

На правах рукописи

Кравченко Галина Алексеевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ
С КОРОНОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ
И РАЗРАБОТКА ВЫСОКОРЕСУРСНЫХ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОДОВ ГЕНЕРАТОРОВ ОЗОНА**

Специальность 05 09 03 «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» на кафедре электромеханики и технологии электротехнического производства.

Научный руководитель: **Пичугин Юрий Петрович**

кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Генин Валерий Семенович**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электрооборудования и автоматики ФГБОУ ВПО «Российский государственный аграрный заочный университет», г. Балашиха.

Силкин Евгений Михайлович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, генеральный директор ООО «Силовая электроника», г. Ульяновск

Ведущая организация:

ООО «Научно-производственное предприятие «ВЭЛИТ», г. Истра Московской области.

Защита состоится «23» декабря 2013 г. В 13 часов 00 минут в зале Ученого совета на заседании диссертационного совета Д212.301.06 при ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н.Ульянова» (428034, г. Чебоксары, ул. Университетская д. 38, библиотечный корпус, третий этаж).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н.Ульянова».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу 428015, г. Чебоксары, Московский проспект, 15 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « » ноября 2013г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д212.301.06

Н.В. Руссова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Использование озонных технологий в различных отраслях промышленности и сельском хозяйстве связано с разработкой экологически чистых способов решения проблемы защиты от вредных выбросов в атмосферу и окружающую среду. Расширяется применение озона в медицине и биотехнологии.

Озонаторный комплекс включает в себя систему газоподготовки, систему генерации озона, систему подачи, распределения и диспергирования озон-газовой смеси, систему отведения и деструкции остаточного озона, систему озонобезопасности.

Наиболее важной частью озонаторного комплекса является система генерации озона, состоящая из высоковольтного источника питания и системы электродов, формирующей газоразрядное пространство, где вследствие электрохимических реакций образуется озон.

Основополагающую роль в развитии озонаторной техники играют монография и многочисленные статьи Ю.В. Филиппова – создателя электрической теории озонаторов, работы В.Г. Самойловича, В.В. Лунина, С.Н.Ткаченко, В.А. Вобликовой, В.И. Пантелеева, В.И. Гибалова, К.В. Козлова, большой вклад в развитие озонаторной техники внесли, В.Н. Бондалетов, В.В.Данилин, М.П. Кокуркин, М.М. Пашин.

Большинство современных исследований направлено на повышение производительности озонаторов при уменьшении энергозатрат. Показано, что наиболее эффективно и энергетически выгодно получение озона в барьерном разряде.

Однако недостаточно внимания уделено ресурсу озонаторных комплексов, хотя одной из проблем при эксплуатации барьерных систем генерации озона – является повышение ресурса их работы, связанного в основном с выходом из строя диэлектрического барьера.

Существует несколько путей исследований в области повышения ресурса работы систем генерации озона. В частности, это поиск и разработка наиболее стойких материалов для барьера, использование оригинальных конструкций при проектировании озонаторных комплексов, применение систем предварительной подготовки газовой смеси для генерации озона и меры по снижению интенсивности воздействия факторов старения на барьер при производстве озона.

Одним из перспективных направлений повышения ресурса является совершенствование конструкции диэлектрических барьеров.

Тема диссертационной работы, посвященная исследованию диэлектрических барьеров с короностойким покрытием и разработке высокоресурсных систем генерации озона для озонаторных комплексов является весьма актуальной и востребованной.

Целью работы является разработка высокоресурсных систем высоковольтных электродов озонаторного комплекса на основе исследования многослойных барьеров с защитным покрытием.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Анализ причин разрушения диэлектрического барьера. Разработка математической модели отдельного микрозаряда. Исследование воздействия частичных разрядов и высокой температуры на систему электродов озонаторной установки.
2. Обзор существующих решений, направленных на повышение срока службы систем генерации озона и разработка способа повышения ресурса систем высоковольтных электродов путем применения многослойных диэлектрических барьеров.
3. Разработка физических моделей систем высоковольтных электродов с многослойными диэлектрическими барьерами. Исследования и разработка защитных покрытий. Определение основных характеристик полученных покрытий.
4. Разработка методики проведения экспериментальных исследований и статистической обработки их результатов. Построение дисперсионных моделей, позволяющих оценить влияние термостойкого слоя на срок службы и производительность системы генерации озона.
5. Разработка экспериментальной установки для проведения форсированных испытаний системы высоковольтных электродов. Оценка ресурса физической модели системы высоковольтных электродов при работе в нормальном режиме.
6. Реализация результатов и полученных практических рекомендаций при разработке вариантов конструкций высококачественных систем высоковольтных электродов установок для генерации озона.

Методы исследования: физическое и математическое моделирование, с использованием общей теории электрических цепей и теории дифференциальных уравнений в частных производных. Экспериментальные исследования проведены на опытных образцах озонаторов в лабораторных и производственных условиях.

Достоверность полученных результатов обеспечена принятием обоснованных допущений, применением апробированных методов измерений, тщательной калибровкой средств измерений, а также сопоставлением расчетных и экспериментальных данных с результатами других авторов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Способ повышения ресурса систем генерации озона барьерного типа путем применения многослойных диэлектрических барьеров, защищенный патентом РФ №2355627 бюл. № 5 от 20.05.09.
2. Методика проведения экспериментальных исследований моделей систем высоковольтных электродов.
3. Результаты проведения испытаний физических моделей систем высоковольтных электродов генераторов озона. Рекомендации по увеличению ресурса.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложено и обосновано применение многослойного диэлектрического барьера, позволившего увеличить ресурс систем генерации озона барьерного типа до 10 000 часов (патент РФ №2355627 бюл. № 5 от 20.05.09)
2. Разработаны конструкции систем высоковольтных электродов, отличающиеся от известных наличием короностойкого покрытия, защищающего поверхность диэлектрического барьера от воздействия частичных разрядов и высокой температуры (патент РФ №2355627 бюл. № 5 от 20.05.09)
3. Предложена и обоснована методика, ускоренных ресурсных испытаний озонаторных секций, позволившая сократить время испытаний.

Практическая значимость работы:

1. На уровне изобретения (патент РФ №2355627 бюл. № 5 от 20.05.09, патент № 122084 бюл.№32 от 20.11.12) разработаны системы генерации озона с применением кассет с многослойным барьером, отличающихся от ранее известных наличием короностойкого покрытия диэлектрического барьера, а также повышенным ресурсом работы.
2. Разработаны и внедрены в эксплуатацию системы генерации озона для озонаторных комплексов (акт о внедрении ООО НПП «Экология» г. Чебоксары от 25.07.2012, акт о внедрении ООО НПП « ВЭЛИТ» г. Истра от 20.09.2012).
3. Разработана и внедрена установка для испытания систем высоковольтных электродов озонаторов барьерного типа, позволяющая проводить ускоренные ресурсные испытания.

Публикация и апробация работы

По теме диссертации опубликовано 13 работ, из которых 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, два патента РФ.

Основные положения, результаты и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и республиканских конференциях:

На XII Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» МКЭЭ – 2008 Крым, Алушта.

На Научной конференции «Электротехника, электромеханика и электротехнологии в XXI веке», Чебоксары 2008 г.

На 30-ом Всероссийском семинаре «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии», Москва 2008 г.

На Молодежной международной научной конференции «Туполевские чтения», Казань 2009 г.

На Республиканской научно-практической конференции «Молодёжь, наука, комплексное развитие села» Чебоксары, ГСХА 2009 г.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников, включающего 110 наименований и двух приложений. Общий объем работы составляет 136 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована её цель, определены задачи и приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой аналитический обзор литературных источников теме исследования. Рассмотрены основные физические процессы, проходящие в системах генерации озона, приведены основные типы конструкций современных озонаторов, проанализированы их достоинства и недостатки. Особое внимание в главе уделено проблеме ресурса озонаторных комплексов. В диссертации приведен обзор известных решений, позволивших повысить ресурс работы озонаторных комплексов. Показано, что эти способы имеют существенные ограничения, как по ресурсу, так и по другим параметрам: стоимости, простоте эксплуатации, технологичности изготовления. В первой главе показано, что главным фактором, обеспечивающим решение указанных проблем, является разработка и создание высокоресурсных диэлектрических барьеров.

Во второй главе проведен анализ причин разрушения диэлектрических барьеров в генераторах озона. Установлено, что одной из основных причин разрушения диэлектрических барьеров является воздействие микроразрядов на материал барьера. Рассмотрена структура отдельного микроразряда. С использованием математического моделирования проведена оценка размеров его приборьерной области и температурного воздействия на барьер. Предложено применение многослойных диэлектрических барьеров в генераторах озона. Для оценочных расчетов геометрических размеров микроразряда, в частности диаметра приборьерной области, использовалась одномерная система, в которой возникает барьерный разряд (рисунок 1). Здесь в точке $x = 0$ с поверхностью диэлектрического барьера соприкасается тонкая электропроводящая пластина (электрод 1), второй электрод расположен на противоположной поверхности диэлектрика (электрод 2). При подаче напряжения на электроды около пластины в области $-x_1 \leq x \leq +x_1$ по поверхности барьера загорается электрический разряд.

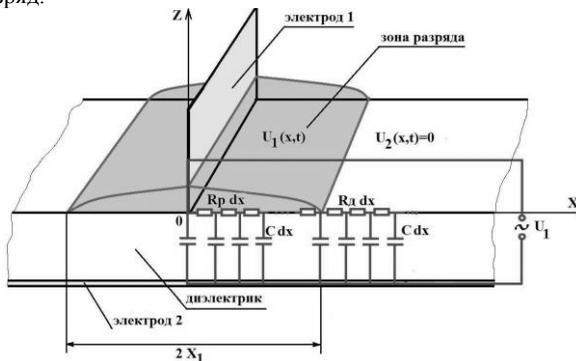


Рисунок 1 – Взаимное расположение электродов и диэлектрического барьера в модельной системе

Для такой системы справедливо уравнение параболического типа

$$\frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial x^2} - R_p C \frac{\partial U(x,t)}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где $U(x,t)$ - распределение напряжения по барьеру для любого момента времени t ; R_p – удельное поверхностное сопротивление барьера; C – удельная емкость барьера.

Начальные и граничные условия:

$$U(0,t) = U_1,$$

где U_1 – постоянное напряжение, которое поддерживается на пластине.

$$U(x,0) = 0.$$

Изменением потенциала в области $-x_1 < x < x_1$ можно пренебречь, т.к. удельное поверхностное сопротивление в зоне разряда $R_p \approx 10^4$ Ом, намного меньше удельного поверхностного сопротивления диэлектрика $R_d \geq 10^{12}$ Ом, из которого изготовлен барьер.

$$U_2(x,t) \approx 0.$$

Решая уравнение (1), учитывая начальные и граничные условия, получены выражения для определения параметров микрозаряда

$$x_{1\max} = 0,7 \frac{U_1}{E_0} \quad t_p = 0,41 \left(\frac{U_1}{E_0} \right)^2 R_p C.$$

Проведена оценка полученных величин: при $R_p = 10^4$ Ом, $C = 10^{-7}$ Ф/м², $U_1 = 10$ кВ, $E_0 = 30$ кВ/см.

получено $x_{1\max} = 2,3$ мм; $t_p = 7,6 \cdot 10^{-9}$ с.

Расчетные кривые представлены на рисунке 2.

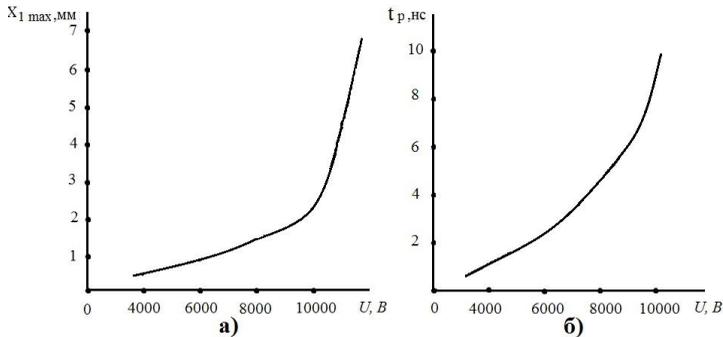


Рисунок 2 – Зависимость размера приборьерного пятна (а), длительности микрозаряда (б) от приложенного межэлектродного напряжения.

Оценочные расчеты размера приборьерной области согласуются с экспериментальными данными, полученными на электрогазодинамическом устройстве для визуального наблюдения структуры барьерного разряда, разработанном в лаборатории «озона и озонных технологий» ЧГУ. Полученные фотографии структуры барьерного разряда (рисунок 3), позволяют определить геометрические размеры микрозаряда.

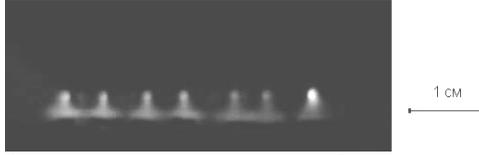


Рисунок 3 – Фотография структуры барьерного разряда

Оценочные расчеты температурного воздействия, оказываемого отдельным микроразрядом на диэлектрический барьер, проводились на основе стандартного уравнения теплопередачи:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где α – коэффициент температуропроводности; ϑ – температура; начальные и граничные условия:

$$\vartheta = f(x) \text{ при } t = 0 \quad (\text{начальное условие})$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial x} = g(t) \text{ при } x = 0 \quad (\text{граничное условие})$$

Используя решение уравнения (2), получена формула для оценки температуры:

$$\vartheta = 2Q \sqrt{\frac{ct}{\pi}}$$

Тепловой поток определен по формуле $Q = \frac{W}{S \tau_{\text{разр}}}$.

Энергия микроразряда: $W = U_s q$, заряд микроразряда $q = I_{\text{max}} \tau_{\text{разр}}$.

Используя литературные данные о типичных характеристиках микроразряда: $U_s \approx 1 \text{ кВ}$, $I_{\text{max}} = 0.5 \text{ А}$, $\tau_{\text{разр}} = 10^{-8} \text{ с}$, $S = \pi x_{1\text{max}}^2 \approx 16.6 \text{ мм}^2$, $\alpha = 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, получено $\vartheta \approx 1^\circ \text{С}$.

Таким образом, показано, что один микроразряд повышает температуру на поверхности диэлектрика примерно на 1°С . За один период, в установившемся режиме работы происходит два микроразряда. Соответственно, за 1 секунду при частоте 50 Гц без учета процесса охлаждения температура может достичь 100°С . В результате, происходит значительное повышение температуры на поверхности диэлектрического барьера.

Характер разрушения поверхности диэлектрика микроразрядами подтвердили эксперименты с лавсановой плёнкой, помещенной на поверхность диэлектрического барьера, выполненного из стеклотекстолита. При работе модели на лавсановой пленке образовались проплавленные отверстия, диаметр которых совпадает с расчетным (рисунок 4).

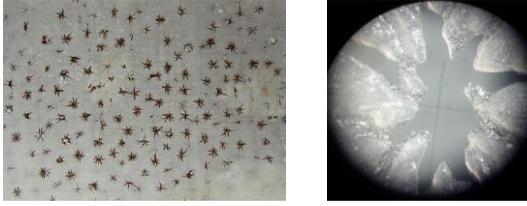


Рисунок 4 – Разрушение лавсановой пленки.

В представленной работе исследовались многослойные барьеры с защитным покрытием, на основе кремнийорганической эмали с наполнителем из порошков неорганических материалов. Эта разработка выполнена на уровне изобретения и защищена патентом РФ №2355627, соавтором которого является соискатель.

Третья глава посвящена описанию методики проведения исследований, экспериментальной установки и физических моделей систем высоковольтных электродов. Там же приведены результаты экспериментов ускоренных испытаний различных моделей озонаторных секций. Проведена статистическая обработка опытных данных. Это позволило построить дисперсионную модель эксперимента, а также произвести оценочный расчет срока службы озонаторной секции, работающей в нормальном режиме.

Для исследований были созданы физические модели систем высоковольтных электродов генераторов озона. Разработан испытательный стенд для проведения экспериментов. Основной частью испытательного стенда (рисунок 5) является источник высокого напряжения с регулируемой частотой.

Основные характеристики электромеханического источника питания:

Максимальная выходная мощность 700 Вт.

Скорость вращения в пределах от 500 до 7000 об/мин,

Частота напряжения при указанных скоростях вращения от 50 до 700 Гц.

Величина выходного напряжения генератора до 220 В.

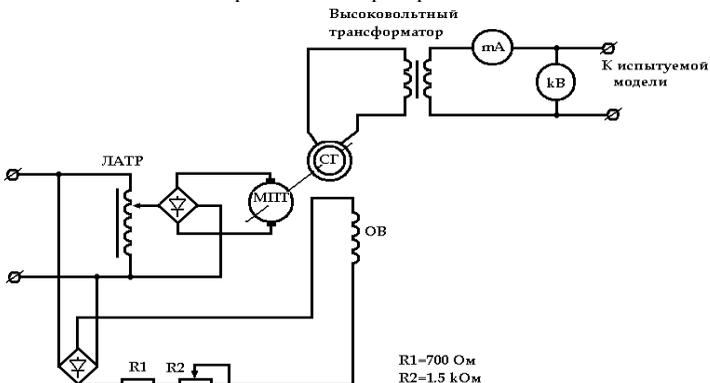


Рисунок 5 – Электрическая схема установки

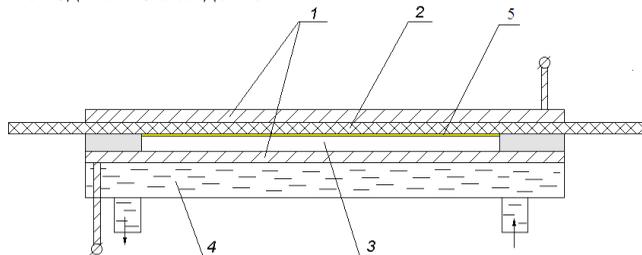
С целью сокращения времени экспериментов, разработана методика ускоренных испытаний. Эксперименты проводились в форсированном режиме: на частоте 400 Гц при напряжении от 6 до 10 кВ. Выбор напряжения определялся опытным путем, чтобы образец без покрытия работал до пробоя от 15 до 60 минут, при этом фиксировался ток. Для испытания образца с защитным покрытием устанавливался ток той же величины. За счет защитного слоя увеличивалась общая толщина барьера, поэтому испытание материалов с покрытием проходило при более высоких напряжениях.

Исследования проводились на различных диэлектрических барьерах, при различных конструкциях моделей систем электродов генераторов озона, с разным типом охлаждения.

В качестве диэлектрического барьера исследовались текстолит, стеклотекстолит, лавсановый гетинакс и др. Защитный слой выполнялся на основе эмали «Церта» (ТУ 2312-001-492 48846-2000), кремнийорганического лака КО-85 (ГОСТ 11066-74), а также пентафталевых лаков ПФ115 (ГОСТ 6465-76) и ПФ170 (ГОСТ 15907-70). В качестве наполнителей использовались порошки следующих материалов: оксид алюминия, двуокись титана, тальк, слюда, асбест.

Опытным путем установлено оптимальное соотношение связующего и наполнителя. Хорошей адгезией, приемлемыми механическими свойствами и достаточной короностойкостью обладает состав с 50% содержанием наполнителя. Эмаль, приготовленная в лабораторных условиях, наносилась на поверхность исследуемого диэлектрического барьера кистью, толщина покрытия составляла 0,1–0,15 мм.

На рисунке 6 представлена модель секции генератора озона с плоскими электродами с водяным охлаждением.



1 – плоские электроды; 2 – диэлектрический барьер; 3 – воздушный зазор;
4 – водяное охлаждение; 5 – короностойкое покрытие

Рисунок 6 – Модель системы высоковольтных электродов генератора озона

Модели испытывались до пробоя при токе от 1,5 до 2 мА и напряжении от 7 до 10 кВ. Толщина барьера составляла 0,5 мм.

Результаты испытаний на различных барьерах с защитным слоем, выполненным на основе кремнийорганического лака и наполнителя из порошка Al_2O_3 представлены на рисунке 7.

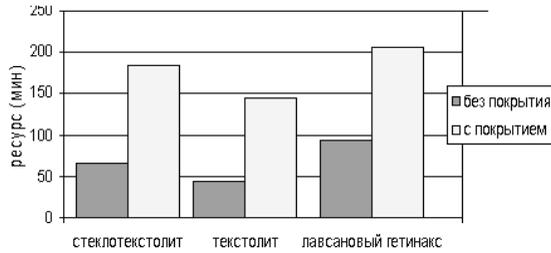


Рисунок 7 – Результаты испытаний модели с водяным охлаждением

В экспериментах с различным составом короностойкого покрытия лучшие результаты наблюдались при использовании в качестве наполнителя порошков Al_2O_3 и талька, а в качестве связующего – кремнийорганического лака. Результаты экспериментов представлены на рисунке 8.

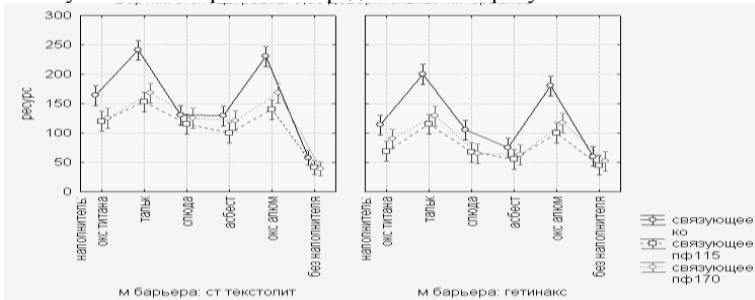
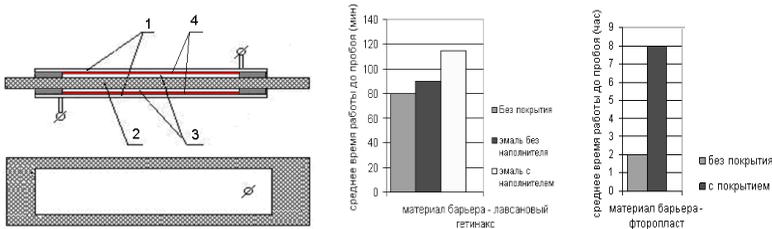


Рисунок 8 – Результаты исследований по влиянию различного состава покрытия на ресурс моделей

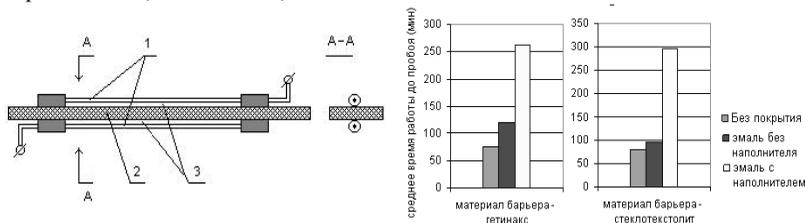
В работе испытывались модели с естественным воздушным охлаждением. Проведены эксперименты на моделях с плоскими и с проволочными электродами. Конструкция модели с плоскими электродами и полученные опытные данные представлены на рисунке 9.



1 – плоские электроды; 2 – диэлектрический барьер;
3 – воздушные зазоры; 4 – короностойкое покрытие

Рисунок 9 – Модель системы высоковольтных электродов генератора озона с плоскими электродами

Модель с проволочными электродами представлена на рисунке 10. Electroды изготовлены из алюминиевой проволоки диаметром 2,5 мм. Воздушные зазоры между электродом и диэлектрическим барьером создавались удалением части изоляции алюминиевого провода в зоне разряда и составляли по 1 мм. В качестве диэлектрического барьера использовался стеклотекстолит марки СТ – М, толщиной 0,5 мм.



1 – проволочные электроды; 2 – диэлектрический барьер; 3 – воздушный зазор
Рисунок 10 – Модель системы высоковольтных электродов генератора озона с проволочными электродами.

В процессе исследований были измерены основные электрические характеристики защитных покрытий. Основные характеристики состава на основе кремнийорганического связующего с наполнителем Al_2O_3 :

$$E_{пр} = 2 \text{ кВ/мм}, \epsilon = 7, \rho_v = 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}, \rho_s = 10^{11} \text{ Ом}, \text{tg}\delta = 10^{-3}.$$

Кроме экспериментов с листовыми материалами, выпускаемыми промышленностью, проводились исследования с твердеющими материалами, имеющими высокие электроизоляционные свойства. Использование таких материалов в качестве диэлектрического барьера даёт возможность изготавливать барьеры малой толщины и достаточно просто ремонтировать пробитые диэлектрические барьеры.

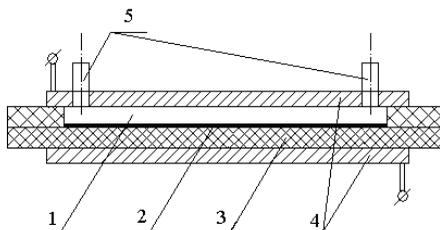
Проведены эксперименты на моделях, где диэлектрическим барьером служил слой лака КО-916 без наполнителя, а также моделях с двухслойными барьерами, состоящими из слоя лака без наполнителя и дополнительного защитного слоя с наполнителем из талька и Al_2O_3 .

Результаты экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – результаты испытаний модели с барьером на основе лака КО-916.

Материал диэлектрического барьера	Ток, мА	Напряжение, кВ	Среднее время работы модели до пробоя
Лак КО-916 без дополнительного слоя	1.5	5	4 часа
Лак КО-916 с дополнительным слоем с наполнителем	1.5	6	более 10 часов

С целью изучения влияния покрытия на выход озона, созданы герметичные модели систем высоковольтных электродов, конструкции которых представлены на рисунке 11.



1 – воздушный зазор; 2 – короностойкий слой; 3 – диэлектрический барьер;
4 – электроды; 5 – штуцера для ввода озонируемого газа и вывода озono – газовой смеси

Рисунок 11 – Конструкция герметичных моделей систем высоковольтных электродов

В первой модели в качестве диэлектрического барьера использовался лак КО-916 без наполнителя, во второй модели использовался барьер с защитным слоем, третья модель «классическая» с барьером из стеклотекстолита. Эксперименты показали, что выход озона во всех конструкциях примерно одинаковый. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2 – результаты испытаний герметичных моделей

Материал диэлектрического барьера	I, mA	U, kV	Выход озона Q, грамм озона в час
Лак КО - 916	1,1	6	2,3
Лак КО-916 с защитным слоем	1,1	6,2	2,1
стеклотекстолит	1,1	6	2,2

По результатам экспериментов проведён дисперсионный анализ, целью которого являлось определение значимости факторов и их взаимодействия в многофакторном эксперименте. Составлены математические модели экспериментов, состоящие из эффектов факторов, входящих в эксперимент, взаимодействий факторов и ошибки. Дисперсионная модель двухфакторного эксперимента имеет вид:

$$y = A + B + AB \pm \varepsilon_{ои}$$

Где A , B – эффекты факторов, AB – эффект взаимодействия факторов, $\varepsilon_{ои}$ – ошибка

Исследовалось влияние наличия короностойкого покрытия и материала барьера на срок службы диэлектрического барьера. Исходные данные (время испытания в минутах), результаты дисперсионного анализа представлены в таблицах 3 и 4.

Исследовалось влияние состава короностойкого покрытия на срок службы диэлектрического барьера. Исходные данные (время испытания в минутах) и результаты дисперсионного анализа представлены в таблицах 5 и 6.

Проведена проверка однородности дисперсий. Гипотеза о воспроизводимости проверялась с помощью критерия Кохрена.

Таблица 3 – время испытаний моделей (мин) с защитным покрытием и без него

Наличие покрытия	Материал диэлектрического барьера					
	текстолит		Стекло текстолит		Лавсановый гетинакс	
Без покрытия	47	$S^2=127.4$ $x=45.5$	50	$S^2=956.6$ $x=66.87$	20	$S^2=3319.6$ $x=93.75$
	39		40		180	
	50		35		40	
	35		120		90	
	65		45		45	
	30		90		95	
	43		60		160	
	55		95		120	
С покрытием	165	$S^2=1962.3$ $x=146.5$	85	$S^2=6785$ $x=183.6$	300	$S^2=5167.4$ $x=205.6$
	172		132		210	
	120		137		180	
	180		280		285	
	100		320		270	
	120		180		150	
	95		120		120	
	220		215		130	

Таблица 4—результаты дисперсионного анализа данных испытаний с защитным покрытием и без него

Источник изменчивости	Общая дисперсия	Число степеней свободы	Средняя дисперсия	F-отношение	F-табличное
Материал барьера	23120,5	2	11260,3	3,7	3,23
Наличие покрытия	144870,2	1	144870,2	47,4	4,08
Взаимодействие факторов	520,1	2	260,1	0,08	3,23
Ошибка ε	128232	42	3053,1		
	168639	47			

Оценка влияния качественных факторов по критерию Фишера доказывает значимость наличия защитного покрытия на увеличение ресурса работы модели генератора озона. Сильное влияние оказывает материал связующего, также применение наполнителя значительно повышает ресурс работы.

Таблица 5—время испытаний моделей в минутах с различным составом покрытия

Связующее	Наполнители									
	Оксид алюминия		Двуокись титана		талк		слода		асбест	
Лак КО	240	$S^2=433.3$ $x=233.3$	140	$S^2=3433$ $x=163.3$	265	$S^2=508$ $x=241.6$	145	$S^2=700$ $x=125$	135	$S^2=658$ $x=128.3$
	210		120		220		95		100	
	250		130		240		135		150	
Лак ПФ115	135	$S^2=408.3$ $x=138.3$	120	$S^2=1233$ $x=123.3$	105	$S^2=1425$ $x=140$	110	$S^2=308$ $x=108.3$	80	$S^2=1908$ $x=101.6$
	120		90		180		125		180	
	160		160		135		90		45	

Таблица 6 – результаты дисперсионного анализа данных экспериментов с различным составом покрытия

Источник изменчивости	Общая дисперсия	Число степеней свободы	Средняя дисперсия	F-отношение	F-табличное
Материал наполнителя	38497,8	4	9624,5	9,4	2,87
Материал связующего	25114,1	1	25114,1	24,6	4,35
Взаимодействие факторов	8499,9	4	2112,5	2,07	2,87
Ошибка ϵ	20339,3	20	1017,0		
	92451,1	29			

Фактор «наполнитель» ранжировали с помощью критерия Дункана. Обработаны данные экспериментов с барьером из стеклотекстолита, и защитным покрытием на основе кремнийорганического связующего с различными наполнителями. Результаты ранжирования по критерию Дункана представлены на рисунке 12.



Рисунок 12 – Результаты ранжирования фактора «наполнитель» по критерию Дункана

Результаты дисперсионного анализа показали, что наличие любого из рассмотренных покрытий существенно повышает ресурс работы диэлектрического барьера и наилучшим наполнителем выделяются тальк и оксид алюминия.

По экспериментальным данным, полученным при форсированных испытаниях, произведена оценка ресурса усовершенствованных моделей при работе в обычном режиме. Для этого были построены и экстраполированы «кривые жизни». Результаты экстраполяции представлены на рисунке 13.

Оценочные расчеты показали, что ресурс усовершенствованных озонаторов существенно повысился и составляет около 10 000 часов.

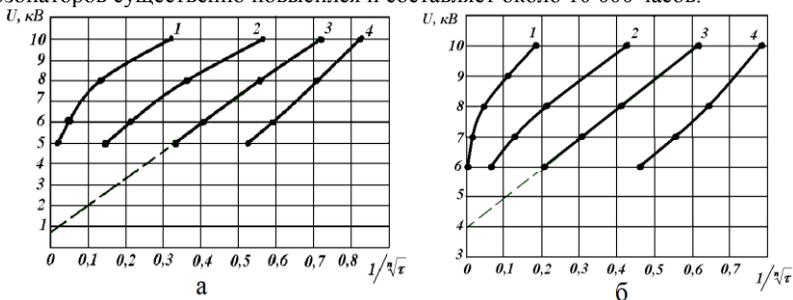


Рисунок 13 – Экстраполяция экспериментальных данных для получения расчетного значения $U_{прз}$ для модели с диэлектрическим барьером без защитного покрытия (а)

и с защитным покрытием (б).

В четвертой главе описано использование результатов исследований при разработке новых систем генерации озона на основе высокоресурсных диэлектрических барьеров. Приведены результаты практического использования разработанных озонаторных комплексов и конструктивные решения.

1. Озонаторная установка с проволочными электродами.

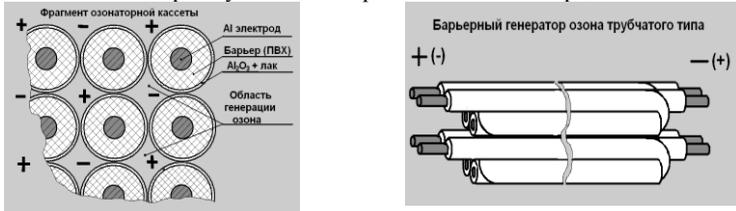


Рисунок 14 – Конструкция системы с проволочными электродами, состоящими из алюминиевых проволок с изоляцией из поливинилхлорида.



Рисунок 15 – Кассета и внешний вид озонаторной установки с проволочными электродами

2. Озонаторная установка с плоскими электродами

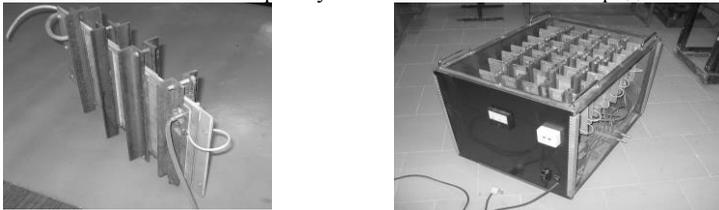


Рисунок 16 – Кассета и внешний вид озонаторной установки с плоскими электродами

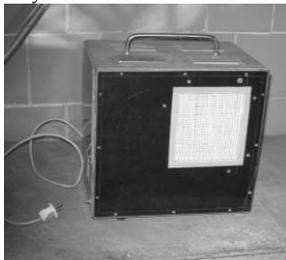


Рисунок 17.–Озонаторная установка открытого типа

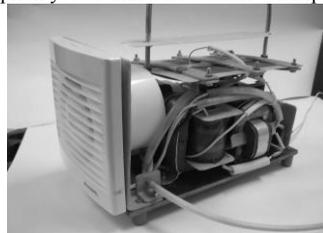


Рисунок 18 – Малогабаритный высокочастотный озонатор

Технические характеристики озонаторных установок

	Озонаторная установка с проволочными электродами	Озонаторная установка с плоскими электродами.	Озонаторная установка открытого типа.	Малогабаритный высокочастотный озонатор.
Производительность озона, г/час	15	100	4	2
Потребляемая мощность, Вт	300	1500	80	40
Напряжение сети, В	220	220	220	220
Ресурс, час	10000	10000	10000	10000
Габариты, мм	500x500x800	730x850x650	400x400x400	180x200x370
Вес, кг	20	120	5	3

Предложенные озонаторные установки по сравнению с известными аналогами обладает преимуществами:

- высокий ресурс работы;
- простота эксплуатации;
- высокая производительность по озону.

С участием автора действующие образцы озонаторных комплексов внедрены на следующих предприятиях:

1. ВЭИ г.Истра Московской области;
2. ООО научно-производственное предприятие «Экология»; что подтверждается актами о внедрении, приведенными в приложении диссертации.

В заключении изложены основные выводы, даны рекомендации по разработке новых озонаторных установок на основе высокоресурсных диэлектрических барьеров.

ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Использование диэлектрических барьеров из доступных и распространенных изоляционных материалов, защищенных короностойким слоем, позволяет повысить ресурс систем генерации озона до 10 000 часов, а также сделать производство озонаторов более технологичным и дешевым.
2. Разработан состав короностойкого покрытия диэлектрического барьера. Лучшие свойства в качестве наполнителя показали оксид алюминия Al_2O_3 и тальк. В качестве связующего целесообразно использовать кремнийорганический лак. Найдено оптимальное соотношение связующего и наполнителя 1:1. На данную разработку получен патент на изобретение Российской Федерации.
3. Предложена методика ускоренных испытаний на ресурс моделей систем высоковольтных электродов генераторов озона.
4. Разработана экспериментальная установка для испытания систем высоковольтных электродов озонаторов.
5. Построенная по экспериментальным данным дисперсионная модель подтверждает значимость влияния как важнейшего фактора короностойкого покрытия на ресурс работы диэлектрического барьера.
6. Разработаны конструктивные решения, изготовлены и внедрены опытные образцы генераторов озона с использованием полученных рекомендаций.

Список опубликованных работ по теме диссертации

В изданиях рекомендованных ВАК

1. Кравченко Г.А. Исследование высокоресурсного диэлектрического барьера для генераторов озона / Г.А. Кравченко // Вестник Чувашского университета. – 2008. -№2, -С. 100-103.
2. Андреев В.В. Результаты исследования структуры барьерного разряда / В.В. Андреев, Л.А. Васильева, Г.А. Кравченко, Ю.П. Пичугин // Нелинейный мир. – 2008. – т.7, №11 – С. 811-819.
3. Кравченко Г.А. Оценка геометрических и температурных параметров микроразрядов в барьерном разряде / Г.А. Кравченко, Ю.П. // Вестник Чувашского университета. – 2011. -№3, -С. 102-106.

Авторские свидетельства

4. Устройство для генерирования озона: патент Рос. Федерация МПК С01В13/11/ Пичугин Ю.П., Кравченко Г.А.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО ЧГУ им. И.Н. Ульянова.-№ 2355627 заявлен 25.09.07; опубликован 20.05.09, бюл № 5
5. Озонаторный комплекс: патент № 122084 Рос. Федерация: МПК С01В 13/11 / Андреев В.В., Кравченко Г.А., Пичугин Ю.П., Телегин Г.Г., Телегин В.Г. заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова», заявлен 04.06.12, опубликован 20.11.12, бюл. №32.

прочие

6. Исследование влияния термостойкого покрытия диэлектрического барьера на работу генераторов озона / Г.А. Кравченко, И.В. Тимофеев, Е.С. Гаврилов // Студент. Наука. Будущее: Сборник трудов региональной 41-й научной студенческой конференции. – Чебоксары, 2007.-С. 307-308.
7. Совершенствование барьера - основной вариант повышения надёжности и ресурса озонаторных установок / Ю.П. Пичугин, Г.А. Кравченко // Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии: сборник трудов 30-ого Всероссийского научно-практического семинара. – М. МГУ, 2008. – С. 223-227.
8. Разработка высокоресурсного диэлектрического барьера для генератора озона / Ю.П. Пичугин, Г.А. Кравченко // Тинчуринские чтения: материалы докладов III молодежной международной научной конференции. – Казань, 2008. – С. 57-58.
9. Создание и исследование диэлектрических барьеров с защитным покрытием / Ю.П. Пичугин, Г.А. Кравченко // Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты: сборник трудов XII Международной конференции. Труды МКЭЭЭ. – Крым, Алушта, 2008, - С. 103.
10. Совершенствование генераторов озона для агропромышленного комплекса / Ю.П. Пичугин, Г.А. Кравченко, А.Н. Матюнин // Наука в развитии села: материалы республиканской научно-практической конференции. Чув. ГСХА – Чебоксары, 2009. - С. 231-237.

11. Использование двух-трёхслойного барьера в генераторах озона для технологических и экологических целей / Ю.П. Пичугин, Г.А. Кравченко // Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках: сборник материалов XXI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. – Казань, 2009. – с. 179-180.
12. Эффективность защитного покрытия в барьерных озонаторах / Г.А. Кравченко // Сборник научных трудов молодых ученых и специалистов. - Чебоксары, 2009. – С. 48-52.
13. Разработка и исследование озонаторных установок с повышенным ресурсом работы / Ю.П. Пичугин, Г.А. Кравченко // Электрическая изоляция 2010: сборник научных трудов пятой Международной научно-технической конференции. – СПб. – 2010.- С. 86-91.

Подписано в печать 15.11.2013.
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Объем 1,0 п.л.
Тираж 100 экз. Заказ №801

Отпечатано в типографии Чувашского госуниверситета.
428015, Чебоксары, Московский просп., 15