оценки удельных энергетических затрат.

2.8.4. Побочные химические соединения, поступающие в воду. При горении ЛКФР над поверхностью воды в зоне разряда возникают различные соединения азота с кислородом (ионы аммония, азотная и азотистая кислота), которые под действием диффузионных процессов поступают в воду и оказывают отрицательное влияние на её качество (рисунок 2.98). Наблюдается медленный рост содержания в воде данных соединений при следующих скоростях увеличения концентраций азотсодержащих соединений: $U_{NH_4^+} = 0,02$, $U_{NO_2^-} = 0,05$, $U_{NO_3^-} = 0,3 \text{ мг}/(\text{л}\cdot\text{мин})$.

Исходя из того, что предельно допустимые концентрации (ПДК) в воде составляют: $NH_4^+ - 2 \text{ мг}/\text{л}$, NO_2^- и $NO_3^- - 10 \text{ мг}/\text{л}$, то максимально допустимый период обработки воды составляет: $T_{(NH_4^+)} = 110$, $T_{(NO_2^-)} = 170$, $T_{(NO_3^-)} = 30 \text{ мин}$.

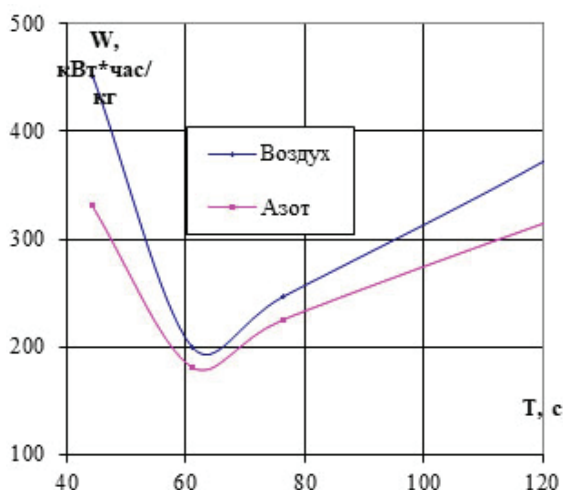


Рисунок 2.99 – Зависимость содержания числа кишечных палочек в воде от периода ее обработки разрядом

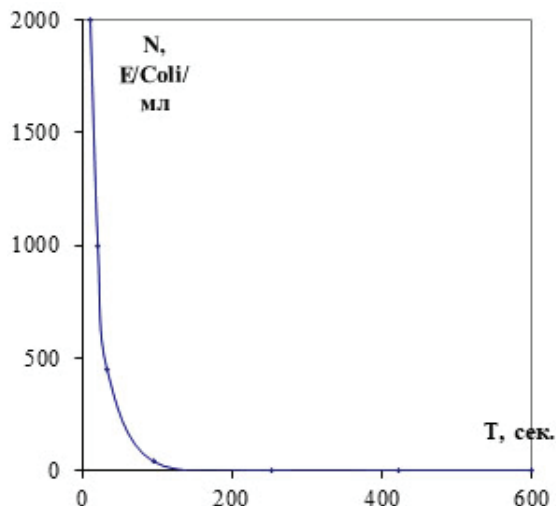


Рисунок 2.100 – Зависимость удельных энергетических затрат на синтез перекиси водорода от периода обработки воды

Превышение данных значений вызывает увеличение концентрации азотсодержащих соединений свыше ПДК. Видно, что даже самый короткий период накопления ПДК для NO_3^- приблизительно на порядок превышает необходимое время для обеззараживания воды с помощью коронного разряда. Поэтому нет отрицательного влияния образующихся в разряде побочных соединений азота.

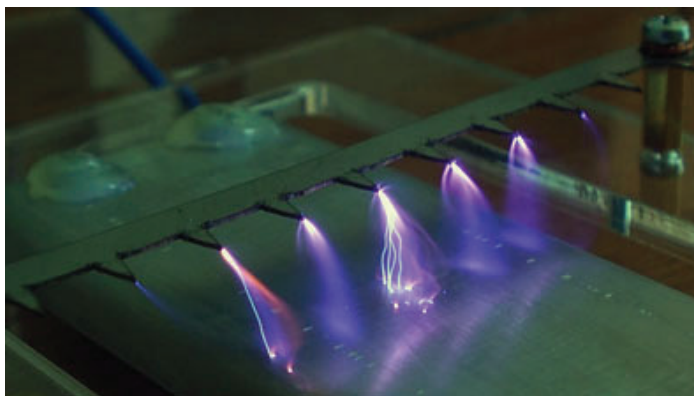
2.8.5. Обеззараживание воды с патогенными бактериями. Проведены исследования воздействия ЛКФР на искусственно зараженную воду, которая представляет смесь хлорированной водопроводной воды с введенными патогенными бактериями *E. Coli* концентрацией более 2000 особей/мл. В исходную воду вводятся ионы меди в количестве 0,5 мг/л для каталитического разложения перекиси водорода и активизации процесса обеззараживания воды. Максимальный период нахождения воды в разряде составляет 600 секунд, что соответствует выработке перекиси водорода в концентрации 4,5 г/м³. Минимально необходимая для обеззараживания воды концентрация перекиси водорода составляет 3 г/м³ [3].

Как показали результаты бактериологического анализа (рисунок 2.99), двухминутное воздействие разряда на воду снизило количество кишечной палочки практически до нуля, что соответствует стандарту питьевой воды по содержанию бактерий, а удельный расход энергии на 1 м³ воды при этом составил ~ 1 кВт*час/м³.

Изменение удельных энергетических затрат, идущих на синтез перекиси водорода в интервале 40–120 секунд (рисунок 2.100), соответствует по времени эксперименту с искусственно зараженной водой (рисунок 2.99). Наблюдаемый перегиб в области 60 секунд объясняется ранее изложенными механизмами синтеза и разложения перекиси водорода. На рисунке 2.100 видно, что для полной стерилизации воды 120 сек ЛКФР, горящим в азоте, удельные энергетические затраты, идущие на синтез перекиси водорода, равны ~300 кВт*ч/кг. Для наработки 3-х граммов H_2O_2 , необходимых для обеззараживания 1 м³ воды, нужно затратить 0,3 кВт*ч электроэнергии. Это в три раза меньше, чем затраты в случае обеззараживания искусственно зараженной воды. Данное расхождение

определяется тем, что вода приготавливалась для эксперимента путем растворения в водопроводной воде мясопептонного бульона, содержащего ~ 10 г/м³ кишечной палочки. Перекись водорода расходовалась на инактивацию кишечных палочек и на окисление органической составляющей бульона.

Удельные энергетические затраты, идущие на обеззараживание воды, в несколько раз превышают затраты по хлору или озону. Простота реализации ЛКФР, горящего на воду, позволяют утверждать, что предлагаемая технология является перспективной и конкурирующей с существующими технологиями обеззараживания воды.



2Т. ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ КОРОННОГО РАЗРЯДА

1. Импульсный коронный разряд для создания газовых лазеров

В настоящее время ведутся интенсивные разработки по применению коронных разрядов для возбуждения активной среды газовых лазеров [18, 19]. В данной работе приводятся результаты исследования применения импульсного коронного разряда (ИКР) для создания газовых лазеров. Результаты экспериментов показали:

1) при горении ИКР в воздухе сила электрического тока до 7 раз превосходит силу тока классического коронного разряда;

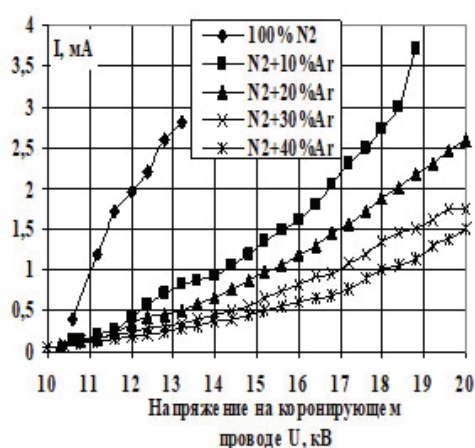
2) на чистом аргоне, для данных режимов эксперимента, ИКР не горит или сразу же срывается в дуговой разряд;

3) в азоте ИКР горит устойчиво (рисунок 2.101, а) и азотные лазеры имеют полуширину импульса порядка 5 нс, что соответствует периоду разряда полевого катода через тиратрон;

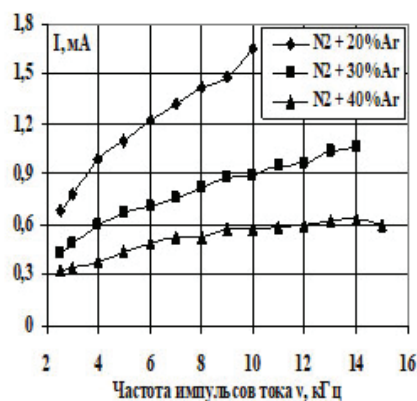
4) добавка аргона в азот смещает область горения ИКР в высоковольтную сторону (рисунок 2.101), а сила тока меняется незначительно. Чем больше в азот добавляется аргон, тем меньше влияние частоты следования импульсов на ток и мощность разряда (рисунок 2.101, б). В зависимости от концентрации аргона в азоте, при увеличении напряжения на полевым катоде ток ИКР возрастает и выходит на насыщение. Чем меньше концентрация аргона в смеси, тем при больших значениях тока разряда происходит выход на насыщение. Для достижения максимальных токов в ИКР необходимо к азоту добавлять не более 10 % аргона и увеличивать напряжение на полевым катоде не более 750 В;

5) добавление CO_2 газа в смесь (N_2+Ar) уменьшает силу тока разряда, и снижение происходит тем сильнее, чем больше концентрация CO_2 . Это связано с тем, что электрический ток коронного разряда в азоте или аргоне переносится электроотрицательными ионами CO_2^- и свободными электронами. Ионы CO_2^- более тяжелые, чем свободные электроны и добавка CO_2 к смеси (N_2+Ar) снижает силу тока.

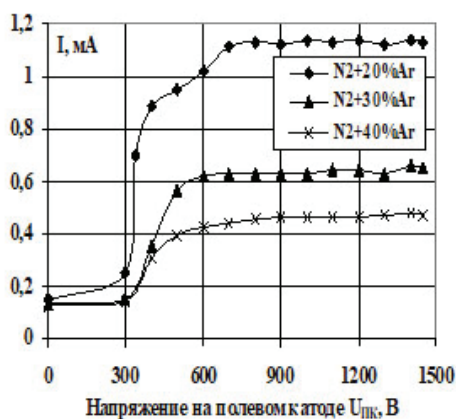
Эксперименты показали, что при концентрации 3,5 % CO_2 сила электрического тока в коронном разряде получается большая, но напряжения, при которых происходит срыв коронного разряда в дуговой разряд, не выше 17 кВ. При концентрации 14 % CO_2



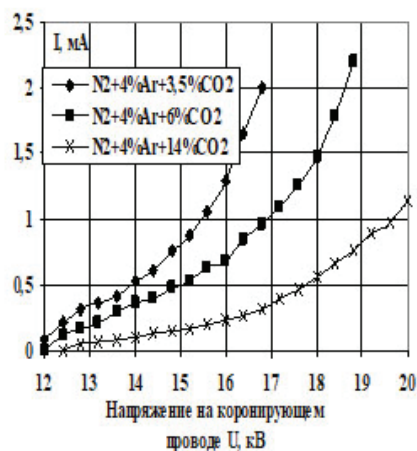
a



b



c



d

Рисунок 2.101 – Зависимость тока ИКР в смесях (CO_2 , Ar, N_2) газов от: а – напряжения на коронирующем проводе; б – частота импульса тока; с – напряжение на полевом катоде; д – напряжение на коронирующем электроде. Частота импульсов 5 кГц, напряжение на коронирующем проводе 16 кВ и на полевом катоде – 700 В (кроме варианта с)

напряжение срыва коронного разряда в дуговой разряд превышает 20 кВ и реализуются не самые высокие электрические токи.

Оптимальная концентрация газов в смеси составляет: 6 % CO_2 , 4% Ar, 90 % N_2 . В этом случае реализуются максимальные электрические токи, высокое напряжение ~ 19 кВ (рисунок 2.101, d), максимальная мощность в разряде 41 Вт и удельная мощность 510 Вт/м коронирующего провода. Это позволяет создать достаточно мощные лазеры, имеющие небольшие габариты.

2. Ионизатор воздуха на коронном разряде

Аэроионы образуются в атмосфере под действием космического излучения, электрических разрядов и других факторов [71–75]. Аэроионов много в воздухе горной местности, в лесу, у моря, вблизи водопадов и горных рек, особенно после грозы, а в городах и жилых помещениях их очень мало. Известно, что отрицательные аэроионы оказывают

стимулирующее и лечебное действие на организм человека – повышают работоспособность, способствуют лечению некоторых заболеваний, уменьшают кислородную недостаточность организма [71–73]. Клинико-физиологические исследования, проведенные в производственных помещениях с малой концентрацией аэроионов, показали повышение утомляемости человека и понижение сопротивляемости его к инфекциям. По санитарно-гигиеническим нормам минимальное число положительных ионов в 1 см^3 воздуха должно быть ~ 400 , отрицательных – 600. Оптимальным считается содержание 1500–3000 положительных и 3000–5000 отрицательных ионов в 1 см^3 воздуха [71–75].

По результатам экспериментальных исследований ионизации воздуха коронным разрядом отрицательной полярности в данной работе предложена конструкция ионизатора (рисунок 2.102), назначение которого основано на принципе действия «люстры Чижевского» [74]. Ионизатор создает в помещении отрицательные аэроионы кислорода с концентрацией, характерной для микроклимата горных и лесных районов, очищает воздух от пыли и микробов, нейтрализует вредное воздействие работы телевизоров и дисплеев компьютеров.

Благодаря специальной конструкции дополнительного электрода при определенных режимах работы ионизатор генерирует озон, концентрация которого не превышает предельно допустимых значений, позволяет проводить санацию помещения и уничтожать трудно удаляемые запахи. Определены распределения концентрации ионов в помещении и установлена динамика наработки озона в течение времени работы ионизатора [76].

2.1. Экспериментальная установка

Ионизатор воздуха состоит из четырех частей (рисунок 2.103): источника высокого напряжения постоянного тока, электрофильтра на основе коронного разряда, излучателя аэроионов и вентилятора, которые электрически соединены между собой в диэлектрическом корпусе.

При замыкании переключателя К1 напряжение сети подается на вентилятор М, скорость вращения которого регулируется подключением последовательно к двигателю вентилятора конденсатором С5 путем размыкания ключа К2. Напряжение сети через ограничивающий резистор R1 и диод Д1 заряжает конденсатор С1 до амплитудного значения 310 В. Одновременно заряжаются конденсатор С2 через резисторы R2, R3 и конденсатор С3 через резистор R6. Напряжение с конденсатора С2 нарастает по экспоненте, и подается на эмиттер однопереходного транзистора T_1 . Когда напряжение достигает порога переключения транзистора, конденсатор C_2 разряжается через цепь эмиттер-базы 1, резистор R_5 и управляющий электрод тиристора D_2 . Тиристор открывается и конденсатор C_3 начинает разряжаться через первичную обмотку высоковольтного импульсного трансформатора T_1 .

При полном разряде конденсатора тиристор D_2 закрывается и весь процесс зарядки и разрядки конденсаторов C_2, C_3 повторяется в автоколебательном режиме. Во вторичной обмотке трансформатора T_1 в это время присутствуют высоковольтные импульсы, выпрямляемые с помощью диода Д3 и конденсатора С4. Выпрямленное высокое напряжение подается на разрядные узлы РЭ1 и РЭ2. В источнике питания, путем изменения величины сопротивления R3, можно изменять частоту коммутации конденсатора С3 и тем самым увеличивать или уменьшать мощность в разряде.

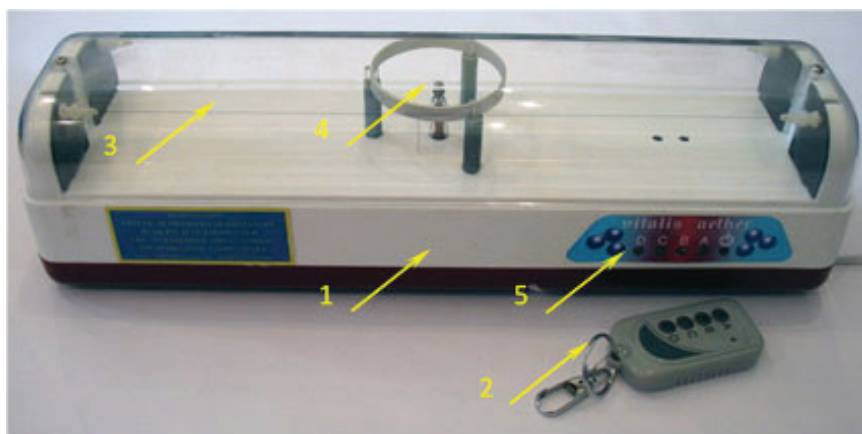


Рисунок 2.102 – Внешний вид ионизатора: 1 – источник высокого напряжения постоянного тока (внутри диэлектрического корпуса); 2 – блок дистанционного управления, 3 – излучатель аэроионов, 4 – блок генерации озона, 5 – панель управления

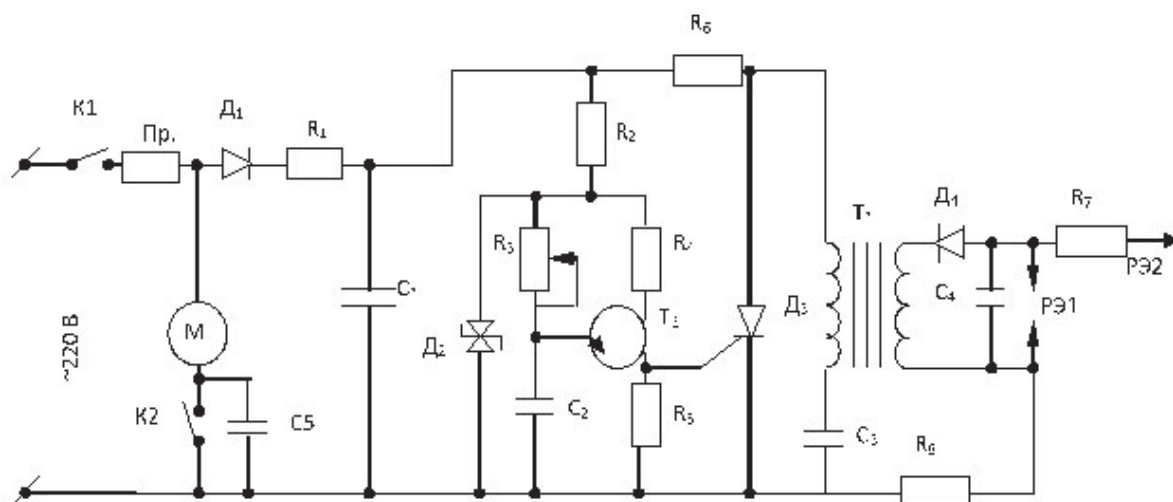


Рисунок 2.103 – Принципиальная схема ионизатора: Д₁-Д226Б, Д₂-Д814 Г, Д₃-КУ202Н, Д₄-КЦ106Г, Т₁-КТ117А, R₁-100 Ом, R₂-60 кОм, R₃-30кОм, R₄-1 кОм, R₅-100 Ом, R₆-10 кОм, R₇-1 Гом, R₈-1 Гом, C₁-100 мкФ, C₂-0,1 мкФ, C₃-0,1 мкФ, C₄-4700 пФ, М-вентилятор, Т₁-ТВС-110ЛА1

Разрядные электроды РЭ1 являются электрофильтром аэрозольных и дисперсных частиц. Конструктивно фильтр выполнен в виде плоского электрода (30×220 мм), над поверхностью которого располагается коронирующий проволочный электрод ($l = 200$ мм, $d = 0,25$ мм). В целях обеспечения безопасности эксплуатации, фильтр размещен внутри диэлектрического корпуса прибора перпендикулярно воздушному потоку, создаваемому вентилятором.

Электроды РЭ1, являющиеся излучателями аэроионов, выполнены в виде острия и располагаются на лицевой части ионизатора. В целях безопасности электроды разделены от источника питания (СЗ-5 15 кВ) сопротивлениями $R_7 = R_8 = 1$ Гом.

Работа прибора: вентилятор засасывает воздух из помещения и прогоняет его через электрофильтр, где он очищается от пыли и аэрозолей. Выходящий из корпуса прибора воздух попадает в зону генерации аэроионов и происходит смешение воздушного потока с наработанными ионами отрицательной полярности.

2.2. Методы измерений

Измерение электрических характеристик разряда осуществляется с помощью подключения электростатического киловольтметра и микроамперметра. Для определения концентрации озона в газовом потоке прибора используется йодометрический метод.

Концентрация ионов определяется методом аспирационного конденсатора по изменению скорости его разрядки. Конденсатор состоит из нескольких плоских параллельных металлических пластин, покрытых с одной стороны диэлектрической пленкой для разделения зарядов, через которые продувается воздух. Ионы с воздушным потоком движутся в электрическом поле конденсатора и осаждаются на его обкладках. Разрядка конденсатора происходит одновременно через входное сопротивление осциллографа или вольтметра за счет осаждения ионов. Чем больше ионов в воздухе, тем быстрее происходит разрядка конденсатора. Это наблюдается на более крутом изменении кривой графика разрядки. Сравнение кривых разрядки дает возможность определить ток ионов в конденсаторе и их концентрацию.

2.3. Электрические характеристики

Увеличение тока ионизатора происходит при повышении напряжения (рисунок 2.104). Изменение тока носит экспоненциальный характер, что характерно для коронного разряда. Максимальный ток ионизатора 120 мкА, при числе коронирующих электродов 54. При одинаковых напряжениях наблюдается непропорциональный рост электрического тока с увеличением числа электродов (рисунок 2.105), что обусловлено экранировкой электрического поля соседними электродами.

Ток одиночной короны (рисунок 2.106) оказывается больше тока 54-х коронирующих электродов, объединенных в одну кассету. Это обусловлено тем, что происходит

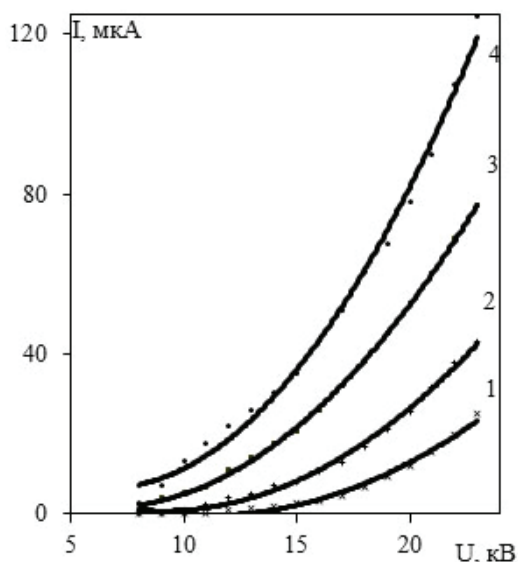


Рисунок 2.104 – Вольт-амперные характеристики ионизатора от числа коронирующих электродов: 1 – 2, 2 – 16, 3 – 30, 4 – 54

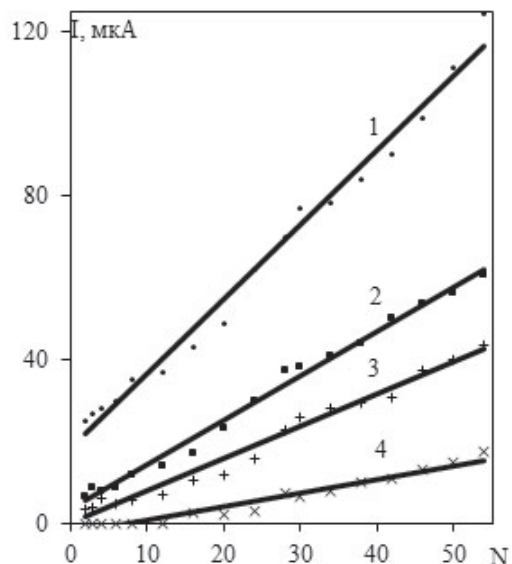


Рисунок 2.105 – Изменение тока от числа коронирующих электродов при напряжениях: 1 – 23; 2 – 18; 3 – 16; 4 – 11 кВ

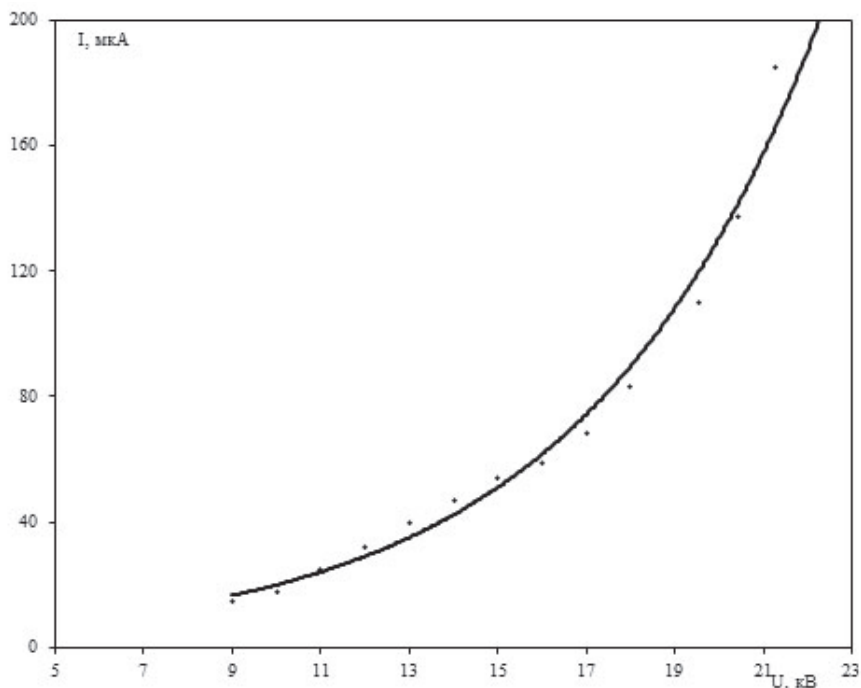


Рисунок 2.106 – Вольт-амперная характеристика коронирующего электрода

взаимное экранирование зарядов при использовании всей коробки с электродами. Поэтому источник аэроионов необходимо выполнять в виде одиночных коронирующих электродов, либо группы электродов, каждая из которых расположена на значительном расстоянии друг от друга. Подобная конструкция излучателя позволяет избежать взаимного воздействия объемного ионного заряда на структуру электрического поля короны вблизи коронирующих электродов.

2.4. Определение концентрации аэроионов и озона

Определение концентрации аэроионов и озона проводится в помещении объемом 98 м^3 : длина 7, ширина 5, высота 2,8 м. Концентрация озона измеряется через 5, 10, 20, 40, 80 и 160 мин после включения ионизатора, расположенного на высоте 1 м (рисунок 2.107). В начальный момент времени воздух в помещении неподвижен.

Максимальная концентрация озона наблюдается на расстоянии 10 см от ионизатора (рисунок 2.108). Содержание озона возрастает до $0,092 \text{ г/м}^3$ через 50 мин работы прибора и далее практически не меняется. Это связано с наступлением баланса между наработкой озона ионизатором и его разрушением на механических и биологических примесях воздуха. Предельно-допустимая концентрация озона в рабочих и бытовых помещениях составляет $0,1 \text{ мг/м}^3$. Поэтому работа прибора не нарушает санитарных гигиенических требований к воздуху, так как максимальная концентрация озона ниже предельно допустимого уровня.

Распределение концентрации аэроионов в помещении устанавливается в первые десятки минут и не зависит от времени работы прибора (рисунок 2.109). Только для расстояний менее 1 метра наблюдается увеличение концентрации до 9000 ионов через 2 часа работы ионизатора. Изменение концентрации отрицательных аэроионов в помещении на

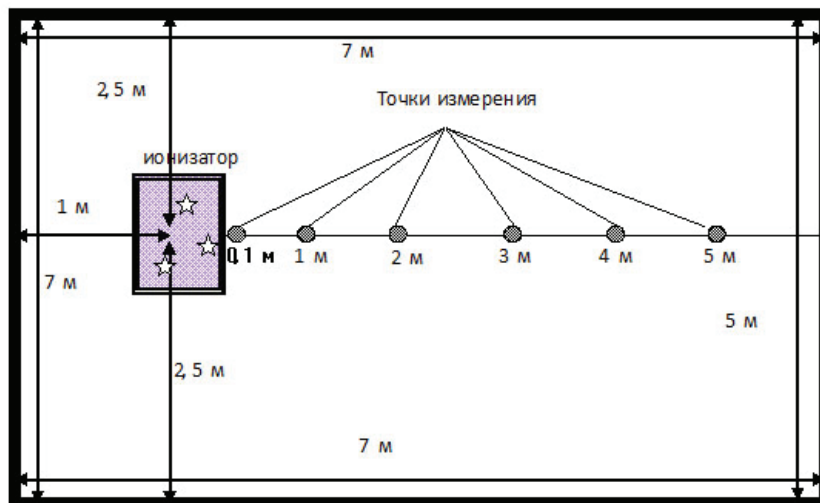


Рисунок 2.107 – План помещения и точки измерения концентрации озона и аэроионов в воздухе

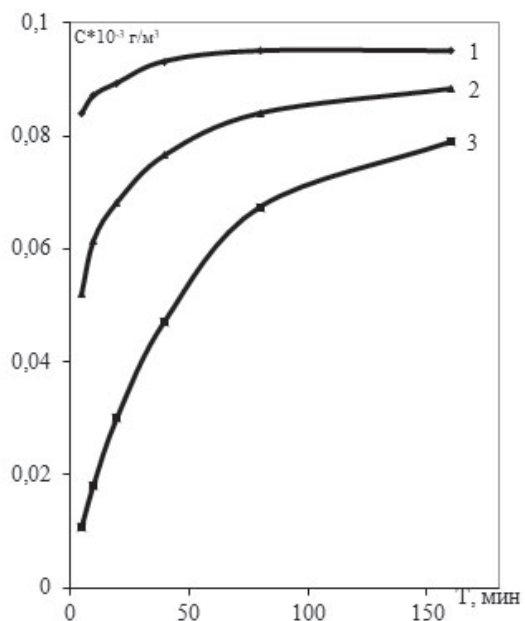


Рисунок 2.108 – Зависимость концентрации озона в помещении от расстояния до ионизатора: 1 – 0,1, 2 – 1, 3 – 5 м

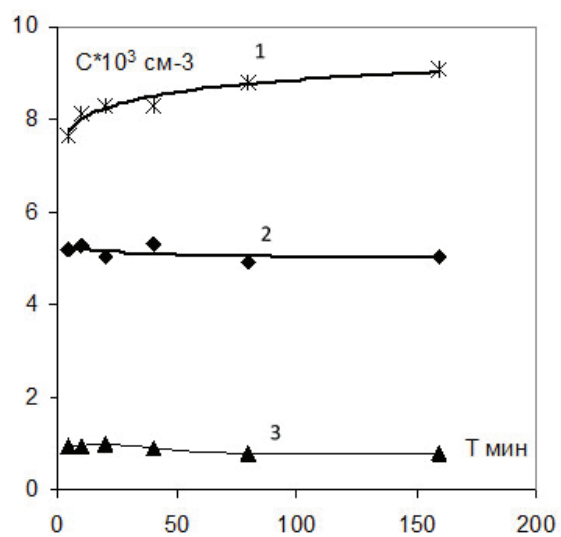


Рисунок 2.109 – Зависимость концентрации аэроионов от времени его работы и расстояния до ионизатора: 1 – 0,1, 2 – 1, 4 – 4 м

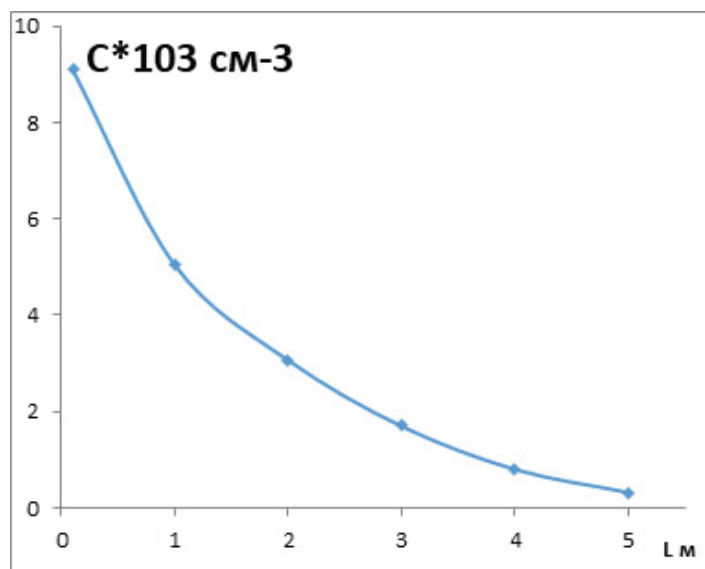


Рисунок 2.110 – Зависимость концентрации отрицательных ионов в помещении от расстояния до ионизатора

расстояниях от прибора (рисунок 2.110) носит нелинейный характер и быстро уменьшается с 9000 до 300 ионов/см³.

Интервал полученных концентраций аэроионов в ионизаторе (рисунок 2.102) удовлетворяет гигиеническим нормам Минздрава Российской Федерации, где для поддержания нормальных физиологических условий человека в окружающем воздухе должно содержаться 600–5000 см³ отрицательных аэроионов. Уровень ионизации 5000 ион/см³ является лечебной концентрацией аэроионов, и разработанный ионизатор может быть использован для лечебных и профилактических целей.

3. Синтез наноразмерных частиц золота в коронном разряде

3.1. Экспериментальная установка и методы исследования

Коронный разряд с высокотемпературной зоной ионизации в условиях нагрева коронирующего электрода позволяет расширить номенклатуру наноразмерных материалов [77, 78]. Для формирования активного поверхностного слоя наночастиц золота на алюминии, используется модифицированная технология газофазного осаждения. Синтез наноразмерных частиц в коронном разряде производится по следующей схеме:

1. В разрядном промежутке создается газовая среда, содержащая кислород или хлор;
2. Коронирующий электрод нагревается внешним источником тока до температуры испарения оксидов или хлоридов (температура испарения продуктов реакций должна быть меньше температуры плавления коронирующего электрода);
3. Зажигается коронный разряд, и испаряющиеся продукты реакций приобретают заряд, перемещаются электрическим полем и оседают на холодном электроде в виде наночастиц.

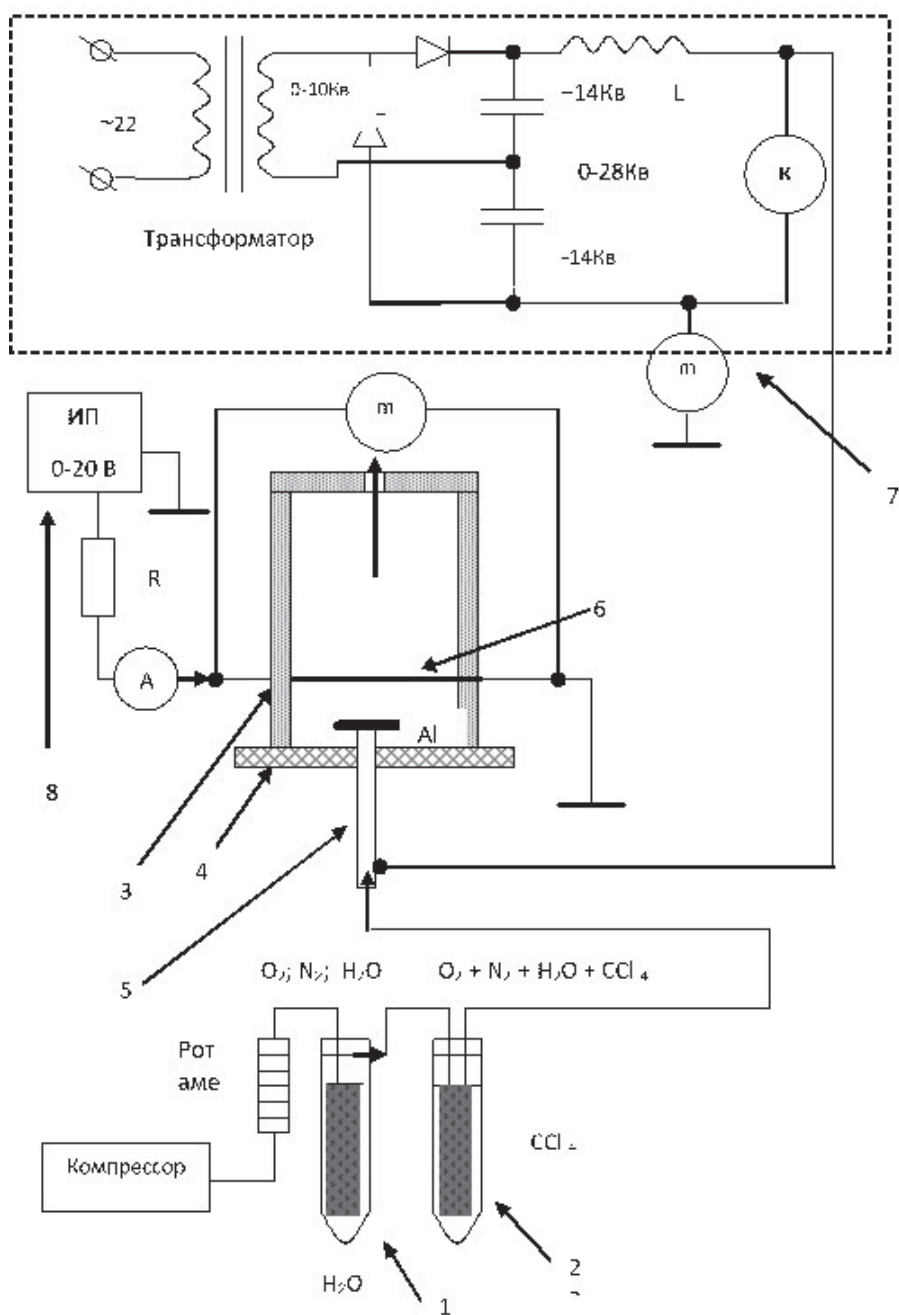


Рисунок 2.111 – Схема экспериментальной установки: 1, 2 – склянка Мюнке с дистиллированной водой и 4-х хлористым углеродом; 3 – герметичная стеклянная камера; 4 – столик для установки образцов алюминия в виде диска; 5 – патрубок ввода плазмообразующего газа; 6 – коронирующий золотой провод; 7, 8 – высоковольтный и низковольтный источники питания

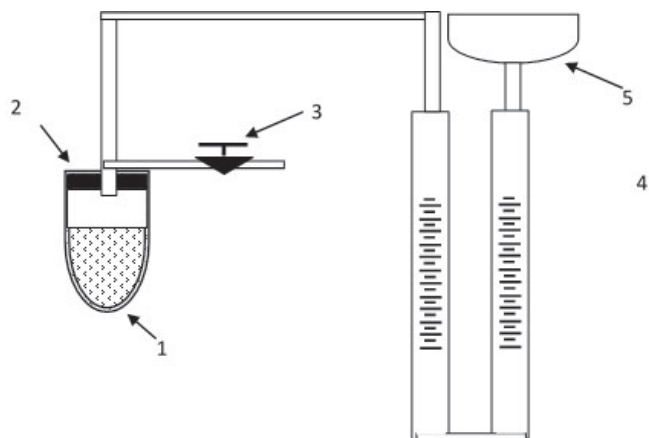


Рисунок 2.112 – Газометр: 1 – пробирка, содержащая перекись водорода; 2 – герметичная пробка; 3 – краник для уравнивания давления; 4 – U-образная трубка; 5 – воронка

Разработана схема экспериментальной установки для реализации технологии газофазного осаждения с горячей нитью (рисунок 2.111). В стеклянной герметичной камере 3 расположен проволочный электрод 6 из химически чистого золота, нагреваемый до необходимой температуры внешним источником тока (0–10 А). На расстоянии 4 см от провода располагается электрод 3 из химически чистого алюминия диаметром 14 мм и толщиной 0,3 мм. Относительно золотого электрода на алюминиевый электрод подается высокое напряжение 0–15 кВ. Атмосферный воздух, содержащий 4-х хлористый углерод и дистиллированную воду, с компрессора (расход 0,2 л/мин) подается в склянки Мюнке. Воздух, насыщенный данными парами, подается в камеру 3 под алюминиевый электрод 4.

Для последующего травления алюминиевых образцов в растворе перекиси водорода используется газометр (рисунок 2.112). Газометр состоит из пробирки, содержащей перекись водорода, в которую погружается алюминиевый диск. Пробирка закрывается пробкой и содержит краник для уравнивания давления. Газ, образованный вследствие реакции хлоридов с перекисью водорода, по трубке поступает в U-образную трубку, которая служит для подсчета количества вытесненной жидкости, которая в определенные промежутки времени попадает в воронку.

3.2. Изменение структуры поверхности алюминия

Исследования по изменению структуры поверхности алюминия под действием коронного разряда были проведены при различных увеличениях и условиях (рисунок 2.113). Поверхность исходных образцов алюминия гладкая и не содержит каких-либо наслоений. После воздействия на них коронным разрядом структура поверхности изменила цвет, и появились наслоения. После травления в перекиси водорода наслоения на поверхности образцов распадаются и остаются неровности в виде неравномерно распределенных бугорков. При большем увеличении в этих бугорках видны кратеры. Следовательно, бугорки представляют собой активную зону реакции, из которых выходит кислород, вследствие чего они не зарастают и в кратерах находятся наночастицы золота, образующие каталитические центры.

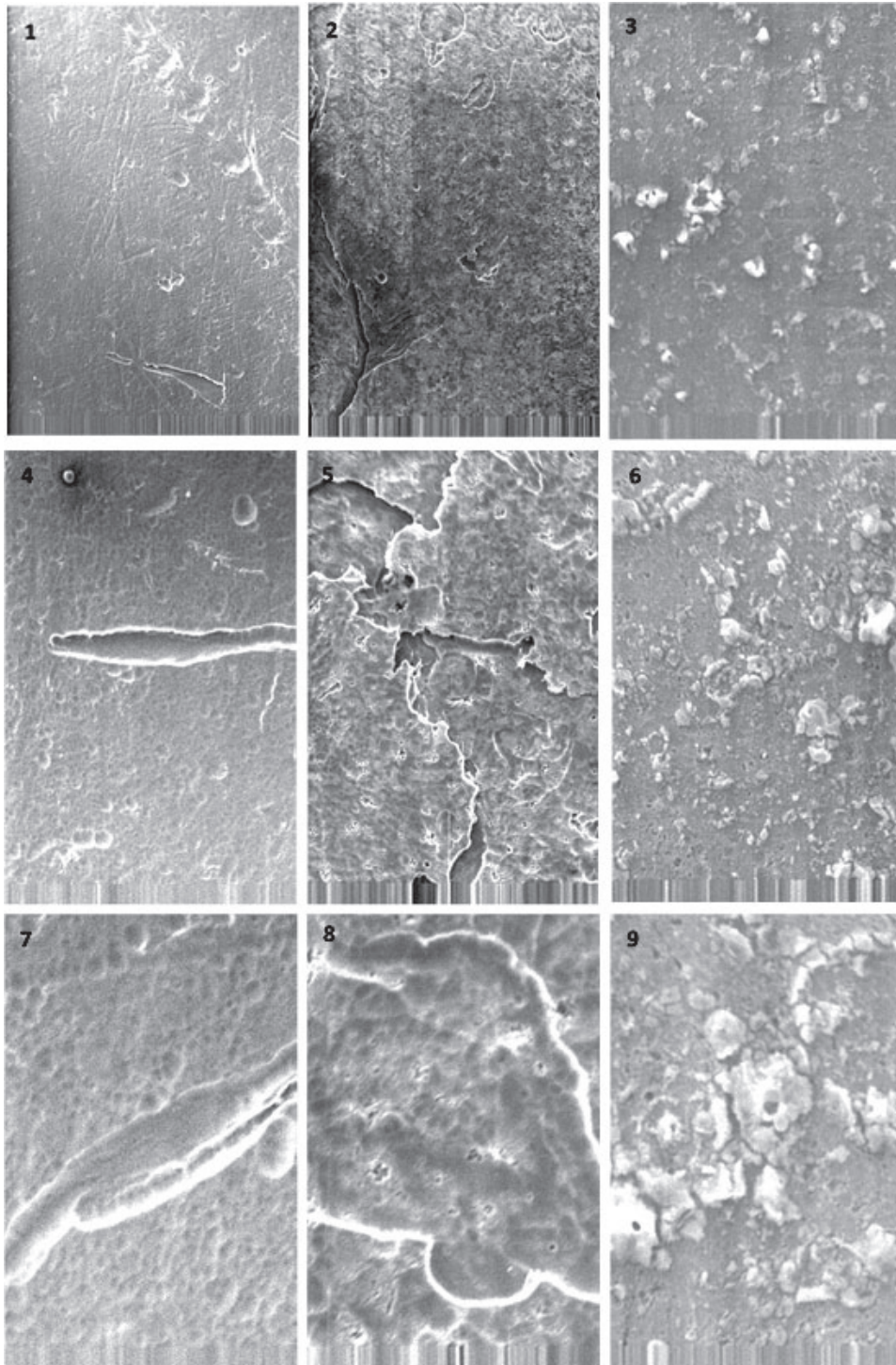
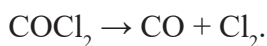
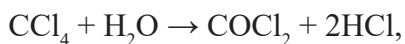


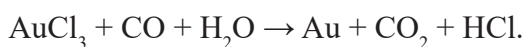
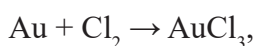
Рисунок 2.113 – Структура поверхности образцов алюминия при увеличении: 1–3 – в 90; 4–6 – в 250; 7–9 – в 530 раз. Первая колонка исходные образцы, вторая – после воздействия коронного разряда, третья – после травления в перекиси водорода

3.3. Разложение перекиси водорода на алюминии

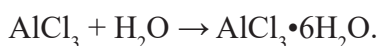
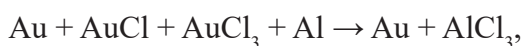
В присутствии кислорода воздуха и паров воды нагрев коронирующего электрода до температуры выше 300 °С инициирует на его поверхности реакции гидролиза 4-х хлористого углерода до фосгена, хлористого водорода и хлора:



Хлор образует на поверхности электрода хлориды золота, которые при температуре реакции сублимируют и приобретают заряд, одноименный со знаком напряжения на электроде (обратный к приложенному заряду):



В электрическом поле коронного разряда с высокотемпературной зоной ионизации заряженные хлориды золота дрейфуют в сторону алюминиевого электрода через холодную внешнюю зону разряда. На поверхности алюминия хлориды восстанавливаются до металлического золота:



Благодаря локальным неоднородностям электрического поля вблизи поверхности электрода, на алюминии формируются наноразмерные кластеры золота, которые являются центрами каталитического разложения перекиси водорода. Чистый алюминий не является активным катализатором разложения перекиси, но его примеси могут вносить свой вклад в кинетику процесса.

На рисунке 2.114 представлено сравнение кинетических зависимостей разложения перекиси водорода: 1) для исходного алюминия, 2) алюминия, обработанного в парах соляной кислоты, 3) в камере активации без подачи потенциала, 4) образца, обработанного в положительной короне, 5) активированного образца в отрицательной короне. Видно, что за достаточно большой промежуток времени на образцах 1–3 разложение перекиси водорода ничтожно мало и уменьшается практически до нуля (время травления более 50 мин). На образце 3, находившемся в камере во время активации образца 5 вне электрического поля, объем разложившейся перекиси водорода, по сравнению с образцами 1, 2, больше. Однако при сравнении с активированными образцами 4 и 5 он незначителен и указывает на отсутствие каталитического действия хлоридов алюминия при разложении.

При сравнении скорости разложения перекиси водорода на образцах, активированных в положительной (4) и отрицательной (5) коронах, было отмечено, что каталитическая активность 5-го образца на порядок больше. Данное поведение объясняется более эффективной зарядкой кластеров хлоридов золота, образующихся вблизи коронирующего провода в отрицательном коронном разряде. Поскольку во внешней зоне положительного коронного разряда отсутствуют процессы ионизации, то вероятность появления положительных ионов хлорида золота маловероятна. Поэтому нейтральные хлориды

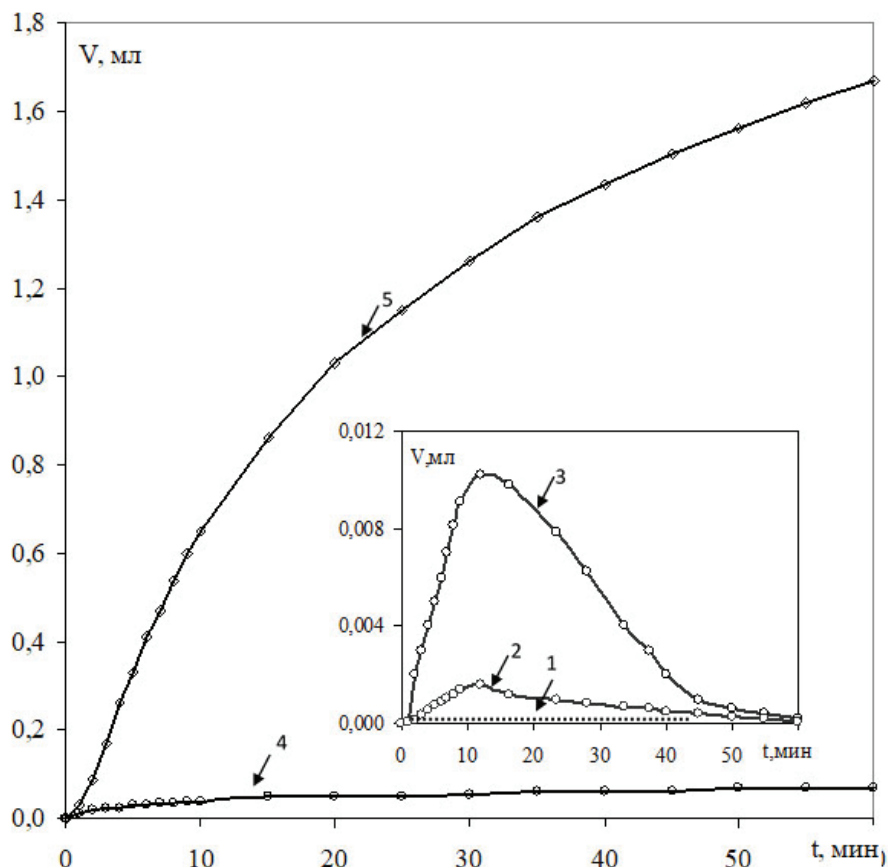


Рисунок 2.114 – Зависимость скорости выделения кислорода от условий эксперимента с образцами: 1 – исходный; 2 – травленный в парах HCl; 3 – под плавающим потенциалом; 4 – в положительной короне; 5 – в отрицательной короне

золота в положительной короне не могут транспортироваться электрическим полем на поверхность образца, а выносятся газовым потоком из зоны осаждения.

На скорость разложения влияет температура коронирующего электрода (рисунок 2.115). На рисунке видно, что максимальная каталитическая активность соответствует образцу, на который воздействовал коронный разряд с температурой поверхности нити 300 °С. С ростом температуры (400, 600 °С) каталитическая активность уменьшается.

Проведена оценка влияния времени осаждения на каталитическую активность (рисунок 2.116). Время активации при изменении от 5 до 30 мин с шагом 5 мин, влияет на кинетические характеристики разложения перекиси водорода. Основным показателем активности за время t служит объем V выделившегося кислорода в результате реакции разложения перекиси водорода на кислород и воду. За время активации образцов ~20 мин происходит стабилизация процесса осаждения и выделяется кислород (рисунок 2.117). Начальный участок кривой от 5 до 10 мин характеризует рост каталитических центров на поверхности алюминия. Дальнейшее уменьшение приводит к увеличению размеров каталитических центров путем осаждения дополнительных кластеров золота и к снижению каталитических свойств поверхности подложки.

Модифицированный метод газофазного осаждения золота позволяет изменить физико-химические характеристики поверхности алюминия пассивного, изначально,

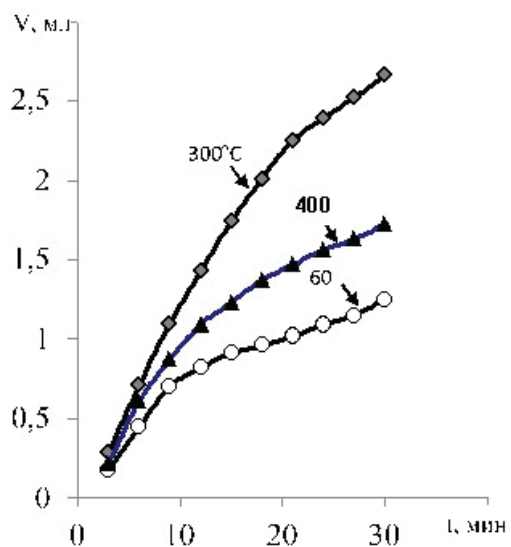


Рисунок 2.115 – Изменение скорости реакции от температуры коронирующего провода

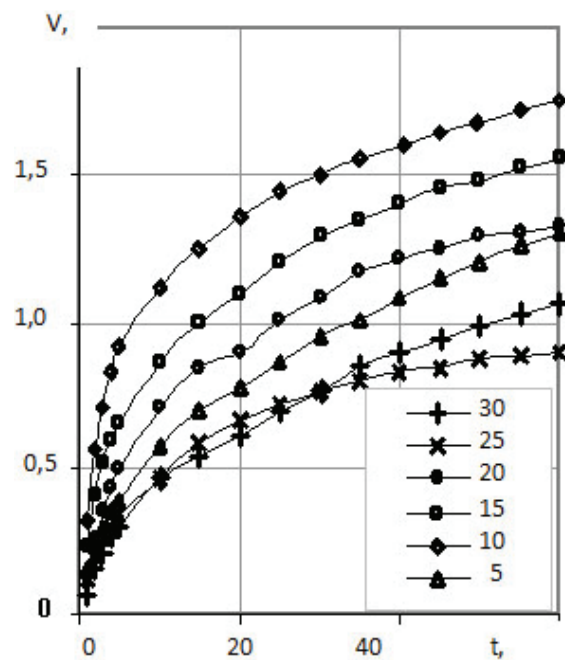


Рисунок 2.116 – Кинетическое разложение перекиси водорода для образцов с различным временем активации

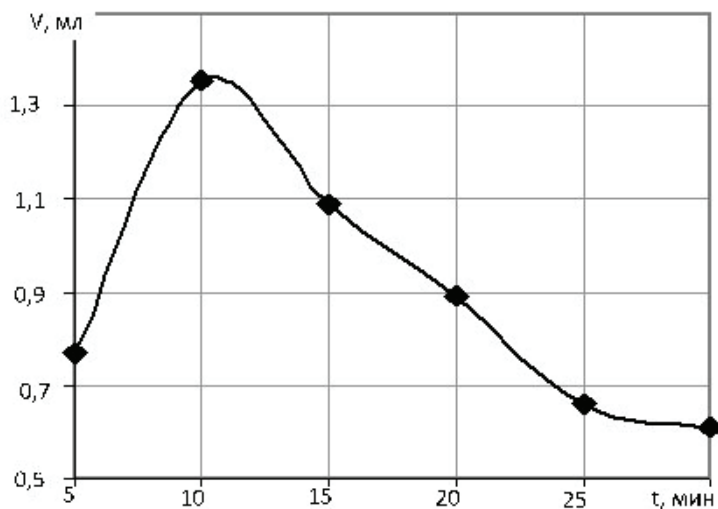


Рисунок 2.117 – Зависимость объема выделившегося кислорода от времени активации образцов

к перекиси водорода. Это проявляется в изменении цвета поверхности и исчезновении блеска. Каталитическая активность разложения перекиси водорода на кислород и воду, и её скорость сложным образом зависят от температуры золотого электрода, времени и состава среды. Эффективным способом активации алюминия является осаждение нанокластеров золота в отрицательном коронном разряде с высокотемпературной зоной ионизации.

4. Газофазный синтез наноксида молибдена

4.1. Установка для синтеза оксида молибдена

Для проведения синтеза наноразмерного оксида молибдена коронный разряд зажигался в разрядной ячейке коаксиальной геометрии со следующими параметрами (рисунок 2.118): радиус коронирующего молибденового электрода $r = 0,2$ мм, внутренний радиус цилиндрического дюралюминиевого электрода $R = 28$ мм, длина – 30 мм [79].

Для исключения воздействия конвективного потока газа, вследствие нагрева межэлектродного промежутка на осевую симметрию разряда, ячейка ориентирована вертикально. Нагрев коронирующего электрода до температуры ~ 1500 °С производится электрическим током от низковольтного регулируемого источника питания. Для зажигания коронного разряда на цилиндрический электрод 2 подавалось высокое напряжение (0–20 кВ) положительной или отрицательной полярности относительно заземленного коронирующего электрода 1 из молибдена. Температура молибденового электрода определялась визуально с помощью яркостного пирометра. Измерение электрических характеристик производилось с помощью электростатического киловольтметра и микроамперметра.

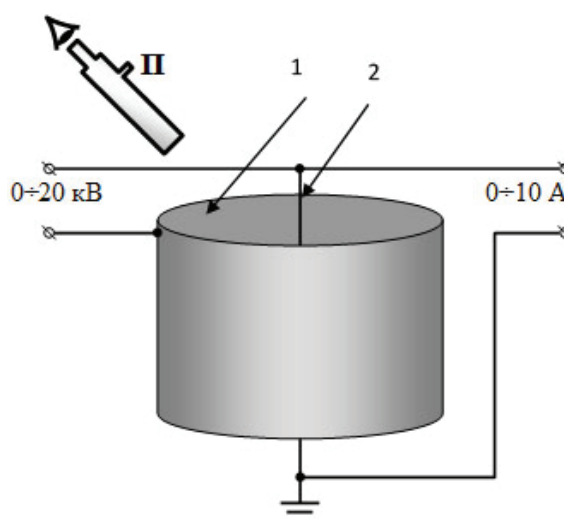


Рисунок 2.118 – Коаксиальная разрядная ячейка: П – пирометр регистрирующий температуру, 1 – внешний электрод, 2 – молибденовый коронирующий электрод

4.2. Морфология оксида молибдена

Установлена нелинейная зависимость электрического тока коронного разряда от тока накала и температуры молибденовой нити для положительной и отрицательной короны при напряжении 16 кВ (рисунок 2.119). При повышении температуры молибдена до 900К наблюдается увеличение тока короны, что согласуется с механизмами развития коронного разряда.

При высокой температуре происходит активное образование оксидов молибдена, которые при испарении заряжаются одноименным с электродом зарядом. Заряженные частицы оксида под действием электрического поля отрываются от электрода и движутся к противоположному электроду. Перенос заряда в межэлектродном промежутке, наряду

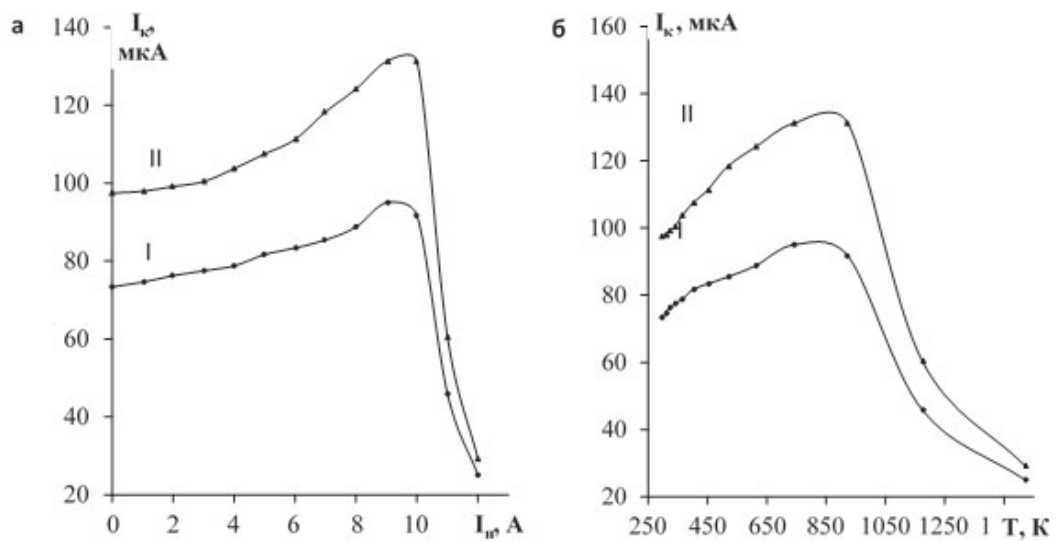


Рисунок 2.119 – Зависимость тока коронного разряда положительной (I) и отрицательной (II) полярностей от тока накала (а) и температуры (б) коронирующего электрода

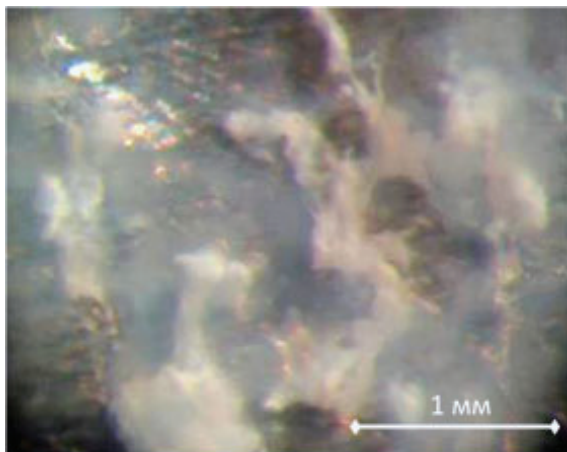


Рисунок 2.120 – Общий вид осажденного оксида молибдена

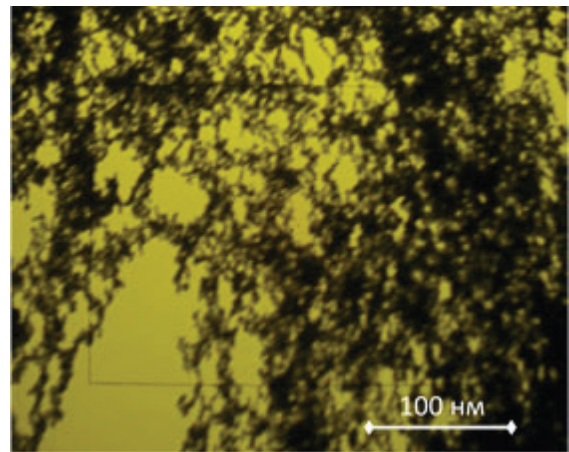


Рисунок 2.121 – Синтезированный оксид молибдена в просвечивающем электронном микроскопе

с электронами и ионами, осуществляется частицами оксида молибдена. Поскольку подвижность этих частиц меньше подвижности электронов и ионов, то наблюдается уменьшение значений тока короны. При продолжающемся росте температуры все большее количество частиц оксида молибдена участвуют в переносе заряда. Наблюдается уменьшение тока коронного разряда (более чем в 3 раза) по сравнению с током, непосредственно перед началом сублимации частиц оксида молибдена. Ток короны стремится к одной и той же величине, как в случае положительной, так и в случае отрицательной полярности. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что на данном этапе перенос тока через разрядный промежуток происходит за счет заряженных частиц молибдена.

Оптическая микроскопия осажденного оксида (рисунок 2.120) показывает, что между дендритными образованиями белесого цвета наблюдаются «туманности», которые

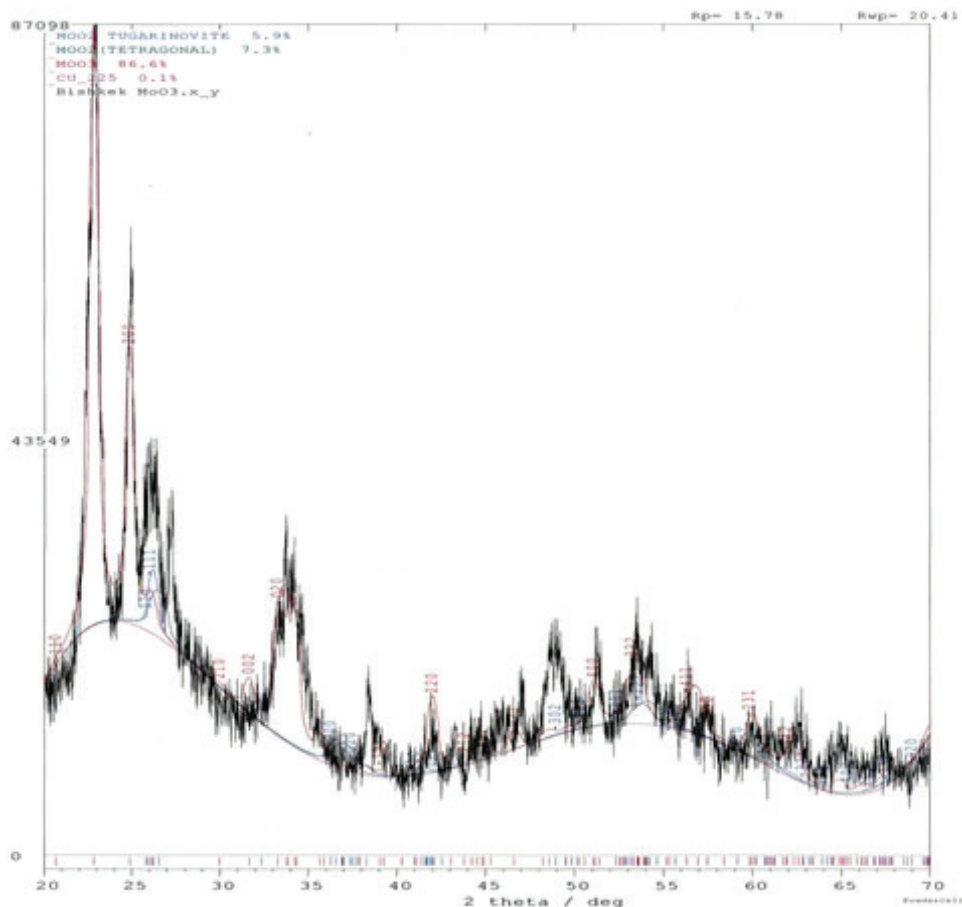


Рисунок 1.122 – Результаты количественного рентгеноструктурного анализа

являются вкраплениями аэрогелеподобного триоксида молибдена в MoO_3 . Электронная микроскопия (рисунок 2.121) позволяет различить отдельные кластеры оксида молибдена и образующуюся аморфную гелеподобную структуру.

Результаты рентгеноструктурного анализа (рисунок 2.122) показали, что рентгеновские пики наложены на более широкие, но менее интенсивные составляющие, что соответствует аморфной структуре материала. Для MoO_3 , содержание которого в продуктах осаждения составляет 86 %, данное строение нехарактерно, но для гелеподобного триоксида молибдена аморфная структура единственно возможна.

Таким образом, осаждение частиц оксида молибдена на подложку происходит по двум сценариям: 1) одни частицы микроскопического масштаба при осаждении отдают заряд на подложку, образуя на поверхности локальные неоднородности электрического поля, за счет которых подлетающие частицы осаждаются и образуют дендритные структуры; 2) другие частицы наноразмерного масштаба при осаждении образуют гелеподобные структуры триоксида молибдена, распределенные между дендритами, что наблюдается при оптической и электронной микроскопии.

5. Электроочистка газов в поле коронного разряда

Первую промышленную установку для электростатической очистки паров серной кислоты на основе коронного разряда испытал в 1907 г. Ф.Г. Котрелл [1]. В настоящее время проводятся интенсивные исследования по развитию и внедрению новых технологий электрической очистки запыленных газов [80–83].

В данной работе представлена конструкция, разработанная в лаборатории «Плазменные технологии» КРСУ [12], газодинамического электрофильтра для очистки газов производительностью до 10 000 м³/час на основе импульсного периодического коронного разряда (рисунок 2.123), который улавливает практически 100 % пыли с энергетическими затратами на очистку 0,15–0,25 кВт ч/1000 м³ газа. По сравнению с классическим электрофильтром, данная конструкция сокращает длину зоны улавливания пыли, массу металла, снижает напряжение, необходимое для горения коронного разряда.

5.1. Электрическая очистка газа

Осаждение заряженных частиц на электроде зависит от технологических параметров и от свойств осаждаемой пыли: электропроводности, размеров и формы частиц, скорости частиц и газа в электрофильтре, температуры, влажности, химического состава, формы электродов и состояния их поверхности.

В основе действия электрофильтра лежат следующие процессы: зарядка частиц, перенос их к «осадительному» (не коронирующему) электроду и осаждение частиц на данном электроде. Носителями заряда являются ионы и электроны, которые движутся под действием электрического поля. При столкновении с ними частицы приобретают заряд той полярности, которую имеет коронирующий электрод. При увеличении числа ионов или электронов, осевших на частице, возрастают её заряд и напряжённость электрического поля. В результате уменьшается скорость движения ионов или электронов к частице и скорость её зарядки. При равенстве напряженности поля частицы и внешнего электрического поля зарядка прекращается.

Особенностью горения коронного разряда является наличие электрического ветра, возникающего от коронирующего электрода, в результате которого частицы и молекулы газа при столкновении с ним получают дополнительный газодинамический импульс при движении к осадительному электроду [84–87].

На входе в газодинамическом электрофильтре (рисунок 2.124) установлен диэлектрический конус 6 для смещения пылевого потока газа к стенкам электрода. Вблизи коронирующего электрода за счет электрического ветра 3 возникает вихревое газодинамическое течение 4, которое отесняет набегающий пылевой поток 5 ближе к стенкам электрода. В результате этого пылегазовый поток 6 движется вблизи стенок через зону горения коронного разряда, пыль заряжается и осаждается на поверхности электрода.

В электрофильтрах с большим межэлектродным расстоянием газодинамическое течение 4 формируется далеко от поверхности осадительного электрода. Это приводит к незначительному отеснению пылегазового потока к поверхности электрода и электрический ветер не вносит существенного вклада в процессы фильтрации пыли.

Чем меньше диаметр электрофильтра, тем на более коротком расстоянии улавливается ~100 % пыли. Например, оптимальная длина электрофильтра (100 % очистка) для

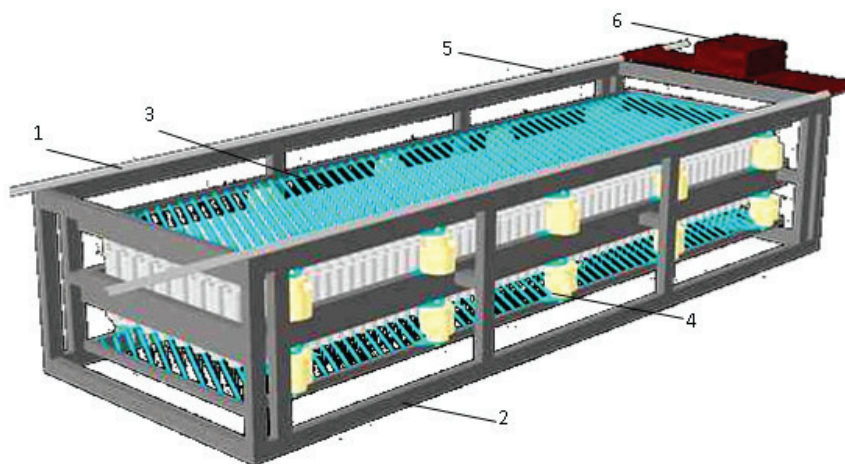


Рисунок 2.123 – Газодинамический электрофильтр: 1, 6 – электроды, 2 – корпус, 3 – коронирующие электроды, 4 – керамические изоляторы, 5 – полозья с механизмом пневматической очистки

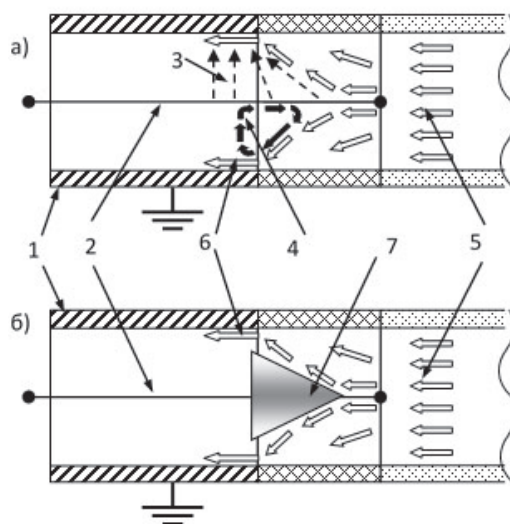


Рисунок 2.124 – Движение газа в газодинамическом электрофильтре (а), движение с учетом диэлектрического конуса 7 (б): 1, 2 – осадительный и коронирующий электроды, 3 – электрический ветер, 4 – вихревое газодинамическое течение, 5, 6 – пылегазовый поток

$d = 36$ мм, $U = 10,5$ кВ, составляет ~ 132 мм. При $d = 51$ мм, $U = 17$ кВ скорость электрического ветра составляет $4,7$ м/с, формируется газодинамический тороидальный вихрь с радиусом вращения ~ 10 мм и частотой 75 Гц. Под действием центробежных газодинамических и электростатических сил пыль практически полностью осаждается на расстоянии $2-3$ диаметров электрофильтра [88].

5.2. Линейный коронно-факельный разряд в запыленном газе

Промышленные электрофильтры эксплуатируют в предпробойных режимах с напряжениями $\sim 50-70$ кВ, при этом достигаются высокие плотности тока коронного разряда и увеличивается степень очистки газа.

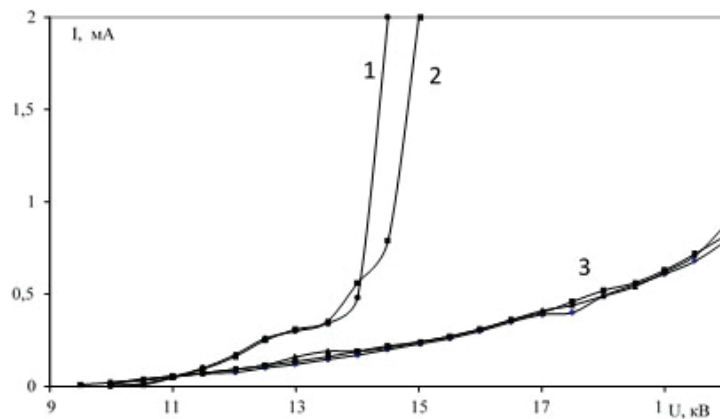


Рисунок 2.125 – Вольт-амперные характеристики в запыленном воздухе: ЛКФР $V = 2,3$ (1), $0,58$ (2) м/с, положительная корона (3). Температура газа $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

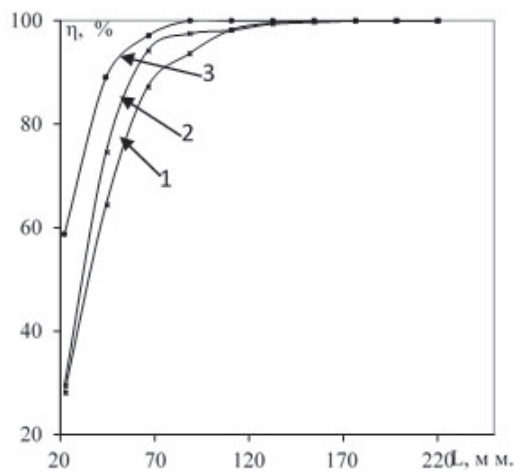


Рисунок 2.126 – Зависимость степени очистки газа η в положительной 1, отрицательной 2 короне и ЛКФР 3. Для скорости потока газа 2 м/с

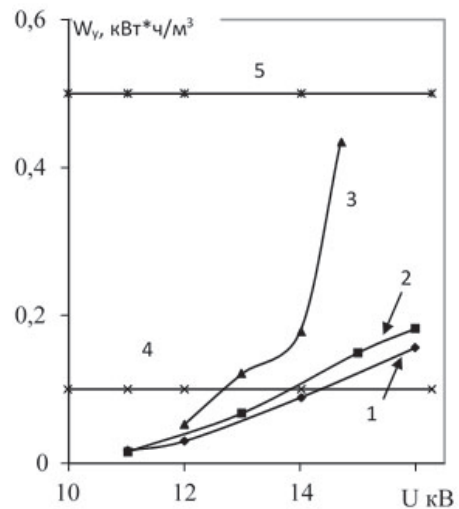


Рисунок 2.127 – Удельные энергетические затраты: 1 – положительная корона, 2 – отрицательная корона, 3 – ЛКФР, 5, 6 – максимальный и минимальный уровни, используемые в промышленности

В линейном коронном факельном разряде положительной полярности (ЛКФР) можно уменьшить рабочие напряжения и увеличить силу тока [50]. Результаты эксперимента (рисунок 2.125) показали, что в ЛКФР в предпробойных режимах горения сила тока в 3–10 раз превышает ток классической короны. Рассмотрим очистку газа в ЛКФР при запыленности воздуха в интервале $8\text{--}29\text{ г/м}^3$. При переходе от незапыленного воздуха к запыленному, наблюдается незначительное уменьшение силы тока разряда с 2,5 до 2 мА. Это связано с уменьшением количества легких носителей зарядов в разрядном промежутке, которые ушли на зарядку частиц пыли. При температуре $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, ток ЛКФР в десять раз превышает ток положительной короны. Изменение скорости проходящего запыленного воздуха $V = 0,58\text{--}2,3\text{ м/с}$ практически не влияет на силу тока [88, 89], так как большую роль при горении коронного разряда в формировании газодинамической картины течения играет электрический ветер.

5.3. Сравнение эффективности очистки газов

Сравнение эффективности очистки газов от пыли проводится в коронных разрядах положительной 1, отрицательной 2 полярностей и ЛКФР 3. Результаты эксперимента (рисунок 2.126) позволили установить, что при скорости запыленного потока газа 2 м/с, степень очистки газа изменяется в зависимости от типа разряда. При напряжении 14 кВ в отрицательной короне осаждение пыли происходит интенсивнее, чем в положительной.

Полная степень очистки газа в ЛКФР наступает при меньших длинах электрофильтра, чем в положительной или отрицательной коронах. Увеличение скорости до 4 м/с приводит к снижению более чем в два раза максимальных удельных энергетических затрат в случае ЛКФР, а в случае положительной и отрицательной корон – почти в два раза. Удельные энергетические затраты отрицательной короны меньше, чем в положительной короне и ещё меньше, чем в ЛКФР. При напряжениях свыше 14 кВ, удельные энергетические затраты ЛКФР резко возрастают, и одновременно ухудшается степень очистки газа.

На рисунке 2.127 видно, что удельные энергетические затраты в ЛКФР выше, чем в положительной и отрицательной коронах и находятся в пределах, принятых в промышленности.

6. Контроль состояния поверхности стальных канатов

Наиболее важным параметром контроля состояния стальных канатов является их надёжность [90], которая определяется потерей среднего сечения и числом обрывов проволок. При неразрушающем контроле стальных канатов используются электромагнитные методы дефектоскопии, основанные на оценке магнитного поля вдоль участка каната и регистрации распределения магнитного потока, при изменении площади сечения или обрыва проволок.

В данной работе предложен метод оперативного неразрушающего контроля обрыва проволок с помощью регистрации электрического тока коронного разряда, как датчика информации о состоянии стального каната [91].

6.1. Методика неразрушающего контроля

Разработана экспериментальная установка для контроля состояния поверхности стального каната с помощью коронного разряда (рисунок 2.128). Канат 1 с дефектом в виде порванной проволоки 2 протягивается через кольцевой электрод (датчик 3). Между канатом и кольцевым электродом создаётся электрическое поле с помощью высоковольтного источника питания (ВИП). При движении каната через кольцевой электрод в случае обрыва провода у его конца, вблизи датчика напряжённость электрического поля достигает критической величины, необходимой для формирования коронного разряда 4 и протекания электрического тока. Это позволяет зарегистрировать местоположение разрыва отдельных проволок на поверхности стального каната и подсчитать их количество на одном шаге свивки каната. Критическая напряжённость электрического поля оценивается по формуле Пика и зависит от температуры, состава окружающего газа, диаметра каната и датчика.

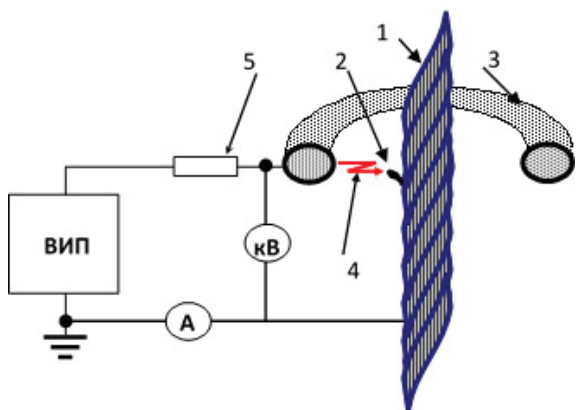


Рисунок 2.128 – Схема экспериментальной установки: 1 – канат; 2 – дефект каната; 3 – кольцевой электрод (датчик); ВИП – высоковольтный источник питания; 4 – коронный разряд; 5 – ограничивающее сопротивление, А – микроамперметр, кВ – киловольтметр

В случае применения стального каната диаметром 10 мм и датчика (внутренний диаметр 40 мм, толщина 13 мм) было установлено, что в воздухе при нормальных условиях необходимое напряжение составляет 16 кВ. При более высоких напряжениях коронный разряд с каната загорается даже без дефектов, что осложняет регистрацию порывов проволок. Для предотвращения перехода коронного разряда в дуговой, датчик соединяется с ВИП через ограничивающее сопротивление 5. Ток и напряжение разряда регистрируются микроамперметром и киловольтметром.

6.2. Датчик порывов проволок

Важным элементом установки является датчик порывов проволок каната (рисунок 2.129), состоящий из кольцевого проводящего электрода 1 и восьми диэлектрических полуколец 2. Кольцевой электрод подключён к высоковольтному источнику питания. Коронный разряд возникает между кольцевым электродом и дефектами в канате (концы оборванных проволок). Диэлектрические кольца формируют электрическое поле таким образом, чтобы коронный разряд зажигался в момент прохождения концов обрыва проволок внутри кольцевого электрода и исключал возникновение разряда на дефектах, находящихся вне его. При движении стального каната регистрация электрического тока возникающего коронного разряда дает информацию о количестве обрывов проволок на единицу длины.

Для определения чувствительности метода к величине дефектов созданы порывы проволок каната с различной длиной выступающих концов от его поверхности: $l = 0; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5$ мм. Канат протягивается через кольцевой электрод с постоянной скоростью.

6.3. Результаты измерений

Зависимости на рисунке 2.130 показывают, что без диэлектрических шайб и при постоянном напряжении 16 кВ для отрицательного и положительного коронных разрядов электрический ток распределяется симметрично относительно центра датчика. Даже порванная проволочка, не выступающая над канатом ($l = 0$), способна формировать коронный разряд. При прохождении через датчик стального каната с дефектами (наличие порывов проволок с различной длиной выступающей части), электрические токи короны превышают фоновые значения ($l = 0$) в несколько раз, что подтверждает возможность регистрации порыва проволок. Величина максимального тока коронного разряда

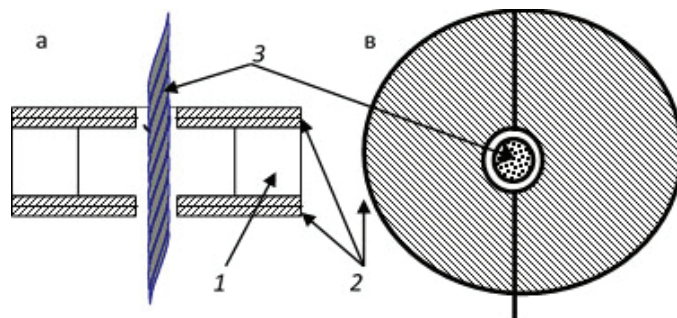


Рисунок 2.129 – Конструкция датчика: (а – вид с боку; в – вид сверху): 1 – кольцевой электрод, 2 – восемь диэлектрических полуколец, 3 – стальной канат с дефектом (порыв проволоки)

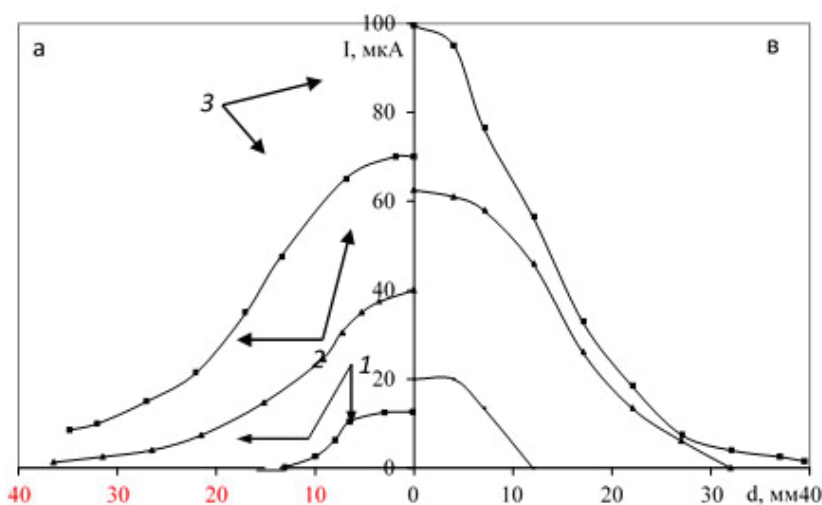


Рисунок 2.130 – Зависимость тока коронного разряда от положения дефекта $l = 0$ (1), 2 (2) и 5 (3) мм относительно центра датчика: а – отрицательная корона, в – положительная корона

достаточна для однозначного определения порыва проволоки. Чувствительность метода увеличивается при регистрации порывов проволок каната положительной короны, так как максимальная величина электрического тока больше, чем у отрицательной короны (рисунок 2.130). Электрический ток коронного разряда начинает протекать в измерительной цепи до того, как дефект каната окажется внутри датчика. Поэтому для повышения разрешающей способности применительно к конкретным размерам стальных канатов, оптимизируются размеры датчика и напряжённость электрического поля [91].

С целью локализации коронного разряда внутри датчика, проведена его защита от преждевременного возникновения коронного разряда с помощью набора диэлектрических шайб (рисунок 2.129), расположенных с двух сторон кольцевого электрода. Шайбы выполнены из диэлектрика с малыми электрическими токами утечки и способны работать в сильных электрических полях. Изменение электрического тока разряда от расстояния между дефектом каната и центром датчика для двух электродов (внутренний диаметр $D = 25$ (1) и 40 (2) мм) зависит от расположения диэлектрических шайб (рисунок 2.131). Когда шайбы расположены с одной стороны, то правая часть кривой имеет большую крутизну. Электрический ток становится пренебрежимо малым на расстояниях 7–8 мм до центра датчика. В левой части графика ток разряда составляет 15–20 мкА даже на

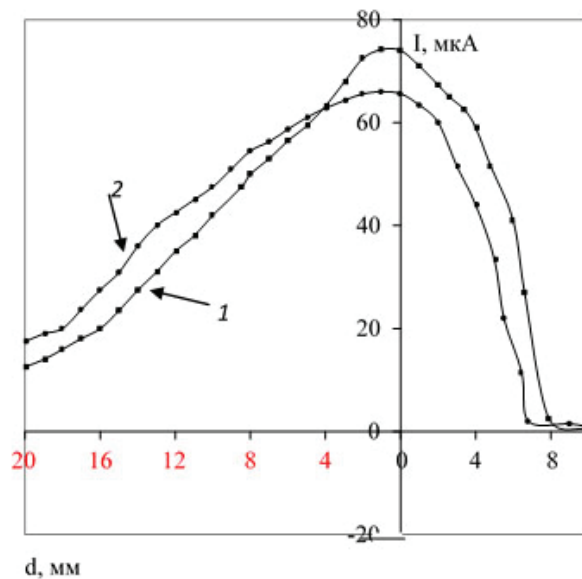


Рисунок 2.131 – Зависимости электрического тока отрицательной короны от расстояния между дефектом каната и центром датчика (внутренний диаметр датчика $D = 25$ (1) и 40 (2) мм). Диэлектрические шайбы расположены с правой стороны

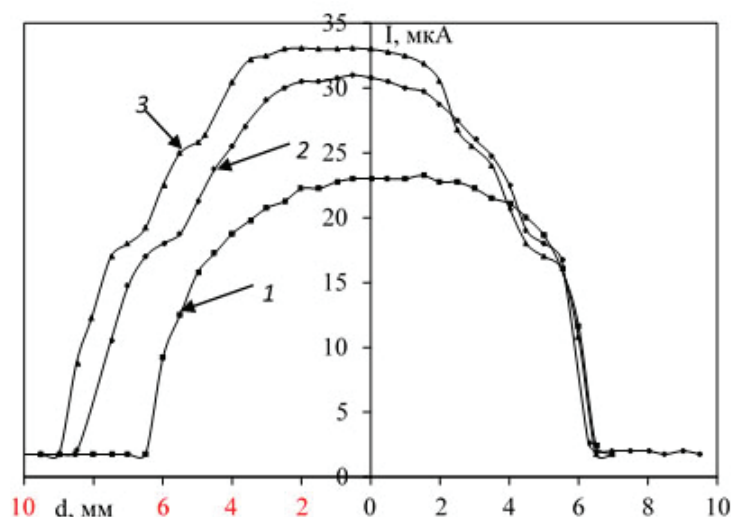


Рисунок 2.132 – Изменение электрического тока положительной короны от расстояния до центра датчика, в зависимости от числа разрывов проволоки каната: $N = 1$ (1), $N = 2$ (2), $N = 3$ (3). Расстояние между разрывами 2–3 мм

расстояниях 20 мм от центра. Различие правой и левой частей зависимостей подтверждает возможность увеличения пространственной разрешающей способности метода путём локализации диэлектрическими шайбами коронного разряда внутри датчика.

Проведены измерения электрического тока положительной короны от расстояния между дефектами каната и центром датчика в зависимости от числа порывов проволок (рисунок 2.132). Кривая $N = 1$ построена для дефекта в виде одной разорванной проволоки каната, выступающей от поверхности на 1 мм. Кривые $N = 2$ и 3 построены для дефектов в виде двух и трех порванных проволок. Расстояние между разрывами – 2 мм

вдоль оси каната. С обеих сторон датчика размещены диэлектрические шайбы. Результаты эксперимента показали (рисунок 2.132), что для одного обрыва проволоки зависимость электрического тока от расстояния представляет симметричную кривую относительно центра датчика. При движении стального каната коронный разряд зажигается на расстоянии ~ 6 мм от центра датчика, а при прохождении каната через центр датчика на таком же расстоянии гаснет. При наличии двух и трёх обрывов проволок на диаграммах наблюдаются ступеньки тока, которые соответствуют поочередному входу в датчик концов порванных проволок [4].

С помощью стандартного аналого-цифрового преобразователя выходной сигнал электрического тока преобразуется в цифровой, что позволяет автоматически проводить подсчёт количества обрывов проволок на единицу длины стального каната с разрешением 0,5 мм между соседними обрывами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии приведены общие данные об удивительном газе – озоне и его свойствах, о получении и применении озона в нашей жизни. Кратко изложена информация о некоторых типах электрических разрядов – генераторах озона.

Основное внимание уделено разработке различных конструкций озонаторов на основе барьерных и коронных разрядов, как наиболее эффективных и практичных источников получения озона в лабораторных и в промышленных масштабах. Рассматриваются и развиваются методы исследования характеристик плазмы барьерных и коронных разрядов для создания новых эффективных технологий получения озона. Краткие результаты некоторых из них представлены ниже.

Разработан озонатор, который обеспечивает подвод мощности к диэлектрическому барьеру не через металлический электрод, а с помощью газоразрядной плазмы. Плазменный электрод путем изменения электрических характеристик барьерного поверхностного разряда позволяет повысить энергетическую эффективность синтеза озона.

Для барьерного разряда комбинированного типа определены геометрические параметры разрядного контура, при которых происходит максимальное использование подводимой электрической мощности, идущей на синтез озона.

В озонаторе на поверхностном разряде с коронирующим электродом коэффициент теплопередачи увеличивается за счет перемешивания газа электрическим ветром. Показано, что без электрического ветра эффективный синтез озона в данном типе озонатора становится неэффективным.

Озонаторные установки на основе подвижных барьеров позволяют использовать эффект вращения диэлектрика в электрическом поле, что способствует снижению разрушения барьера электрическим разрядом и увеличению ресурса работы озонатора.

Новым подходом в системах синтеза озона являются гибридные озонаторы, сочетающие в одном устройстве высокочастотный преобразователь, повышающий трансформатор и разрядную ячейку. Межслойная изоляция вторичной высоковольтной обмотки играет роль диэлектрического барьера в разрядной ячейке и конструктивно выполнена в виде коаксиальных цилиндров с газовым зазором для ввода кислорода или воздуха. Гибридный озонатор сокращает капитальные затраты на его создание и способствует увеличению производительности озона и снижению энергетических затрат на его синтез.

На основе высокочастотного барьерного разряда изготовлены опытные образцы озонаторов PLASMALAB и PLASMALAB D2, которые предназначены для получения озона из кислорода с энергетическими характеристиками, удовлетворяющими требованиям промышленного синтеза озона.

Разработана эффективная технология экспресс стерилизации медицинских инструментов, включающая совместное действие озона, ультрафиолетового излучения, атомарного кислорода и свободных гидроксильных радикалов.

Озонаторная установка с барьером из полиэтилена низкой плотности, выполненного в виде термоусадочной трубки, позволяет получать высокие концентрации озона при низких токах и небольших энергетических затратах.

Изучение особенностей горения барьерного разряда в воздухе в условиях больших разрядных промежутков позволило разработать систему возбуждения барьерного разряда на поверхность полимеров сложной геометрии для их активации перед нанесением на их поверхность надписей и логотипов.

Разработаны высоковольтные источники питания различного назначения, предназначенные для работы озонаторных установок на барьерном, коронном и импульсно-периодическом коронном разрядах.

Уникальные свойства коронного разряда способствуют развитию разнообразных технологических приложений, таких как получение озона, электрическая очистка газа, создание униполярных газовых и аэрозольных потоков, электрографии, дефектоскопии, активации порошковых материалов, накачки сред газовых лазеров.

Разработано устройство и исследованы характеристики коронного разряда с коаксиальной геометрией и высокотемпературным коронирующим электродом. Результаты исследований показали, что параметры коронного разряда изменяются в широких пределах путем нагрева коронирующего электрода внешним источником тока.

Сделаны попытки математического моделирования процессов, протекающих в области коронного разряда с коаксиальной геометрией, на основе равновесных газодинамических уравнений. Показано формирование вихревых течений газа под действием электрического ветра и влияние температуры коронирующего электрода на картину газодинамических потоков.

Разработан экспериментальный стенд для получения импульсного периодического коронного факельного разряда. Установлено влияние материала коронирующего электрода на ионизацию газа в области разряда. Образование «дополнительных электронов», увеличивающих электрический ток коронного разряда, связано, вероятно, с генерацией ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения.

Наибольшая концентрация озона наблюдается в импульсной положительной короне, тогда как отрицательная корона менее эффективна для синтеза озона. В положительной короне постоянного тока озона образуется в десять раз меньше, чем в импульсной короне. Высокая экономичность синтеза озона в импульсной короне связана, по-видимому, со стримерном характером режима горения разряда. Вероятно, основная наработка озона, как и других активных частиц в плазме, происходит в стримерах и в прилегающих к ним областях.

Разработан озонатор на основе положительного коронного факельного разряда, горящего с электродов в виде дисков, расположенных параллельно заземленной плоскости. Увеличение мощности коронного разряда сопровождается его переходом в объемную форму или факельный разряд, диффузное свечение плазмы которого заполняет весь разрядный промежуток.

При импульсном периодическом источнике питания между коронирующей проволокой положительной полярности и заземленной плоскостью формируется линейный коронный факельный разряд – аномальная разновидность положительной короны. Необходимым условием существования разряда является его возбуждение в режиме автотенератора с включением индуктивности в цепь анода и инициирующего разрядника

в качестве коммутирующего устройства в цепь катода. Оптимальный режим горения разряда находится между напряжением зажигания и напряжением перехода линейного коронного факельного разряда в дугу или искру.

Для математического описания физических процессов, протекающих в сечении линейного коронного факельного разряда, используются уравнения двухтемпературной многокомпонентной газовой динамики, включающие балансы потоков массы, энергии электронов и тяжелых частиц. Учитывается плазмохимическая кинетика синтеза озона через диссоциацию молекулярного кислорода электронным ударом с последующей конверсией атомарного кислорода и ассоциативной рекомбинацией молекулярных и атомарных ионов. Разрушение озона происходит при термическом нагреве, электронной бомбардировке и в столкновениях с атомами кислорода. Образование отрицательных ионов происходит путем резонансного захвата электрона атомом или молекулой кислорода.

Линейный коронный факельный разряд является генератором окислителей (озон, перекись водорода, атомарный кислород и другие соединения), воздействующих на микробиологические объекты и органические соединения при горении в воздухе над поверхностью воды. Показана эффективность обеззараживания проточной воды данным разрядом (удельные энергетические затраты $\sim 1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$) при сравнении с озонированием или хлорированием.

Проведены исследования применения импульсного коронного разряда для создания мощных газовых лазеров, имеющих небольшие габариты. Результаты показали, что при оптимальной концентрации газов в смеси (6 % CO_2 , 4 % Ar ; 90 % N_2) реализуются максимальные электрические токи, которые в несколько раз превосходят токи классического коронного разряда, высокие напряжения $\sim 19 \text{ кВ}$ и максимальную мощность в разряде $\sim 41 \text{ Вт}$.

Разработан ионизатор на основе коронного разряда отрицательной полярности, назначение которого основано на принципе действия «люстры Чижевского». Ионизатор создает в помещении отрицательные аэроионы кислорода с концентрацией ионов $\sim 5000 \text{ ион}/\text{см}^3$, характерной для микроклимата горных и лесных районов, очищает воздух от пыли и микробов, нейтрализует вредное воздействие работы телевизоров и дисплеев компьютеров.

Предложен модифицированный метод газофазного осаждения золота, который позволяет изменить физико-химические характеристики поверхности алюминия, пассивного изначально, к перекиси водорода. Показано, что эффективным способом активации алюминия является осаждение нанокластеров золота в отрицательном коронном разряде с высокотемпературной зоной ионизации.

Разработана методика газофазного синтеза наноразмерного оксида молибдена на основе коронного разряда с разрядной ячейкой коаксиальной геометрии. При осаждении оксида молибдена на подложку можно наблюдать, что частицы микроскопического масштаба образуют дендритные структуры, а частицы наноразмерного масштаба формируют гелеподобные структуры триоксида молибдена, распределенные между дендритами.

Установлено, что эффективность работы электрофильтра с малым разрядным промежутком обусловлена действием электрического ветра, формирующим газодинамические вихри к осадительным электродам. Такой электрофильтр, по сравнению с классическим электрофильтром, позволяет сократить длину зоны улавливания пыли, уменьшить массу металла, снизить на порядок напряжение горения коронного разряда.

Предложена методика, позволяющая применять коронные разряды положительной или отрицательной полярностей для обнаружения порывов отдельных проволок на единицу длины стального каната.

В плане дальнейшего развития теоретических методов исследования коронного разряда необходимо разработать трехмерные газодинамические модели течения и теплообмена с привлечением плазмохимической кинетики в рамках равновесной, двухтемпературной и неравновесной моделей плазмы.

Большой интерес представляют задачи моделирования коронного и барьерного разрядов в режиме реального времени с учетом нестационарных и быстропротекающих процессов в области горения при формировании и распространении лидеров, стримеров, электронных лавин, ударной диссоциации и ионизации электронами молекул и атомов.

Практически отсутствуют газодинамические модели барьерного разряда. С учетом широкого применения барьерных разрядов при получении озона в промышленных и бытовых масштабах, на эту проблему следует обратить особое внимание.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барьерный разряд

1. Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. М.: Изд-во МГУ, 1987. С. 236.
2. Самойлович В.Т., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М.: Изд-во МГУ, 1989. С. 176.
3. Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. М.: Изд-во МГУ, 1998. 480 с.
4. Самойлович В.Г., Панин В.В., Крылова Л.Н. Современные тенденции в конструировании промышленных озонаторов // Матер. 1-й всеросс. конф. «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». М.: Изд-во «Книжный дом университет», 2005. С. 139.
5. Белоусова Э.В., Понизовский А.З., Гончаров В.А. и др. Исследование процесса образования озона в воздухе под действием импульсного коронного разряда и УФ-облучения // Химия высоких энергий. М.: Наука, 1992. Т. 26. № 4. С. 317.
6. Алемский И.Н., Лелевкин В.М., Токарев А.В., Юданов В.А. Электрические характеристики поверхностного барьерного разряда с плазменным индукционным электродом // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 7. С. 666–672; *Alemsky I.N., Lelevkin V.M., Tokarev A.V., Yudanov V.A. Electric Characteristics of a Surface Barrier Discharge with a Plasma Induction Electrode // Plasma Physics Reports. 2006. Vol. 32. № 7. P. 612–617.*
7. Алемская О.П., Лелевкин В.М., Токарев А.В., Юданов В.А. Синтез озона в поверхностном барьерном разряде с плазменным электродом // Химия высоких энергий. 2005. Т. 39. № 4. С. 307–311; *Alemskaya O.P., Lelevkin V.M., Tokarev A.V., Yudanov V.A. Synthesis of Ozone in a Surface Barrier Discharge with a plasma Electrode // High Energy Chemistry. 2005. Vol. 39. № 4. P. 263–267.*
8. Ашмарин Г.В., Лелевкин В.М., Токарев А.В. Формирование линейного коронного факельного разряда // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 8. С. 1–6; *Ashmarin G.V., Lelevkin V.M., Tokarev A.V. Development of Linear Corona Torch Discharge // Plasma Physics Reports. 2002. Vol. 28. № 10. P. 866–870.*
9. Лелевкин В.М., Токарев А.В., Махкамбаев А.Ю. Синтез озона в комбинированном разряде // Матер. 1-й всеросс. конф. «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии» 7–9 июня, М., 2005. С. 121.
10. Токарев А.В., Махкамбаев А.Ю. Синтез озона в комбинированном разряде с плазменным индукционным электродом // Вестник КРСУ. 2006. Т. 6. № 5. С. 16–20.
11. Боромбаев М.К., Шаршембиев К., Энгельшт В.С. Барьерно-поверхностный разряд на двухжильном проводе // Вестник КРСУ. 2003. Т. 3. № 2. С. 53–58.
12. *Lelevkin V.M., Tokarev A.V., Yudanov V.A. Ozone synthesis in a torch discharge. Nakone 5. International symposium on high pressure, low temperature plasma chemistry // Contributed papers. Milovy, Czech Republic, 1996. P. 328–333.*

13. *Lelevkin V.M., Tokarev A.V., Yudanov V.A.* Electrical characteristics of torch discharge. Hakone 5. International symposium on high pressure, low temperature plasma chemistry // Contributed papers. Milovy, Czech Republic, 1996. P. 273–275.
14. *Ashmarin G.V., Lelevkin V.M., Niyazaliev I.A., Tokarev A.V.* The estimation of steel rope quality by a corona discharge // 5-International Conference Plasma Physics and Plasma Technologies. Minsk, Belarus, 16–22 September, 2006. Vol. 2. P. 808–811.
15. *Ашмарин Г.В., Ким К.С., Токарев А.В.* О физических механизмах горения линейного коронного факельного разряда // Вестник КРСУ. 2002. Т. 2. № 2. С. 47–52.
16. *Ашмарин Г.В., Ким К.С., Токарев А.В.* Физика горения линейного коронного факельного разряда // Сб. матер. 3-й межд. симп. по теоретической и прикладной плазмохимии. Иваново, 2002. С. 376.
17. *Ashmarin G.V., Lelevkin V.M., Tokarev A.V.* Pulse-periodic corona discharge in technologies of gaseous precipitation // 5-International Conference Plasma Physics and Plasma Technologies. Minsk, Belarus, 16–22 September, 2006. Vol. 2. P. 812–815.
18. *Смирнова Ю.Г.* Озонатор на основе барьерно-поверхностного разряда в диэлектрической трубке с металлической спиралью // Матер. 1-й всеросс. конф. «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». М.: Из-во «Книжный дом университет», 2005. С. 139.
19. *Смирнова Ю.Г., Токарев А.В.* Синтез озона в разряде на поверхности гамма облученного полиэтилена низкой плотности // Вестник КРСУ. 2010. Т. 10. № 5. С. 126–131.
20. *Смирнова Ю.Г.* Барьерно-поверхностный разряд в диэлектрической трубке с металлической спиралью // Сб. тр. 4-го межд. симп. по теоретической и прикладной плазмохимии. Иваново: Ивановский госуд. химико-технологический ун-т, 2005. Т. 2. С. 642–646.
21. *Смирнова Ю.Г.* Влияние параметров барьерно-поверхностного разряда на наработку озона // Вестник КНУ. 2005. Сер. 3. Вып. 3. С. 54–57.
22. *Гречухин А.А., Токарев А.В., Лелевкин В.М.* Работа плазмохимического реактора нового типа на примере синтеза озона // Сб. матер. 5-й всеросс. конф. молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем». Томск: ТМЛ-Пресс, 2009. С. 664.
23. *Пичугин Ю.П.* Матер. 20-й конф. «Генераторы озона и озонные технологии». М.: Информац. центр «Озон», 2000. № 13. С. 43–50.
24. *Токарев А.В.* Барьерные и барьерно-поверхностные разряды в технологиях синтеза озона. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2011. 129 с.
25. *Токарев А.В.* Коронный разряд и его применение. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2009. 138 с.
26. *Лелевкин В.М., Смирнова Ю.Г., Токарев А.В.* Гибридный плазмохимический реактор // Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 4. С. 391–398; *Lelevkin V.M., Smirnova Y.G., Tokarev A.V.* Hybrid Plasmachemical Reactor // Plasma Physics Reports. 2015. Т. 41. № 4. С. 360–366.
27. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
28. *Попков В.И.* Коронный разряд и линии сверхвысокого напряжения. М., 1992.
29. *Богданова Н.Б., Попков В.И.* К вопросу об аномальных разрядах при высоких постоянных напряжениях // ДАН СССР. 1959. Т. 129. № 2. С. 21–25.
30. *Леб Л.* Основные процессы электрических разрядов в газах. М.-Л.: Техничко-теоретич. изд-во, 1950.

31. *Иванников А.А., Лелевкин В.М., Токарев А.В., Юданов В.А.* Воздействие тлеющего разряда атмосферного давления на воду // *Химия высоких энергий*. 2003. Т. 37. № 2. С. 148–151; *Ivannikov A.A., Lelevkin V.M., Tokarev A.V., Yudanov V.A.* Atmospheric Pressure Glow Discharge Treatment of Water // *High Energy Chemistry*. 2003. Vol. 37. № 2. P. 115–118..
32. *Кулумбаев Э.Б., Лелевкин В.М., Ниязалиев И.А., Токарев А.В.* Характеристики коронного разряда с высокотемпературным коронирующим электродом // *Физика плазмы*. 2011. Т. 37. № 8. С. 756–764; *Kulumbaev E.B., Lelevkin V.M., Niyazaliev I.A., Tokarev A.V.* Characteristics of a Corona Discharge With a Corona Electrode // *Plasma Physics Reports*. 2011. Vol. 37. № 8. P. 707–714.
33. *Лелевкин В.М., Кулумбаев Э.Б., Семенов В.Ф.* Моделирование и расчет электрических разрядов. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. XI-5 Прикладная химия плазмы. М.: Янус-К, 2006. С. 437–501.
34. *Lelevkin V.M., Otorbaev D.K., Schram D.C.* Physics of non-equilibrium plasma. Norht-Holland, 1992. 418 p.
35. *Токарев А.В., Юданов В.А., Kim K.S.* Влияние параметров разрядного контура на синтез озона в коронном факельном разряде // *Сб. научн. трудов*. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2000. Вып. 2. С. 17–23.
36. *Козлов М.В.* Исследование высокочастотного поверхностного разряда с целью повышения эффективности работы электротехнических установок: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.В. Козлов. М., 1993.
37. *Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.М.* Электрическая теория озонаторов. Статические вольтамперные характеристики озонаторов // *Журнал физической химии*. 1958. Вып. 2. № 12. С. 1217–1823.
38. *Боромбаев М. К., Шаршембиев К., Энгельшт В.С.* Барьерно-поверхностный разряд на двухжильном проводе // *Вестник КРСУ*. 2002. Т. 2. № 2. С. 53–57.
39. Анализ состояния производства озонаторного оборудования. М.: Информац. центр «Озон». Вып. 4, 1997.
40. *Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.М.* Об активной мощности озонаторов // *Журнал физической химии*. 1959. Вып. 33. № 5. С. 1042–1046.
41. *Гибалов В.И.* Исследование процессов образования озона в озонаторах методом численного эксперимента: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / В.И. Гибалов. М., 1978.
42. *Акишев Ю.С., Напартович А.П., Трушкин Н.И.* Проблемы использования импульсного коронного разряда в экологии / Координационный межведомственный совет по проблеме «Озоностроение и применение озона в народном хозяйстве», информац. центр «Озон». М., 1994. Вып. 3. С. 45.
43. *Багиров М.А., Калинин В.П., Абасов С.А.* Воздействие электрических разрядов на диэлектрики. Баку, 1975. 167 с.
44. *Нгуен К.Х., Ананьев В.В.* Использование коронного разряда при производстве упаковочных материалов // *Известия вузов (Полиграфия и издательское дело)*. 2009. № 6. С. 23–26.
45. *Гречухин А. А., Лелевкин В. М., Смирнова Ю.Г., Токарев А.В.* Высоковольтные источники питания плазмохимических реакторов для синтеза озона // *Вестник КРСУ*. 2009. Т. 9. № 11. С. 36–45.

46. *Wagner H.E., Brandenburg R., Kozlov K.V. and et. al.* The barrier discharge: basic properties and applications to surface treatment // *Vacuum*. 2003. Vol. 71. P. 417–436.
47. Анализ состояния производства озонаторного оборудования. М.: Информац. центр «Озон», 1997. № 4. С. 94.
48. *Кузьмин Г.П., Минаев И.М., Рухадзе А.А.* Обтекание вязким потоком газа плазменного листа, образованного скользящим разрядом // *ТВТ*. 2002. Т. 40. № 3. С. 515–524.
49. *Нуднова М.М., Красночуб Л.В., Стариковский А.Ю.* Ветвление стримерного разряда в воздухе в широком диапазоне давлений и напряжений // Матер. IV межд. симп. по теоретической и прикладной плазмохимии. Т. 1. Иваново, 2005. С. 147–150.
50. *Смирнова Ю.Г., Энгельшт В.С.* Определение параметров барьерно-поверхностного разряда с помощью эвристической модели // *Вестник КНУ*. Бишкек, 2006. С. 6.
51. *Токарев А.В., Юданов В.А., Кель О.П.* и др. Барьерно-поверхностный разряд с плазменным индукционным электродом // *Вестник КРСУ*. 2003. Т. 3. № 5. С. 23–28.
52. *Ли П., Верещагин И.П., Соколова М.В.* Физические процессы в барьерных озонаторах. М.: Информ. центр «Озон», 1998. № 9. С. 9.
53. *Смирнова Ю.Г., Токарев А.В., Юданов В.А., Энгельшт В.С.* Особенности теплообмена в озонаторе на поверхностном разряде // *Вестник КРСУ*. 2006. № 5. С. 143–146.
54. *Пичугин Ю.П.* Матер. 20-й конф. «Генераторы озона и озонные технологии». М.: Информ. центр «Озон», 2000. № 13. С. 43–50.
55. *Токарев А.В., Юданов В.А.* Электростатический двигатель. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2003. С. 7.
56. *Журавлев О.А., Федосов А.И.* Некоторые особенности разряда в газовом промежутке с диэлектриком на подвижном электроде // Тез. докл. VI конф. по физике газового разряда. Казань, 1992. С. 10–11.
57. *Журавлев О.А., Шепеленко А.А.* Однородный поверхностный разряд в воздухе атмосферного давления // Тез. докл. VII конф. по физике газового разряда. Самара, 1994. С. 78–79.
58. *Гречухин А.А.* Разрядная ячейка нового типа для барьерного разряда // *Вестник КРСУ*. 2008. Т. 8. № 10. С. 111–115.
59. *Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.М.* Теория динамических характеристик озонаторов // *Журнал физической химии*. 1957. Т. 31. № 7. С. 1628–1635.
60. *Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.М.* Электрическая теория озонаторов // *Журнал физической химии*. 1958. Т. 32. № 12. С. 1217–1223.
61. *Hunter P.* Solve Switcher Problems With Power – Factor Correction // *Electronic Design*. Febr. 6. 1992. P. 67–78.
62. *Жданкин В.А.* Коррекция гармоник входного тока в маломощных сетевых источниках питания // *Современные технологии автоматизации*. М.: СТА, 1998. № 1. С. 110–112.
63. *Самойлович В.Г., Панин В.В., Крылова Л.Н.* Современные тенденции в конструировании промышленных озонаторов // Матер. 1-й всеросс. конф. «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». М.: Книжный дом «Университет», 2005. С. 139.
64. *Корабельщиков А.И., Ансатаров Э.А., Оспанов А.А.* Озон в комплексном лечении пегритонита. Новгород, 1999. С. 224.
65. *Конев С.В., Матус В.К.* Озон в биологии и медицине. Нижний Новгород, 1992. С. 61.

66. *Гильман А.Б.* Плазмохимическая модификация поверхности полимерных материалов // Школа по плазмохимии для молодых ученых России и стран СНГ. Иваново: ИГХ-ТУ, 1999.
67. *Корбцев С.В., Медведев Д.Д., Ширяевский В.Л.* Энегосберегающие озонаторы на основе импульсного коронного разряда // Третий межд. конгресс «Вода: экология и технология» – ECWATECH-98. М., 1998. С. 659.
68. *Акулова М.В., Мельников Б.Н., Федосов С.В., Шарина Л.В.* Применение тлеющего разряда в текстильной и строительной промышленности. Иваново: Ивановский госуд. хим.-технол. ун-т, 2008. 232 с.
69. *Головятинский С.А.* Модификация поверхности полимеров импульсной плазмой атмосферного давления // Вестник Харьковского ун-та. 2004. № 628. С. 80.
70. *Матюхин С.И., Фроленков К.Ю.* Измерение краевого угла смачивания как метод исследования адгезионных свойств поверхности и энергетического состояния молекул на границе раздела двух фаз // Конденсированные среды и межфазные границы. 2003. Т. 5. № 2. С. 216–220.
71. *Токарев А.В.* Плазма в технологических процессах // В сб. «Научно-инновационная деятельность КРСУ». Бишкек: Изд-во КРСУ, 2012. С. 101–108.
72. *Гецаз С.И.* Декоративная обработка изделий из пластмасс. Л.: Химия, 1978. 120 с.
73. *Багиров М.А., Малинин В.П., Абасов С.А.* Воздействие электрических разрядов на диэлектрики. Баку, 1975. 167 с.
74. *Нгуен К.Х., Ананьев В.В.* Использование «коронного разряда» при производстве упаковочных материалов // Известия вузов (Полиграфия и издательское дело). 2009. № 6. С. 23–26; *Sugimitsu H., Moriwaki T., Okazaki S.* // Journal Chim. Phys. 1983. Vol. 80. №8. P. 681–684.
75. *Eliasson B.* Electrical discharge in oxygen. Part 1: Basic data; rate coefficient and cross section // BBC Report. Baden, 1985.
76. *Masuda S., Akutsu K., Inone J. et. al.* Ceramic-based ozonizer using high frequency discharge // Proc. IEEE/IAS, 1985. Annual Conf., Toronto, Canada. P. 1353.
77. *Амиров Р.Х., Асиновский Э.И., Самойлов И.С., Шепелин А.В.* Матер. 8-й всес. конф. «Физика низкотемпературной плазмы». Минск: Изд-во АНК ИТМО им. А.В. Лыкова АН БССР, 1991. Ч. 3. С. 91.
78. *Ашмарин Г.В., Токарев А.В.* Управление индуктивностью разрядной цепи линейного коронного факельного разряда // Вестник КРСУ. 2003. Т. 3. № 5. С. 18–22.
79. *Бальян Р.Х., Сиверс М.А.* Тиристорные генераторы и инверторы. Л.: Энергоиздат, 1982. 223 с.
80. Микросхемы для современных импульсных источников питания / под ред. Э.Е. Тагворяна, М.М. Степанова. М.: Додэка, 1999.

2. Коронный разряд:

1. *Cotrell F.G.* The Electrical Precipitation of Suspended Particles // Journal Ind. and Chem. 1911. № 3. С. 542.

2. *Самойлович В.Т., Гибалов В.И., Козлов К.В.* Физическая химия барьерного разряда. М.: Изд-во МГУ, 1989. С. 176.
3. *Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И.* Электросинтез озона. М.: Изд-во МГУ, 1987. С. 236.
4. *Кожин В.Ф., Кожин И.В.* Озонирование воды. М.: Стройиздат, 1974. 160 с.
5. *Орлов В.А.* Озонирование воды. М.: Стройиздат, 1984. 88 с.
6. *Ono Ryo, Oda Tetsuji.* Dynamics of ozone and OH radicals generated by pulsed corona discharge in humid-air flow reactor measured by laser spectroscopy // *Journal of Applied Physics*. 2003. Vol. 93. Issue 10. P. 5876–5883.
7. *Ma Hongbin, Qiu Yuchang.* A study of Ozone Synthesis in Coaxial Cylinder Pulse Streamer Corona Discharge Reactors // *Ozone: Science & Engineering*. 2003. Vol. 25. Issue 2. P. 127–136.
8. *Амиров Р.Х., Асиновский Э.И., Самойлов И.С., Шепелин А.В.* Синтез озона в наносекундном коронном разряде // Матер. 8-й всес. конф. «Физика низкотемпературной плазмы». Ч. 3. Минск, 1991. С. 91.
9. *Амиров Р.Х., Самойлов И.С., Шепелин А.В.* Синтез озона и разложение формальдегида в импульсной короне // Матер. конф. «Физика и техника плазмы». Минск, 13–15 сентября, 1994. С. 321.
10. *Корбцев С.В., Медведев Д.Д., Ширяевский В.Л.* Энергосберегающие озонаторы на основе импульсного коронного разряда // Матер. 3-го межд. конгр. «Вода: экология и технология» – ECWATECH-98. М., 1998. С. 659.
11. *Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А.* Высоковольтный наносекундный разряд в плотных газах при больших перенапряжениях, развивающийся в режиме убегания электронов // *Успехи физических наук*. 1990. Т. 16. Вып. 7. С. 49–82.
12. *Токарев А.В.* Коронный разряд и его применение. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2009. 138 с.
13. *Malik M.A., Ubaid R., Ghaffar A., Ahmed K.* Synergistic effect of pulsed corona discharges and ozonation and decolourization of methylene blue in water // *Plasma Sources Science and Technology*. 2002. Vol. 11. № 3. P. 236–241.
14. *Malik M.A.* Synergistic effect of plasmacatalyst and ozone in a pulsed corona discharge reactor on the decomposition of organic pollutants in water // *Plasma Sources Science and Technology*. 2003. Vol. 12. № 4. P. 826–833.
15. *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. Новосибирск: Наука, 1982.
16. *Воробьев Г.А., Месяц Г.А.* Техника формирования высоковольтных наносекундных импульсов. М.: Госатомиздат, 1963.
17. *Ming-Wei Li, Zheng Hu, Xi-Zhang Wang and et. al.* Low-temperature synthesis of carbon nanotubes using corona discharge plasma reaction at atmosphere pressure // *Journal of Materials Science Letters*. 2003. Vol. 22. Issue 17. P. 1223–1224.
18. *Salvermoser M., Murnick D.E.* Efficient, stable, corona discharge 172 nm xenon excimer light source // *Journal of Applied Physics*. 2003. Vol. 94. Issue 6. P. 3722.
19. *Lo Shui-Yin, Lobo J.D., Blumberg S. and et. al.* Generation of energetic He atom beams by a pulsed positive corona discharge // *Journal of Applied Physics*. 1997. Vol. 81. Issue 9. P. 5896–5905.
20. *Malik M.A., Ahmed M., Ejaz R. and et. al.* Synthesis of Superabsorbent Copolymers by Pulsed Corona Discharges in Water // *Plasma & Polymers*. 2003. Vol. 8. Issue 4. P. 271–279.

21. Экотехника / под ред. Л.В. Чекалова. Ярославль: "Русь", 2004. 424 с.
22. Литвинов В.Е. Применение теории плазмы для исследования физических процессов в электрографии и электростатической печати // Прикладная физика. 2002. № 4. С. 38–47.
23. Moore A.D. Electrostatics and Its Applications. John Willey & Sons. New-York, 1973.
24. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Дерюгин А.А. и др. Интегральные и локальные характеристики протяженной положительной короны в воздухе в режиме нелинейных колебаний: эксперимент // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 11. С. 941–951.
25. Приборы для измерения температуры контактным способом / под ред. Р.В. Бычковского. Львов: Изд. объединение «Вища школа», 1978. С. 192–193.
26. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 507 с.
27. Peek F.W. Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering. Third Edition, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1929. P. 42.
28. Краткий справочник химика / сост. В.И. Перельман. М.: ГНТИХЛ, 1955. С. 272.
29. Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J. High Voltage Engineering. Fundamentals. Second edition. Newnes, 2000. P. 344.
30. Канцов Н.А. Электроника. М.: Гос. изд. технико-теоретич. лит-ры, 1956. 459 с.
31. Кулумбаев Э.Б., Лелевкин В.М., Ниязалиев И.А., Токарев А.В. Характеристики коронного разряда с высокотемпературным коронирующим электродом // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 8. С. 756–764; Kulumbaev E.B., Lelevkin V.M., Niyazaliev I.A., Tokarev A.V. Characteristics of a Corona Discharge With a hot Corona Electrode // Plasma Physics Reports. 2011. Vol. 37. № 8. P. 707–714.
32. Ватажин А.Б., Грабовский В.И., Лихтер В.А., Шульгин В.И. Электрогазодинамические течения. М.: Наука, 1983. 344 с.
33. Кулумбаев Э.Б., Лелевкин В.М., Семенов В.Ф. Моделирование и расчет электрических разрядов. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Тематический том Х1-5. Прикладная химия плазмы. М.: Янус-К, 2006. С. 437–501.
34. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
35. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
36. Теория столба электрической дуги / под ред. В.С. Энгельшта (Низкотемпературная плазма. Т. 1). Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1990. 376 с.
37. Таблицы физических величин. Справочник / под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
38. Попков В.И., Богданова Н.Б. О параметрах факельного разряда в воздухе при атмосферном давлении // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1968. № 1. С. 79–87.
39. Попков В.И. Теория биполярной короны на проводах // Известия АН СССР. ОТН. 1948. № 4. С. 433–448.
40. Богданова Н.Б., Попков В.И. К вопросу об аномальных разрядах при высоких постоянных напряжениях // ДАН СССР. 1959. Т. 129. № 2. С. 21–25.
41. Lelevkin V.M., Tokarev A.V., Yudanov V.A. Electrical characteristics of torch discharge. Nakone 5. International symposium on high pressure, low temperature plasma chemistry // Contributed papers. Milovy, Czech republic, 1996. P. 273–275; Lelevkin V.M., Tokarev A.V., Yudanov V.A. Ozone synthesis in a torch discharge. Nakone 5. International symposium on

- high pressure, low temperature plasma chemistry // Contributed papers. Milovy, Czech republic. 1996. P. 328–333.
42. *Токарев А.В., Юданов В.А., Ким К.С.* Устойчивость горения коронно факельного разряда // Сб. научн. трудов. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2000. Вып. 2. С. 12–16.
 43. *Ashmarin G.V., Lelevkin V.M., Niyazaliev I.A., Tokarev A.V.* The estimation of steel rope quality by a corona discharge // 5-International Conference Plasma Physics and Plasma Technologies. Minsk, Belarus, 16–22 September, 2006. Vol. 2. P. 808–811; *Ashmarin G.V., Lelevkin V.M., Tokarev A.V.* Pulse-periodic corona discharge in technologies of gaseous precipitation // 5-International Conference Plasma Physics and Plasma Technologies. Minsk, Belarus, 16–22 September. Minsk, 2006. Vol. 2. P. 812–815.
 44. *Лелевкин В.М., Токарев А.В., Юданов В.А., Ким К.С.* Импульсный характер коронного факельного разряда // Сб. научн. трудов. 2000. Вып. 2. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2000. С. 24–28.
 45. *Попков В.И.* Коронный разряд и линии сверхвысокого напряжения. М., 1992.
 46. *Ашмарин Г.В., Токарев А.В.* Управление индуктивностью разрядной цепи линейного коронного факельного разряда // Вестник КРСУ. 2003. Т. 3. № 5. С. 18–23.
 47. *Ашмарин Г.В., Ким К.С., Токарев А.В.* О физических механизмах горения линейного коронного факельного разряда // Вестник КРСУ. 2002. Т. 2. № 2. С. 47–52.
 48. *Ашмарин Г.В., Лелевкин В.М., Токарев А.В.* Формирование линейного коронного факельного разряда // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 10 С. 939–944; *Ashmarin G.V., Lelevkin V.M., Tokarev A.V.* Development of Linear Corona Torch Discharge // Plasma Physics Reports. 2002. Vol. 28. No. 10. P. 866.
 49. *Ким К.С., Лелевкин В.М., Токарев А.В., Юданов В.А.* Линейный коронный факельный разряд // Сб. научн. трудов. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2000. Вып. 3. С. 67–73; *Ким К.С., Лелевкин В.М., Токарев А.В., Юданов В.А.* Синтез озона в линейном коронном факельном разряде из кислорода и воздуха // Сб. научн. трудов. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2000. Вып. 3. С. 44–51.
 50. Электрические измерения. М.: Высшая школа, 1972. С. 288.
 51. *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей. Д.: Энергоатомиздат, 1986. С. 368.
 52. *Изюрова Г.И., Кауфман М.С.* Приборы и устройства промышленной электроники. М.: Высшая школа, 1975. С. 317.
 53. *Семенов В.Ф., Ким К.С.* Моделирование характеристик коронного разряда, горящего на линейном токопроводе // Сб. научн. трудов. Физика. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2000. Вып. 3. С. 59–68.
 54. *Брагинский С.И.* Явления переноса в плазме // Вопросы теории плазмы. Вып. 1. М.: Госатомиздат, 1963. С. 183–272.
 55. *Бакиит Ф.Г., Юрьев В.Т.* Приэлектродные явления в низкотемпературной плазме // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 5. С. 905–944.
 56. *Русанов В.Д., Фридман А.А.* Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984. 415 с.
 57. *Kossyi I.A., Kostinsky A.Yu., Matveyev A.A., Silakov V.P.* Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures // PSST. 1992. V. 1.P. 207–220.
 58. *Baeva M., Luo X., Pfelzer B. and et. al.* Experimental investigation and modeling of a low-pressure pulsed microwave discharge in oxygen // PSST. 2000. V. 1. P.128–145.

59. *Смит К., Томсон Р.* Численное моделирование газовых лазеров. М.: Мир, 1981. 515 с.
60. *Капцов Н.А.* Коронный разряд. М.-Л., 1947.
61. *Кульский Л.А.* Процессы и аппараты. Теоретические основы и технология кондиционирования воды. Киев: Наук. Думка, 1983.
62. *Сотниченко С.А., Бревый Б.Г., Гурьев В.И.* Реализация принципов современных технологий очистки воды в приборах «КВАНТ – ОЗОН» // Матер. 3-го межд. конгр. «Вода: экология и технология». М., 1989. С. 680–681.
63. *Сытник И.А.* Электрогидравлическое воздействие на микроорганизмы. Киев: «Здоровья», 1982. С. 56–64.
64. *Жук Е.Г.* Дезинфекция воды импульсным электроразрядом // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 1971. № 1. С. 99–103.
65. *Бродская Б.Х.* Развитие импульсных разрядов на границе газовой и водной электролит и оценка их воздействия на химические и биологические системы // Известия АН ЭССР. Химия высоких энергий. 1982. Т. 16. № 5. С. 458–464.
66. *Engelsht V.S.* Impulse corona discharge erupting over the mater smudge // 25 Summer school and international Symposium on the physics of ionized gases. Sept. 3–7, 1990. Dubrovnik, Yugoslavia. P. 45.
67. *Гриневич В.И., Кувыкин Н.А., Бубнов А.Г.* Применение плазмы поверхностно барьерного разряда для снижения токсичности сточных вод // Тез. докл. 3-го межд. конгр. «Вода: экология и технология» – ECWATECH-98. М., 1998. С. 344–345.
68. *Goldman A., Goldman M., Sigmond R.S.* Sigmond Analysis of air corona products by means of their reactions in water. Vol. 3. Italy, Pugnochiuso. P. 367.
69. *Лелевкин В.М., Ткаченко В.С., Токарев А.В. и др.* Воздействие коронного факельного разряда на воду // Сб. научн. трудов межд. научн.-теоретич. конф. Секция физика. Бишкек: Изд-во КРСУ, 1998. С. 22–37.
70. *Васильев Л.Л.* Влияние атмосферных ионов на организм. Л., 1960.
71. *Чернявский Е.А.* Аэроионизация в гигиене труда. Сравнительная характеристика ионизации атмосферы районов средней Азии и аэро- и гидроаэроионизации в лечебных кабинетах и промышленных условиях. Л., 1966. С. 187.
72. *Чижевский А.Л.* Ионизация газов и атмосферного воздуха // Проблемы ионизации: Тр. ЦНИЛИ. Воронеж: Коммуна, 1933. С. 112–218.
73. *Чижевский А.Л.* Теоретические основы работы электроэфлювиального ионизатора. М., 1939.
74. *Ибрагимов А.А.* Естественная аэроионизация в горной местности и подземных пещерах Киргизии // Вопросы курортологии ФТ и ЛФК. М., 1985. № 5. С. 27.
75. *Токарев А.В., Лелевкин В.М., Юнусалиева А.О.* Ионизация воздуха коронным разрядом отрицательной полярности в условиях больших разрядных промежутков // Матер. научн. конф. «Физика и физическое образование: достижения и перспективы развития». Бишкек: Изд-во КРСУ, 2006. С. 96.
76. *Руднев В.С., Кондриков Н.Б., Тырина Л.М. и др.* Каталитические активные структуры на металлах // Серия: Критические технологии. Мембраны. 2005. № 4 (28). С. 67.
77. *Ремпель А.А.* Нанотехнологии, свойства и применение наноструктурированных материалов // Успехи химии. 2007. Т. 76. № 5. С. 474–500.

78. *Ниязалиев И.А., Токарев А.В., Лелевкин В.М.* Исследование процессов синтеза оксидов молибдена методом «горячей нити» и осаждение продуктов в коронном разряде // Сб. матер. 5-й конф. молодых ученых. Томск: ТГУ, 2009. С. 605.
79. *Капцов Н.А.* Коронный разряд и его применение в электрофильтрах. М., 1947.
80. *Чекалов Л.В., Ткаченко В.М.* Пути интенсификации работы электрофильтров // Электрические станции. 2005. № 3. С. 51–57.
81. *Чекалов Л.В.* Основы разработки и конструирования электрофильтров нового поколения // ИнформЦемент. 2006. № 5. С. 67–69.
82. *Страус В.* Промышленная очистка газов. М.: Химия, 1981. 442 с.
83. *Токарев А.В., Лелевкин В.М., Юданов В.А., Баньшиева А.* Особенности электроочистки газа в малых разрядных промежутках // Вестник КРСУ. 2007. Т. 7. № 8. С. 107–116.
84. *Верещагин И.П., Гоник А.Е.* Экспериментальное исследование электрического ветра при наличии внешнего потока // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1980. № 4. С. 95–101.
85. *Волков В.Н., Палкин Л.Н., Семенов В.К.* К гидродинамике электрического ветра // В кн. «Сильные электрические поля в технологических процессах (электронно-ионная технология)». Вып. 2. М.: Энергия, 1971. С. 216–226.
86. *Ашмарин Г.В., Лелевкин В.М., Ниязалиев И.А. и др.* Значение электрического ветра для теплообмена в технологических устройствах на основе коронного разряда // Вестник КРСУ. 2006. Т. 6. № 5. С. 147–153.
87. *Токарев А.В., Юданов В.А.* Определение скорости дрейфа заряженных частиц в газодинамическом электрофильтре // Вестник КРСУ. 2008. Т. 8. № 10. С. 116–122.
88. Справочник по пыле- и золоулавливанию / под общ. ред. А.А. Русанова. М.: Энергия, 1975. 207 с.
89. *Котельников В.С., Сухоруков В.В.* Безопасность труда в промышленности. 1998. № 5. С. 34.
90. *Токарев А.В.* Обнаружение мест дефектов и порывов проволок стальных канатов // Вестник КРСУ. 2002. Т. 2. № 4. С. 120–123.

UDK 533.521
BBK 26.23
L 43

Reviewers:

A.Zh. Zhainakov, academician of the NAS of the Kyrgyz Republic, professor
G.S. Denisov, Dr. Sci. in Physics and Mathematics, professor
Published by decision of the KRSU SEB

Lelevkin V.M., Tokarev A.V.

L 43 BARRIER AND CROWN DISCHARGES – OZONE GENERATORS / V.M. Lelevkin,
A.V. Tokarev. Bishkek: KRSU Publishing House, 2020. 230 p.

ISBN 978-9967-19-702-2

The monograph presents the results of experimental and theoretical studies conducted at the Department of Physics and Microelectronics and at the Plasma Technology Laboratory of the Kyrgyz-Russian Slavic University.

The designs of ozonizers were developed and a theoretical analysis of the physical processes occurring in the plasma-chemical reactors of ozonizers working on the basis of barrier, barrier-surface and corona discharges in oxygen and air at atmospheric pressure was carried out. Issues related to the characteristics of ozone synthesis in barrier-surface discharges realized on the surface of dielectrics made of polymer materials are considered. It is shown that barrier-surface discharges are effective devices in technologies for producing high concentration ozone. The features of heat transfer in an ozonizer at a surface discharge with a corona electrode are determined. The characteristics of the barrier discharge in the transformer are considered and the parameters of ozone synthesis are specified. The characteristics of ozone synthesis in corona discharges of coaxial geometry with a high-temperature corona electrode, in pulsed periodic and flare corona discharges, are studied.

The book is intended for a wide range of scientists, engineers and technologists involved in the physics and chemistry of gas-discharge plasma. It may be useful for teachers, graduate students and senior students specializing in the areas of plasma physics, gas discharge physics, thermal physics.

L 1805040400-19

ISBN 978-9967-19-702-2

UDK 533.521

BBK 26.23

© SEIHPE KRSU, 2020

© Lelevkin V.M., Tokarev A.V., 2020

CONTENT

Foreword.....	7
Designations.....	9
OZONE, ITS PROPERTIES AND APPLICATIONS	10
1. Briefly about ozone.....	11
1.1. Ozone discovery.....	11
1.2. Some properties of ozone.....	12
1.3. Ozone in the air.....	13
1.4. Ozone action.....	16
1.5. Ozone application.....	16
2. Devices for producing ozone.....	17
2.1. Ozonizers.....	17
2.2. Ionizers.....	19
3. Electric discharges - ozone generators.....	19
3.1. Lightning.....	19
3.2. Spark.....	20
3.3. Glow discharge.....	20
3.4. Arc discharge.....	21
3.5. High Frequency Induction Electric Discharge.....	21
3.6. Microwave Discharge.....	22
3.7. Optical discharge.....	23
3.8. Corona discharge.....	24
3.9. Barrier discharge.....	27
1. BARRIER DISCHARGE - OZONE GENERATOR.....	30
1.1. Barrier surface discharge with a plasma induction electrode.....	30
1.2. Synthesis of ozone in combined discharges.....	38
1.3. Synthesis of ozone in a discharge on polymer dielectrics.....	45
1.4. Movable Barrier Ozone Generator.....	58
1.5. Barrier Based Hybrid Ozonizers in transformer.....	66
1.6. Synthesis of ozone in a high-frequency barrier discharge.....	77
1T. BARRIER DISCHARGE TECHNOLOGIES.....	85
1. Express sterilization of a medical instrument.....	85
1.1. Modern sterilization methods.....	85
1.2. Express sterilization technology.....	86
2. Barrier discharge in the technology of polymer materials.....	88
2.1. Plasma surface modification of polymeric materials.....	88
2.2. Excitation of a barrier discharge to the polymers surface.....	90
3. The choice of parameters and dielectric material for the ozonizer.....	96
3.1. Parameters Affecting Ozone Formation.....	96
3.2. Dielectric material selection.....	98
4. High voltage sources for ozone synthesis.....	99
4.1. Ozonator Power Supplies.....	99

4.2. Thyristor Barrier Discharge Power Supply	101
4.3. Quasi-Resonance Barrier Discharge Power Supply	102
4.4. Quasi-resonant corona power supply	105
4.5. Pulse periodic corona discharge source.....	105
2. CORONA DISCHARGE - OZONE GENERATOR	108
2.1. Synthesis of ozone in corona discharges of coaxial geometry	109
2.2. Corona discharge with high temperature corona electrode	112
2.3. Pulse periodic corona discharge	126
2.4. Corona Flare Ozone Synthesis	138
2.5. Linear Crown Flare	147
2.6. Ozone synthesis in a linear corona flare	158
2.7. Linear corona flare simulation.....	166
2.8. Linear Corona Flare Interaction with water	177
2T. CORONA DISCHARGE TECHNOLOGIES:.....	185
1. Pulsed corona discharge to create gas lasers.....	185
2. Corona discharge ionizer	186
2.1. Experimental setup	187
2.2. Measurement methods.....	189
2.3. Electrical specifications.....	189
2.4. Determination of concentration of aeroions and ozone.....	190
3. Synthesis of nano-sized particles of gold in a corona discharge.....	192
3.1. Experimental setup and research methods	192
3.2. Changing the surface structure of aluminum	194
3.3. Decomposition of hydrogen peroxide on aluminum.....	196
4. Gas-phase synthesis of nano-molybdenum oxide.....	199
4.1. Установка для синтеза оксида молибдена.....	199
4.2. Molybdenum oxide morphology	199
5. Electric purification of gases in the field of corona discharge	202
5.1. Electric gas cleaning.....	202
5.2. Dusty gas linear corona torch discharge.....	203
5.3. Comparison of gas cleaning efficiency.....	205
6. Monitoring the surface condition of steel ropes	205
6.1. Nondestructive Testing Technique	205
6.2. Gust Sensor	206
6.3. Measurement results.....	206
CONCLUSION	210
LITERATURE	214
1. Barrier discharge	214
2. Corona discharge.....	218
Reviewers.....	224
CONTENT.....	225
CONCLUSION.....	227

CONCLUSION

The monograph provides general information about the amazing gas - ozone and its properties, about the production and use of ozone in our lives. The information on some types of electrical discharges - ozone generators is briefly summarized.

The main attention is paid to the development of various designs of ozonizers based on barrier and corona discharges, as the most effective and practical sources of ozone production on a laboratory and industrial scale. Methods for studying the plasma characteristics of barrier and corona discharges to create new effective technologies for producing ozone are considered and developed. Brief results of some of them are presented below.

An ozonizer, which has been developed through the study, provides power to the dielectric barrier not through a metal electrode, but using a gas discharge plasma. Plasma electrode, by changing the electrical characteristics of the barrier surface discharge, can improve the energy efficiency of ozone synthesis. The geometric parameters of the discharge circuit are determined for a combined type barrier discharge where the maximum use of the input electric power used for ozone synthesis occurs.

The heat transfer coefficient increases in an ozonizer on a surface discharge with a corona electrode due to the gas being mixed by an electric wind. It is shown that without electric wind, effective ozone synthesis in this type of ozonizer becomes ineffective.

The ozonation plants based on moving barriers allow using the effect of rotation of the dielectric in an electric field, which helps to reduce the destruction of the barrier by an electric discharge and increase the life of the ozonizer. Hybrid ozonizers are a new approach in ozone synthesis systems, combining in one device a high-frequency converter, step-up transformer and discharge cell. The interlayer insulation of the secondary high-voltage winding plays the role of a dielectric barrier in the discharge cell and is structurally made in the form of coaxial cylinders with a gas gap for introducing oxygen or air. Hybrid ozonizer reduces the capital costs of its creation and contributes to an increase in ozone productivity and lower energy costs for its synthesis.

Based on the high-frequency barrier discharge, prototypes PLASMALAB and PLASMALAB D2 ozonizers were manufactured to produce ozone from oxygen with energy characteristics that meet the requirements of industrial ozone synthesis.

An effective technology has been developed for the express sterilization of medical instruments, including the combined action of ozone, ultraviolet radiation, atomic oxygen and free hydroxyl radicals.

An ozonizer plant with a barrier of low density polyethylene, made in the form of a heat shrink tube, allows to obtain high ozone concentrations at low currents and low energy costs.

A study of the characteristics of burning a barrier discharge in air under conditions of large discharge gaps made it possible to develop a system for exciting a barrier discharge on the surface of polymers of complex geometry for their activation, before inscriptions and logos are applied to their surface.

High-voltage power supplies for various purposes have been developed, designed for the operation of ozonation installations on the barrier, corona and pulse-periodic corona discharges.

The unique properties of the corona discharge contribute to the development of various technological applications, such as ozone production, electric gas purification, creation of unipolar gas and aerosol flows, electrography, flaw detection, activation of powder materials, pumping of gas laser media.

A device was developed and the characteristics of a corona discharge with coaxial geometry and a high-temperature corona electrode were investigated. The research results showed that the parameters of the corona discharge vary over a wide range by heating the corona electrode with an external current source.

The attempts are made to mathematical modeling of processes occurring in the field of corona discharge with coaxial geometry, based on equilibrium gas-dynamic equations. The formation of vortex gas flows under the influence of an electric wind and the effect of the temperature of the corona electrode on the picture of gas-dynamic flows are shown.

An experimental stand has been developed for obtaining a pulsed periodic corona flare. The effect of the material of the corona electrode on gas ionization in the discharge region has been established. The formation of "additional electrons", increasing the electric current of the corona discharge, is probably connected with the generation of ultraviolet and soft x-rays.

The highest ozone concentration is observed in the pulsed positive corona, while the negative corona is less effective for ozone synthesis. In the positive corona of direct current, ozone is formed ten times less than in the pulsed corona. The high efficiency of ozone synthesis in the pulsed corona is apparently related to the streamer character of the discharge combustion mode. Probably the main production of ozone, as well as other active particles in the plasma, occurs in streamers and in adjacent areas.

During the study, an ozonizer was developed on the basis of a positive corona flare discharge burning from electrodes in the form of disks located parallel to the grounded plane. An increase in the power of the corona discharge is accompanied by its transition into a volumetric form or a torch discharge, the diffuse glow of which fills the entire discharge gap.

A linear corona flare discharge - an anomalous kind of positive corona - is formed with a pulsed periodic power source, between the corona wire of positive polarity and the grounded plane. A necessary condition for the existence of a discharge is its excitation in the mode of an oscillator with the inclusion of inductance in the anode circuit and the initiating discharge as a switching device in the cathode circuit. The optimal mode of discharge burning is between the ignition voltage and the transition voltage of the linear corona flare discharge into an arc or spark.

For the mathematical description of the physical processes occurring in the cross-section of a linear corona flare discharge, the equations of two temperature multicomponent gas dynamics are used, including the balances of mass fluxes, electron energy and heavy particles. The plasma chemical kinetics of ozone synthesis through the dissociation of molecular oxygen by electron impact, followed by the conversion of atomic oxygen and associative recombination of molecular and atomic ions, is taken into account. The destruction of ozone occurs during thermal heating, electron bombardment and in collisions with oxygen atoms. The formation of negative ions occurs by resonant capture of an electron by an oxygen atom or molecule.

The linear corona flare discharge is a generator of oxidizing agents (ozone, hydrogen peroxide, atomic oxygen and other compounds) that act on microbiological objects and organic compounds when burned in air above the surface of the water. The effectiveness of disinfecting

running water with this discharge (specific energy costs $\sim 1 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{m}^3$) is shown when compared with ozonation or chlorination.

Studies have been carried out on the use of pulsed corona discharge to create high-power gas lasers with small dimensions. The results showed that at the optimal concentration of gases in the mixture (6% CO_2 , 4% Ar, 90% N_2), maximum electric currents are realized that are several times higher than the classical corona discharge currents, high voltages $\sim 19 \text{ kV}$ and maximum discharge power $\sim 41 \text{ watts}$.

An ionizer based on a corona discharge of negative polarity has been developed, the purpose of which is based on the principle of operation of the Chizhevsky chandelier. The ionizer creates negative oxygen air ions in the room with an ion concentration of $\sim 5000 \text{ ion} / \text{sm}^3$, typical for the microclimate of mountain and forest areas, cleans dust and germs from the air, and neutralizes the harmful effects of TVs and computer displays.

A modified method of gas-phase deposition of gold is proposed, which allows you to change the physico-chemical characteristics of the surface of aluminum, initially passive, to hydrogen peroxide. It has been shown that the efficient method of aluminum activation is the deposition of gold nano-clusters in a negative corona discharge with a high-temperature ionization zone.

A technique has been developed for gas-phase synthesis of nanosized molybdenum oxide based on a corona discharge with a discharge cell of coaxial geometry. During deposition of molybdenum oxide on a substrate, it can be observed that particles of a microscopic scale form dendritic structures, and particles of a nanoscale scale form gel-like structures of molybdenum trioxide distributed between dendrites.

It has been established that the efficiency of the electrostatic precipitator with a small discharge gap is due to the action of an electric wind, which forms gas-dynamic vortices to the precipitation electrodes. Such an electrostatic precipitator, in comparison with the classical electrostatic precipitator, allows reducing the length of the dust collection zone, reducing the mass of the metal, and decreasing the burning voltage of the corona discharge by an order of magnitude.

The authors propose a technique that allows using of corona discharges of positive or negative polarities to detect gusts of individual wires per unit length of a steel rope.

The researchers state that it is necessary to develop three-dimensional gas-dynamic models of flow and heat transfer using plasma-chemical kinetics within the framework of the equilibrium, two temperature, and nonequilibrium plasma models in terms of further development of theoretical methods for studying a corona discharge.

The problems of modeling corona and barrier discharges in real time, taking into account unsteady and rapidly occurring processes in the combustion field during the formation and propagation of streamers, electron avalanches, shock dissociation, and electron and ionization of molecules and atoms are of a great interest.

Practically there are no gas-dynamic models of the barrier discharge. The authors believe that special attention should be paid to the models using the barrier discharges in the production of ozone on an industrial and domestic scale.

In conclusion, the authors are grateful to V.I. Gibalov, N.Zh. Kairayevu, E.B. Kulumbaev, Yu.A. Lebedev, V.A. Yudanov for participating in ongoing research and discussions of the results.

В.М. Лелевкин, А.В. Токарев

**БАРЬЕРНЫЕ И КОРОННЫЕ
РАЗЯДЫ –
ГЕНЕРАТОРЫ ОЗОНА**

Редактор *И.С. Волоскова*
Компьютерная верстка *М.Р. Фазлыевой*

Подписано в печать 15.01.2020.
Формат 60×84 ¹/₈. Офсетная печать.
Объем 28,75 п.л. Тираж 500 экз. Заказ 50.

Издательство КРСУ
720000, г. Бишкек, ул. Киевская, 44

Отпечатано в типографии КРСУ
720048, г. Бишкек, ул. Анкара, 2а