

*На правах рукописи*

Матюнин Алексей Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦИИ ОЗОНА  
В БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ С ВЫСОКООМНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Чебоксары 2019

Работа выполнена на кафедре Электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Научный руководитель: **Пичугин Юрий Петрович**,  
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Автаева Светлана Владимировна**,  
доктор физико-математических наук, доцент,  
старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики СО РАН;

**Шершунова Екатерина Александровна**,  
кандидат технических наук, Учёный секретарь  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.

Ведущая организация: **Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина».**

Защита состоится "04" октября 2019 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д.212.301.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова" по адресу: г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, учебный корпус № 3, зал заседаний Ученого совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова" и на сайте [www.chuvsu.ru](http://www.chuvsu.ru).

Автореферат разослан "10" июля 2019 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д.212.301.06

Н.В. Руссова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность и степень разработанности темы исследования.**

Озон обладает сильным окислительным и дезинфицирующим действием, благодаря этому устройства для его получения широко применяются в промышленности, сельском и городском хозяйстве. Одним из наименее энергозатратных способов получения озона является его генерация в барьерном электрическом разряде.

Системы генерации озона в барьерном разряде, представляющие собой схемотехническое сочетание устройства электропитания высокого напряжения, разрядных озонаторных камер и пневматической системы подачи в область разряда воздуха или кислорода, являются базовым компонентом озонаторного оборудования. Кроме того, в состав озонаторного оборудования входит система контроля и управления процессом электросинтеза озона, система охлаждения. Большие установленные мощности озонаторов делают актуальной задачу повышения производительности и энергоэффективности систем генерации озона.

В диссертации решается принципиальная проблема увеличения производительности систем генерации озона в барьерном разряде при уменьшении выделяющейся в разряде теплоты. Успешное решение этой проблемы позволит достигнуть следующих результатов:

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

Изучению систем генерации озона в барьерном разряде посвящены работы таких современных российских авторов, как И.С. Ткаченко, К.В. Козлов, В.И. Гибалов, В.Г. Самойлович, М.В. Соколова. Заметными в области исследования систем генерации озона в барьерном разряде иностранными учёными являются G.J. Pietsch, U. Kogelschatz, M.R. Ghazanchaei. Заслуживает внимания разработка С.В. Шапиро и коллектива авторов, заключающаяся в использовании эффекта Джоуля-Томсона для охлаждения газа в озонаторе. Однако, такого способа уменьшения тепловыделения в разрядной озонаторной камере, как применение электродов с повышенным активным сопротивлением, литературный обзор не выявляет.

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

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

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

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

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

#### **Научная новизна.**

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

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

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

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

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Установлены новые математические закономерности эволюции тока барьерного разряда при условии наличия высокоомных электродов.

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

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

**Методология и методы исследования.** Проводились сравнительные экспериментальные исследования осциллограмм, а также электроэнергетических параметров, производительности и температуры разработанных физических моделей. Математическое моделирование осуществлялось с применением теории электрических цепей с сосредоточенными и распределёнными параметрами. Конструктивным схемотехническим объектом диссертационного исследования является система генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами, обладающими вносимым в барьерный микроразряд активным сопротивлением порядка  $10^3 - 10^4$  Ом.

### **Положения, выносимые на защиту.**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность вопроса повышения энергоэффективности электросинтеза озона, а именно снижения энергозатрат на генерацию озона в барьерном разряде. Предлагается решение этой проблемы за счёт применения высокоомных электродов в разрядных озонаторных камерах. Здесь же формулируются цели работы и задачи, решение которых составляет основу диссертации, а также приводятся основные результаты работы и методы исследования.

**В главе 1** рассмотрены принципы работы систем генерации озона в барьерном разряде. Описаны схематические и конструктивные особенности современных систем генерации озона, показано влияние температуры на процесс синтеза озона в барьерном разряде. Проанализированы особенности применения систем генерации озона в барьерном разряде с учётом требований безопасности, технологии производства и использования.

**В главе 2** представлены теоретические предпосылки применения высокоомных электродов для повышения энергоэффективности систем генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами.

Барьерный разряд имеет дискретную пространственно-временную структуру и состоит из микроразрядов, длительность которых при обычных параметрах цепи микроразряда порядка  $10^{-8}$  с. Каждый микроразряд состоит из двух стадий развития (рисунок 1). На первой стадии микроразряда происходит развитие канала микроразряда с одновременным разрядом межэлектродной ёмкости озонаторной камеры. На второй стадии геометрия канала микроразряда сформирована, и происходит дозаряд области микроразряда.

Энергия джоулевых потерь в процессе разряда/заряда ёмкости в  $rC$ -цепи барьерного микроразряда не зависит от активного сопротивления цепи и равна 50 % от общей энергии. Увеличение сопротивления цепи отдельного микроразряда не влияет на общую энергию завершающей стадии микроразряда и переносимый на этой стадии заряд.

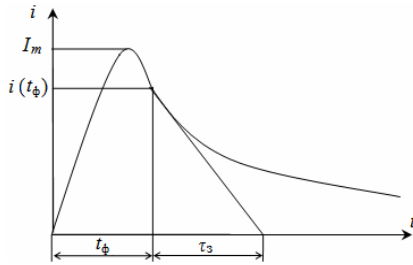


Рисунок 1 – Характерный вид тока барьерного микроразряда:  $t_\phi$  – время формирования ионизированной области микроразряда,  $I_m$  – максимальный ток микроразряда,  $i(t_\phi)$  – ток микроразряда в момент начала второй стадии,  $\tau_3$  – постоянная времени завершения второй стадии микроразряда.

В первом приближении энергию тепловых потерь при протекании микроразряда на второй стадии ( $Q_p$ ) можно определить по формуле:

$$Q_p = \int_0^\infty i^2 r dt = \frac{U_p^2}{r} \int_0^\infty e^{-\frac{t}{\tau_c}} dt = \frac{CU_p^2}{2},$$

где  $r$  – собственное сопротивление микроразряда, принимаемое на завершающей стадии постоянным;

$C$  – собственная ёмкость микроразряда;

$U_p$  – напряжение питания во время микроразряда.

При добавлении в цепь микроразряда активного сопротивления  $r_d$  произойдет перераспределение выделяющегося тепла между областью микроразряда и добавочным сопротивлением  $r_d$ . Коэффициент ( $k$ ), характеризующий пропорциональные изменения параметров процесса микроразряда при включении в цепь микроразряда добавочного активного сопротивления:

$$k = (r + r_d) / r.$$

В результате потери тепла в канале микроразряда  $Q_{дж1}$  уменьшатся в  $k$  раз, а в добавочном активном сопротивлении выделится количество теплоты  $Q_{дж2} = Q_p - Q_{дж1}$ . При этом амплитуда тока микроразряда уменьшится в  $k$  раз, а постоянная времени второй стадии микроразряда в  $k$  раз увеличится.

В результате ударной ионизации и диссоциации молекул кислорода происходит образование молекул озона пропорционально электрическому заряду, переносимого барьерным разрядом. С ростом скорости переноса заряда растёт скорость образования озона, но также растёт температура в зоне разряда, что является одним из главных факторов увеличения скорости разложения озона.

Уменьшение амплитуды тока микроразрядов при соответствующем увеличении длительности микроразрядов приведёт к снижению нагрева озонаобразующего газа при неизменности переносимого заряда. Таким образом, регулирование параметров цепи микроразрядов путём внесения активного сопротивления может привести к повышению энергоэффективности синтеза озона за счёт повышения однородности протекания микроразрядных процессов.

**В главе 3** представлено математическое моделирование систем генерации озона в барьерном разряде, в том числе, в барьерном разряде с высокоомными электродами. Подробно описаны физические основы построения математических моделей на основе схем замещения с сосредоточенными и с распределёнными параметрами.

На рисунке 2 схематически показано устройство разрядных озонаторных камер с плоскопараллельными высокоомными электродами различных конструкций.

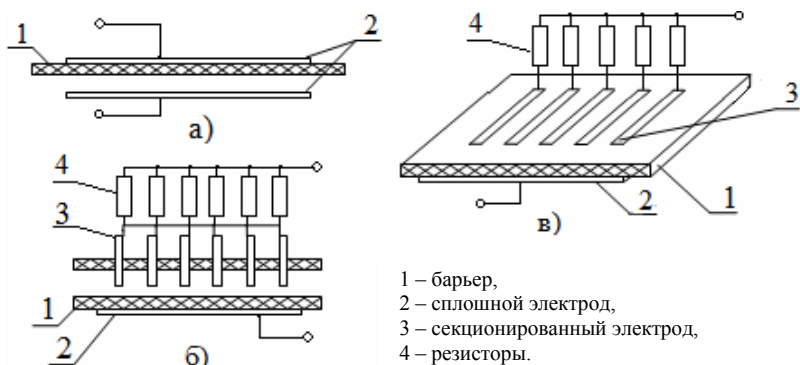


Рисунок 2 – Варианты конструкции разрядной озонаторной камеры с плоскопараллельными электродами барьерного типа: а) со сплошными высокоомными электродами, б) с секционированным электродом, в) с поверхностным разрядом.

Сплошные высокоомные электроды (рисунок 2, а) изготавливаются из состава на основе графита и сажи и имеют удельное поверхностное сопротивление порядка  $10^3 - 10^4$  Ом. Добавочные резисторы (рисунок 2, б, в) имеют сопротивление порядка  $10^3 - 10^4$  Ом.

Для описания первой стадии формирования барьерного микроразряда в системах генерации озона с высокоомными электродами использована известная математическая модель на основе электрической схемы замещения с распределёнными параметрами [Исследование диэлектрических барьеров с короностойким покрытием и разработка высокоресурсных систем электродов генераторов озона: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.09.03 / Кравченко Галина Алексеевна]. В работе Г.А. Кравченко рассматривались системы генерации озона в барьерном разряде с высокопроводящими электродами, сопротивление которых не учитывалось. В настоящей диссертации рассматриваются системы генерации озона в барьерном разряде с электродами, обладающими повышенным активным сопротивлением.

Электрическая схема замещения с распределёнными параметрами, учитывающая наличие высокоомных электродов, представлена на рисунке 3.

Схеме замещения рис. 3 соответствует рассмотрение барьерного поверхностного разряда в одномерном пространстве (рисунок 4).



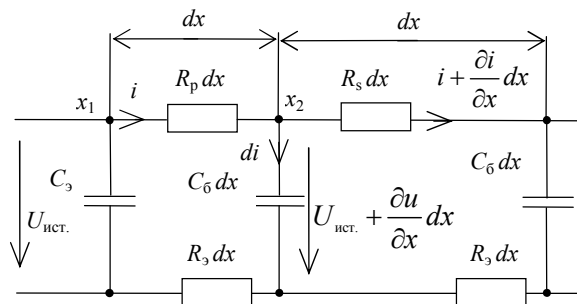
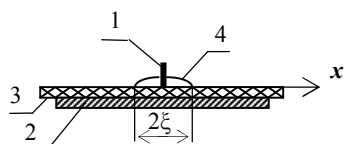


Рисунок 3 – Схема замещения с распределёнными параметрами барьерного микро-разряда с высокоомными электродами:  $U_{ист.}$  – напряжение источника между электродами, В;  $i$  – ток через единицу ширины барьерного поверхностного микро-разряда, А/м;  $C_3$  – межэлектродная ёмкость единицы ширины электрода, Ф/м;  $C_6$  – ёмкость единицы площади диэлектрического барьера, Ф/м<sup>2</sup>;  $R_p$  – удельное поверхностное сопротивление микро-разряда, Ом;  $R_s$  – удельное поверхностное сопротивление диэлектрического барьера, Ом;  $R_3$  – удельное поверхностное сопротивление высокоомного электрода, Ом;  $x$  – координата, отсчитываемая в направлении разряда от границы между электродом и поверхностным микро-разрядом, м.



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

Рисунок 4 – Одномерное изображение барьерного поверхностного микро-разряда.

Для схемы на рисунке 3 справедливо уравнение параболического типа в частных производных:

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

где  $u(x,t)$  – распределение напряжения по барьеру в направлении  $x$  (см. рисунок 4) для любого момента времени  $t$ .

Уравнения такого типа получаются при описании процессов теплопроводности и диффузии, передачи электричества. Для описания процесса лавинообразной ионизации при газовом разряде наиболее подходит постановка задачи о фазовом переходе (задачи Стефана), при котором происходит изменение физического состояния вещества: в нашем случае при барьерном разряде (микро-разряде) и ионизации происходит переход газа из слабоионизированного состояния в ионизированное состояние плазмы.

Решение задачи Стефана известно и в нашем случае имеет вид:

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

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

$A_1$  и  $B_1$  – постоянные, определяемые из граничных условий,

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi \text{ – интеграл ошибок, } a_1 = \frac{1}{\sqrt{(R_p + R_s)C_6}}.$$

Распределение напряжения по поверхности барьера в области микро-разряда определяется по формуле:

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

При этом граница ионизации движется по закону:

$$\xi = \psi\sqrt{t},$$

где  $\psi$  – некоторая постоянная, м/с<sup>0,5</sup>.

Напряженность электрического поля на границе ионизации при  $\xi = x_2$  и  $t = t_\phi$  определяется по формуле:

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

где  $t_\phi$  – время формирования микро-разряда;

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

Время формирования микро-разряда  $t_\phi$  и положение границы ионизации  $\xi$  зависит от напряжения источника:

$$t_\phi = \frac{U_{\text{ист.}}^2}{E_0^2} \cdot \frac{\exp(-2\beta^2)}{\pi \Phi^2(\beta)} (R_p + R_s) C_6, \quad \text{с,}$$

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

Таким образом, в первом приближении геометрия микро-разряда не зависит от сопротивления электродов, а время формирования микро-разряда  $t_\phi$  зависит от сопротивления электродов  $R_s$ .

Для систем генерации озона с высокоомными электродами при напряжении  $U_{\text{ист.}} = 10$  кВ получены следующие результаты:

$$\text{- длина микро-разряда } \xi = \frac{U_{\text{ист.}}}{\sqrt{2} E_0} = \frac{10^4}{\sqrt{2} \cdot 2,45 \cdot 10^6} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Примем значения параметров диэлектрического барьера озонатора  $\varepsilon = 3,5$ ,  $d = 10^{-3}$  м, тогда  $C_6 \approx 3 \cdot 10^{-8}$  Ф/м<sup>2</sup>,  $\psi \approx 50$ . Тогда:

$$\text{- время формирования микро-разряда } t_\phi = (\xi / \psi)^2 \approx 3,3 \cdot 10^{-9} \text{ с.}$$

Максимальное значение тока микроразряда (при  $\xi = x_2$ ) не зависит от напряжения питания во время разряда и определяется по формуле:

$$I_m = 1,65 \frac{E_0 2\pi r_0}{R_p + R_3},$$

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

Для  $R_3 = 0$ ,  $R_p = 10^4$  Ом имеем  $I_m = 1,27$  А и для  $R_3 = R_p = 10^4$  Ом  $I_m = 0,64$  А, что согласуется с известными данными:  $0,1 \text{ А} < I_m < 1 \text{ А}$ .

Описание второй завершающей стадии микроразряда произведено с помощью математической модели на основе электрической схемы замещения с сосредоточенными параметрами (рисунок 5). Такая возможность обусловлена окончанием формирования приборьерной зоны микроразряда, постоянством ёмкости микроразряда  $C_{\text{МК}} = \text{const}$ .

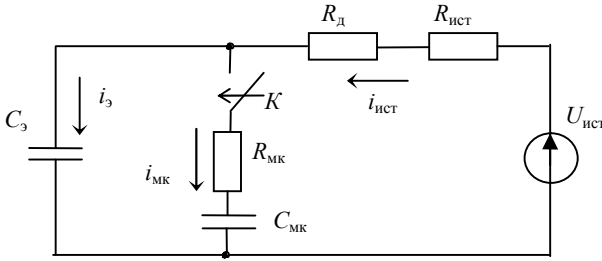


Рисунок 5 – Электрическая схема замещения завершающей стадии микроразряда:  $C_3$  – межэлектродная ёмкость, Ф;  $U_{\text{ИСТ}}$  – источник постоянного напряжения, В;  $R_{\text{ИСТ}}$  – сопротивление источника, Ом;  $R_{\text{Д}}$  – добавочное сопротивление, Ом;  $R_{\text{МК}}$  – активное сопротивление микроразряда, Ом;  $C_{\text{МК}}$  – ёмкость микроразряда, Ф.

Напряжение  $U_{\text{ИСТ}}$  принимаем постоянным в процессе отдельного микроразряда в течение времени порядка  $10^{-8}$  -  $10^{-7}$  с.

Уравнение для тока микроразряда  $i_{\text{МК}}$  согласно схеме замещения (рисунок 5) может быть записано в виде:

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

где  $p_1$  и  $p_2$  – корни характеристического уравнения цепи;

$A_1$  и  $A_2$  – постоянные, которые находятся из начальных условий.

Для конструкций со сплошными плоскопараллельными электродами (см. рисунок 2, а) справедливо соотношение  $C_3 \gg C_{\text{МК}}$ , тогда выражения для корней характеристического уравнения могут быть найдены в виде:

$$p_1 = -1/R_{\text{МК}} C_{\text{МК}}, \quad p_2 = -1/R_{\text{ИСТ}} C_3.$$

В итоге выражение для тока микроразряда имеет вид:

$$i_{\text{МК}} \approx \frac{U_{\text{ИСТ}} - U_3}{R_{\text{МК}}} e^{\frac{-t}{R_{\text{МК}} C_{\text{МК}}}} - \frac{U_{\text{ИСТ}} - U_3}{R_{\text{МК}}} \cdot \frac{C_{\text{МК}}}{C_3} e^{\frac{-t}{R_{\text{ИСТ}} C_3}},$$

где  $U_3 = 0,47U_{\text{ист}}$  – напряжение, приложенное к емкости микроразряда в начале завершающей стадии.

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

$$i_{\text{МК}} \approx \frac{0,53U_{\text{ист}}}{R_{\text{МК}}} e^{\frac{-t}{R_{\text{МК}}C_{\text{МК}}}}$$

Если использовать в качестве электродов озонаторной камеры высокоомные электроды с вносимым в микроразряд поверхностным сопротивлением  $R_3$ , можно уменьшить значение микроразрядного тока и увеличить время микроразряда  $\tau_{\text{МК}} = (R_{\text{МК}} + R_3)C_{\text{МК}}$  в соответствии с выражением:

$$i_{\text{МК}} \approx \frac{0,53U_{\text{ист}}}{R_{\text{МК}} + R_3} e^{\frac{-t}{(R_{\text{МК}} + R_3)C_{\text{МК}}}}$$

Для конструкций с секционированными электродами (рисунок 2, б) справедливо соотношение  $C_3 < C_{\text{МК}}$ . При этом условием одним из корней можно пренебречь. В этом случае оставшийся корень будет иметь вид:

$$p = -\frac{1}{(C_{\text{МК}} + C_3)R_{\text{ист}} + R_{\text{МК}}C_{\text{МК}}} \approx -\frac{1}{C_{\text{МК}}(R_{\text{ист}} + R_{\text{МК}})}$$

Ток микроразряда будет определяться формулой:

$$i_{\text{МК}} \approx \frac{U_{\text{ист}} - U_3}{R_{\text{МК}} + R_{\text{ист}}} e^{\frac{-t}{(C_{\text{МК}} + C_3)R_{\text{ист}} + R_{\text{МК}}C_{\text{МК}}}}$$

В данном случае снижение микроразрядного тока можно получить за счёт искусственного увеличения сопротивления источника питания  $R_{\text{ист}}$  путём включения последовательно с ним добавочного резистора с сопротивлением  $R_d$ . Учитывая  $C_3 < C_{\text{МК}}$ , получим:

$$i_{\text{МК}} \approx \frac{0,53U_{\text{ист}}}{R_{\text{МК}} + R_{\text{ист}} + R_d} e^{\frac{-t}{C_{\text{МК}}(R_{\text{МК}} + R_{\text{ист}} + R_d)}}$$

Максимальный ток микроразряда в начале завершающей стадии определяется по формуле:

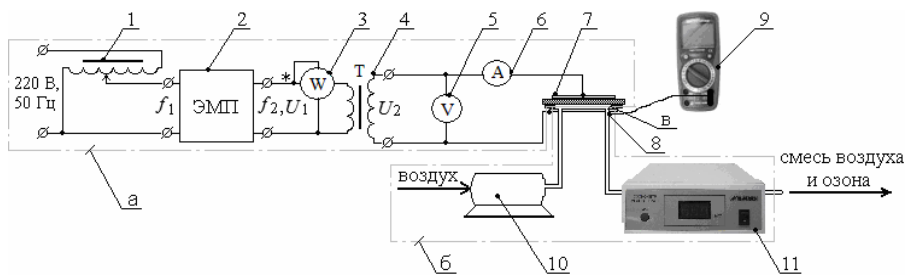
$$I_m \approx \frac{0,53U_{\text{ист}}}{R_{\text{МК}} + R_{\text{ист}} + R_d}$$

Постоянная времени завершающей стадии микроразряда в озонаторе с секционированным электродом будет равна:

$$\tau_3 = C_{\text{МК}}(R_{\text{МК}} + R_{\text{ист}} + R_d)$$

Вывод: увеличение сопротивления цепи микроразряда позволяет уменьшить амплитуду тока микроразряда при одновременном увеличении его длительности, при этом общий переносимый за время микроразряда заряд остаётся неизменным.

**В главе 4** излагаются результаты экспериментальных исследований. Схема установки, на которой проводились сравнительные эксперименты, изображена на рисунке 6.



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

Рисунок 6 – Установка для экспериментального исследования электрических параметров барьерного разряда в озонаторной камере и концентрации озона:  
а – электрическая часть, б – пневматическая часть, в – зона разряда.

Амплитуда напряжения регулируется с помощью автотрансформатора 1, частота – с помощью электромеханического преобразователя 2. Активная мощность, потребляемая озонаторной камерой 7 и трансформатором 4, измеряется с помощью ваттметра 3. Для измерения напряжения и тока используются киловольтметр 5 и миллиамперметр 6. Воздух в камеру подается от компрессора 10 со скоростью 1,6 л/мин. Температура газа на выходе из камеры измеряется с помощью термопары (типа К) 8, подключенной к мультиметру 9. Концентрация озона в озоновооздушной смеси на выходе из озонаторной камеры измеряется с помощью озонметра 11.

На рисунке 7 представлены зависимости концентрации озона на выходе из разрядной озонаторной камеры с секционированным электродом (см. рисунок 2, б) от значения добавочного сопротивления  $R_d$  для установившегося режима работы при различных рабочих напряжениях между электродами разрядной озонаторной камеры.

На рисунке 8 изображены зависимости показателя энергоэффективности синтеза озона  $X_{O_3}$ , г/кВт·ч, от напряжения между электродами при различных значениях сопротивления  $R_d$  резисторов, подключаемых к секционированному электроду озонаторной камеры. Параметр  $X_{O_3}$ , г/кВт·ч, характеризует затраты электроэнергии на выработку озона.

Системы генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами при добавочном сопротивлении в цепи микроразрядка порядка 3 кОм обладают повышенной энергоэффективностью и увеличенной до 20 % производительностью при заданном напряжении.

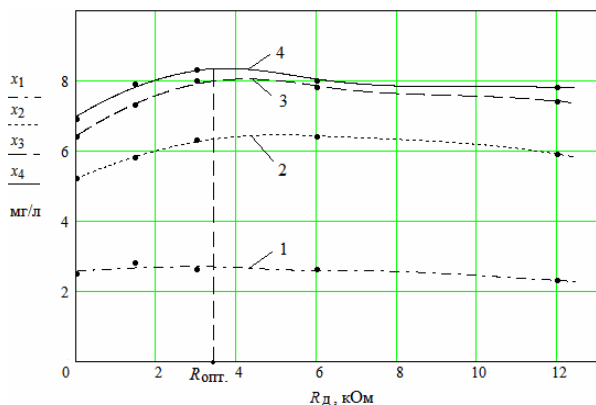


Рисунок 7 – Концентрация озона ( $x_{O_3}$ , мг/л) на выходе из озонаторной камеры в зависимости от добавочного сопротивления ( $R_d$ , кОм):

1 –  $U_2 = 4,0$  кВ; 2 –  $U_2 = 5,0$  кВ; 3 –  $U_2 = 6,0$  кВ; 4 –  $U_2 = 7,0$  кВ.

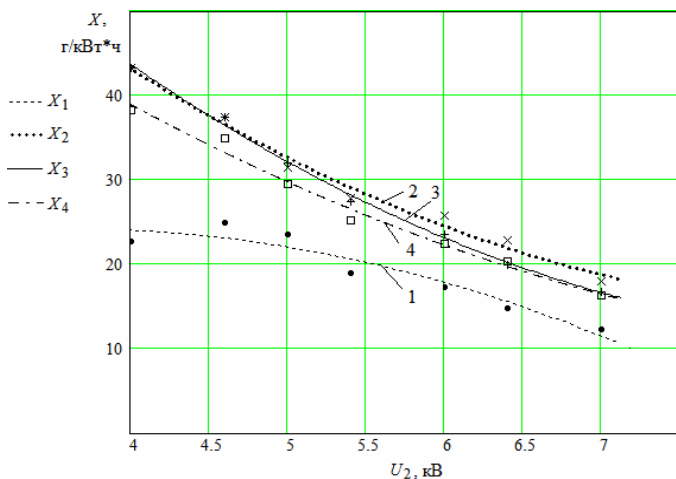


Рисунок 8 – Показатель энергоэффективности ( $X_{O_3}$ , г/кВт\*ч) синтеза озона в зависимости от напряжения ( $U_2$ , кВ): 1 –  $R_d = 0$ ; 2 –  $R_d = 3,0$  кОм;

3 –  $R_d = 6,0$  кОм; 4 –  $R_d = 12$  кОм.

На рисунке 9 представлены зависимости нагрева озоносодержащего газа на выходе из озонаторной камеры с поверхностным разрядом от протекающего тока при различных значениях добавочного сопротивления. Измерения проводились при установившемся тепловом режиме. Наличие добавочного сопротивления порядка  $10^4$  Ом приводит к уменьшению нагрева озоносодержащего газа. Увеличение добавочного сопротивления в цепи микроразряда приводит к уменьшению нагрева газа.

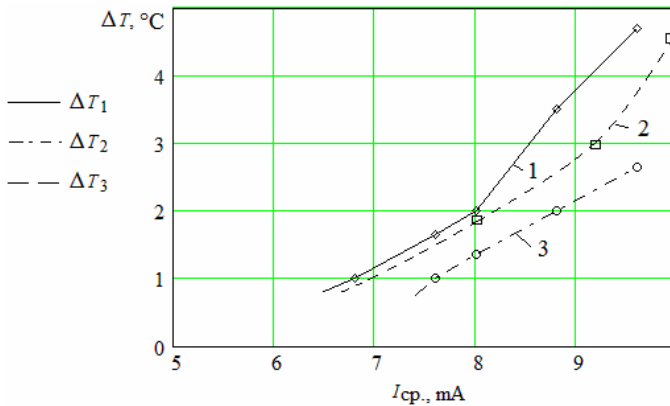


Рисунок 9 – Нагрев озоносодержащего газа ( $\Delta T$ ) в зависимости от среднего тока ( $I_{cp}$ ) через разрядную озонаторную камеру: 1 –  $R_d = 0$ ; 2 –  $R_d = 6 \text{ к}\Omega$ ; 3 –  $R_d = 12 \text{ к}\Omega$ .

На рисунке 10 изображена схема экспериментальной установки, на которой проводились осциллографические исследования импульсов микроразрядов с различным сопротивлением цепи микроразряда.

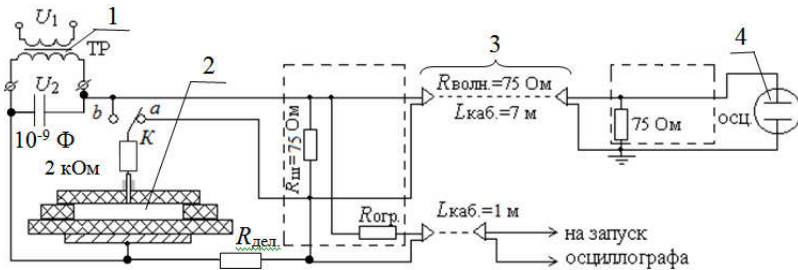


Рисунок 10 – Схема установки для снятия осциллограмм тока микроразряда:  
 1 – однофазный трансформатор  $U_{нн} = 100 \text{ В}$ ,  $U_{вн} = 10000 \text{ В}$ ; 2 – разрядная ячейка;  
 3 – передающий кабель; 4 – осциллограф.

Осциллографическое исследование систем генерации озона с высокочастотными электродами основано на фотографировании и измерении параметров осциллограмм отдельных микроразрядов (рисунки 11 (а, б), а также последовательных микроразрядов (рисунки 12, 13). Определена амплитуда тока, длительность фронта импульса тока, постоянная времени импульса тока микроразряда. Также определены параметры последовательных микроразрядов: среднее время между импульсами микроразрядов, средний максимум тока микроразрядов.

Осциллограммы, изображенные на рисунке 11, имеют параметры:

- коэффициент отклонения 110 мА/дел.;
- коэффициент развёртки 10 нс/дел.

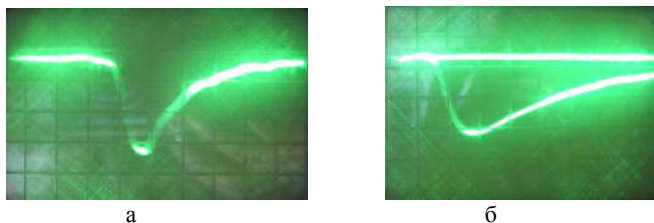
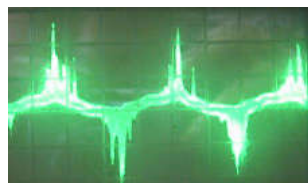
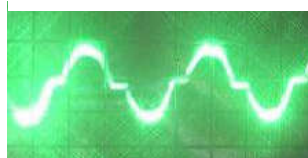


Рисунок 11 – Осциллограммы тока микроразряда: а) без дополнительных изменений, б) с увеличенным сопротивлением ( $R_d = 1,2 \text{ кОм}$ ).

При добавлении последовательно в цепь микроразряда активного сопротивления по сравнению с обычным микроразрядом (рисунок 11, а) увеличивается время переходного процесса микроразряда (рисунок 11, б), а амплитуда тока микроразряда уменьшается; постоянная времени завершающей стадии микроразряда  $\tau_z$  увеличилась примерно в 2 раза: примерно с 20 нс до 50 нс. Амплитуда тока микроразряда также уменьшилась примерно в 2 раза: примерно с 350 мА до 200 мА.



а)



б)

Рисунок 12 - Осциллограммы тока (а) и напряжения (б) на разрядной ячейке.

На рисунке 12, а изображена осциллограмма тока нескольких микроразрядов с обычными (неизменными) параметрами цепи разряда:

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

Из осциллограммы (рисунок 12, а) можно определить время между микроразрядами примерно равное 5 мс; время существования группы микроразрядов также примерно равно 5 мс. Периодичность возникновения микроразрядов соответствует периодическому нарастанию напряжения на разрядной ячейке.

Периодически возникающим импульсам тока микроразрядов (рис. 12, а) соответствует периодическое изменение напряжения на разрядной ячейке (рис. 12, б):

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

На рисунке 13 представлены осциллограммы нескольких микроразрядов с обычными неизменными параметрами (рисунок 13, а) и с увеличенным сопротивлением цепи микроразряда (рисунок 13, б) при увеличенной развёртке. Осциллограммы, изображённые на рисунок 13 (а, б), имеют параметры:

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



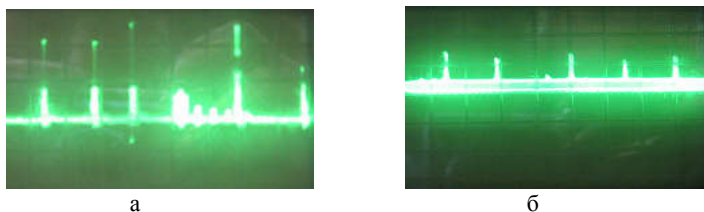


Рисунок 13 – Осциллограммы нескольких микроразрядов: а) с обычными параметрами, б) с увеличенным сопротивлением.

Из осциллограмм (рисунок 13) видно, что применение высокоомных электродов в системах генерации озона в барьерном разряде позволяет повысить однородность барьерного разряда: амплитуда импульсов тока микроразрядов и время между микроразрядами становятся равномернее.

В таблице представлены сравнительные результаты теоретических и экспериментальных исследований барьерных микроразрядов с высокоомными электродами при напряжении  $U_{ист.} \approx 10$  кВ.

Таблица – Основные параметры барьерного микроразряда с высокоомными электродами.

Параметр	Результаты расчёта	Результаты эксперимента
время формирования $t_{\phi}$ , нс	3,3	20
постоянная времени завершения $\tau_3$ , нс	2,8	50
максимальный ток $I_m$ , А	0,64	0,25

В расчётах не была учтена нелинейность сопротивления микроразряда во время развития, а также его индуктивность. Этим объясняется меньшее по сравнению с экспериментальным расчётное значение времени формирования ( $t_{\phi}$ ) и завершения ( $\tau_3$ ) микроразряда и большее расчётное значение максимального тока микроразряда ( $I_m$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании изложенных в диссертации результатов можно сформулировать следующие выводы:

1. В диссертации предложены новые системы генерации озона барьерного типа с высокоомными электродами, защищенные патентами РФ.
2. Разработаны и исследованы физические модели систем генерации озона в барьерном разряде, отличающиеся от известных высоким активным сопротивлением электродов разрядной камеры порядка  $10^3 - 10^4$  Ом.
3. Разработаны математические модели систем генерации озона в барьерном разряде с высокоомными электродами, с помощью которых определены основные параметры барьерного микроразряда с высокоомными электродами.

4. Проведено сравнительное экспериментальное исследование систем генерации озона в барьерном разряде при различном значении сопротивления высокоомных электродов; экспериментально установлено оптимальное значение активного сопротивления высокоомных электродов 3–5 кОм, обеспечивающее снижение энергопотребления систем генерации озона в барьерном разряде.

5. Проведено сравнительное осциллографическое исследование физических моделей систем генерации озона в барьерном разряде, отличающихся активным сопротивлением, включаемым в цепь микроразряда; установлена взаимосвязь значения активного сопротивления цепи микроразряда с амплитудой и длительностью импульса тока барьерного микроразряда.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

#### **В изданиях из перечня ВАК**

1. Матюнин, А.Н. Применение упрощенной математической модели при исследовании барьерного разряда / А.Н. Матюнин, В.А. Нестерин, Ю.П. Пичугин // Вестник Чувашского университета. - 2017. - № 1. - С. 130-136.

2. Матюнин, А.Н. Особенности работы генераторов озона с высокоомными электродами / Ю.П. Пичугин, А.Н. Матюнин // Вестник Чувашского университета. - 2015. - № 3. - С. 109-121.

3. Матюнин, А.Н. Плазмохимический генератор озона с повышенной однородностью микроразрядных процессов в барьерном разряде / В.В. Андреев, А.Н. Матюнин, Ю.П. Пичугин // Прикладная физика. - 2014. - № 3. - С. 39-42.

4. Матюнин, А.Н. Исследование генерации озона в озонаторах с высокоомными электродами / Ю.П. Пичугин, А.Н. Матюнин // Вестник Чувашского университета. - 2011. - № 3. - С. 107-111.

5. Матюнин, А.Н. Исследование структуры барьерного разряда вблизи электрода с цилиндрическим поперечным сечением / В.В. Андреев, Л.А. Васильева, А.Н. Матюнин, Ю.П. Пичугин // Прикладная физика. - 2011. - № 1. - С. 52-57.

6. Matyunin, A.N. Investigation of the Barrier Discharge Structure near Electrode with a Cylindrical Cross Section / V.V. Andreev, L.A. Vasilyeva, A.N. Matyunin, and Yu.P. Pichugin // Plasma Physics Reports. - 2011. - Vol. 37. - No. 13. - P. 1190-1195.

7. Матюнин, А.Н. Исследование эффективности плазмохимических генераторов озона на барьерном разряде в воздухе при атмосферном давлении / В.В. Андреев, А.Н. Матюнин, Ю.П. Пичугин, В.Г. Телегин, Г.Г. Телегин // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. - 2011. - Вып. 4. - С. 112-117.

#### **Патенты**

8. Озонатор: пат. 2660870 Российская Федерация. № 2016119299; заявл. 18.05.16; опубл. 23.11.17. Бюл. № 19.

9. Озонатор: пат. 2427528 Российская Федерация. № 2009144348/ 05; заявл. 30.11.09; опубл. 27.08.11. Бюл. № 24.

10. Генератор озона: пат. на полезную модель № 135639 РФ. 2013130083/05 заявл. 01.07.2013, опубл. 20.12.2013. Бюл. № 35.

### Публикации в других изданиях

11. Матюнин, А.Н. Совершенствование и применение генераторов озона / А.Н. Матюнин // Сборник трудов молодых ученых и специалистов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015, Вып. 11. - С. 200-204.
12. Матюнин, А.Н. Повышение эффективности озонаторов с высокоомными электродами / А.Н. Матюнин // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. 11. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С. 260-274.
13. Матюнин, А.Н. Совершенствование озонаторов для очистки сточных вод / А.Н. Матюнин // Наука XXI века: сборник научных статей победителей и призеров IX Республиканского конкурса научно-исследовательских работ студентов, молодых учёных и специалистов. – Чебоксары, 2013. – С. 113-117.
14. Матюнин, А.Н. Озонаторы с короностойкими барьерами и экономичными электродами / А.Н. Матюнин // МАТЕРИАЛЫ VII Республиканского конкурса инновационных проектов по программе У.М.Н.И.К. – Чебоксары, 2012. – С. 66-67.
15. Матюнин, А.Н. Исследование моделей озонаторов с высокоомными электродами / Ю.П. Пичугин, А.Н. Матюнин // Человек. Гражданин. Учёный: сб. тр. Регион. фестиваля студ. и молодёжи. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. – С. 14-15.
16. Матюнин, А.Н. Исследование, разработка генераторов озона и их использование в экологических и технологических целях / Г.А. Кравченко, Ю.П. Пичугин, А.Н. Матюнин // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. Вып. 7. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – С. 264-271.
17. Матюнин, А.Н. Экспериментальное исследование озонаторов с высокоомными электродами / А.Н. Матюнин // Юность Большой Волги: сборник статей лауреатов XIII Межрегиональной конференции-фестиваля научного творчества учащейся молодежи «Юность Большой Волги». – Чебоксары, 2011. – С. 70-71.
18. Матюнин, А.Н. Озонаторные установки с высоким ресурсом работы для дезинфекции и очистки воды / А.Н. Матюнин // Наука XXI века: сборник научных статей победителей и призеров VIII Республиканского конкурса научно-исследовательских работ студентов, молодых ученых и специалистов. – Чебоксары, 2011. – С. 102-106.
19. Матюнин, А.Н. Высокочастотные озонаторы на базе экономичных электродов / А.Н. Матюнин // Сборник материалов победителей и призеров VII Республиканского конкурса научно-исследовательских работ студентов, молодых ученых и специалистов «Наука XXI века». – Чебоксары, 2010. – С. 151-156.
20. Матюнин, А.Н. Источник питания озонатора / В.Г. Захаров, Ю.П. Пичугин, А.Н. Матюнин // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. – С. 315-316.
21. Матюнин, А.Н. Характеристики импульсов тока барьерного разряда в озонаторе и их регулирование в практических целях / А.Н. Матюнин // Сборник научных трудов молодых учёных и специалистов. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2009. – С. 44-47.
22. Матюнин, А.Н. Влияние характеристик микроразряда на работу барьерного озонатора / Ю.П. Пичугин, А.Н. Матюнин // Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий. Сборник материалов XXI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. Часть 2. Казань: Издательство «Отечество», 2009. – С. 181-182.

23. Матюнин, А.Н. Повышение эффективности работы кассеты, генерирующей озон при высокой частоте питающего напряжения / Ю.П. Пичугин, А.Н. Матюнин // Сборник тезисов победителей XI межрегиональной конференции-фестиваля научного творчества учащейся молодёжи «Юность Большой Волги». – Чебоксары, 2009. – С. 170-171.

24. Матюнин, А.Н. Совершенствование генераторов озона для агропромышленного комплекса / Г.А. Кравченко, Ю.П. Пичугин, А.Н. Матюнин // Материалы республиканской научно-практической конференции «Наука в развитии села». Чебоксары: ЧГСХА, 2009. – С. 231-236.

25. Матюнин, А.Н. Регулирование параметров барьерного разряда с целью повышения эффективности синтеза озона / Ю.П. Пичугин, А.Н. Матюнин // Человек. Гражданин. Учёный: сб. тр. Открытого фестиваля студ. молодёжи. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2009. – С. 189.

26. Матюнин, А.Н. Временная структура барьерного разряда / Ю.П. Пичугин, А.Н. Матюнин // Студенческая наука – будущее России. Сб. тр. Регион. 42-й научн. студенч. конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш ун-та, 2008. – С. 297-299.

МАТЮНИН Алексей Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦИИ ОЗОНА  
В БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ С ВЫСОКООМНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 27.06.19. Формат 60x84 1/16. Печ. л. 1,3.  
Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № 792

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»  
428015 Чебоксары, Московский просп., 15