

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Казанский государственный энергетический университет»

*На правах рукописи*

**Сандаков Виталий Дмитриевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА  
ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ ПРИМЕСЕЙ В ЗАМКНУТЫХ  
ПОМЕЩЕНИЯХ ИМПУЛЬСНОЙ СТРИМЕРНОЙ КОРОНОЙ**

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Валеев Ильгиз Миргалимович

Казань – 2018

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ ПРИМЕСЕЙ В ЗАМКНУТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ.....	11
1.1 Математическое моделирование концентраций загрязняющих веществ в замкнутых помещениях.....	11
1.2 Оценка современных электрофизических способов и технологий очистки атмосферного воздуха от примесей.....	14
1.3 Способы повышения эффективности процесса очистки воздуха от примесей импульсной стримерной короной.....	18
1.4 Выводы к главе 1.....	19
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ И МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И РАЗРЯДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	21
2.1 Исследование распределения электрических полей в устройствах очистки газовых сред.....	21
2.1.1 Расчет максимальной напряженности для различных типов электродов.....	23
2.1.2 Расчет зависимости разрядного напряжения от величины межэлектродного пространства.....	28
2.1.3 Расчет зависимости напряженности появления короны от радиуса кривизны электродов.....	34
2.2 Исследование влияния материалов электродов на процесс наработки химически активных частиц в межэлектродном пространстве.....	40
2.2.1 Анализ разрядных характеристик в зависимости от материалов электродов.....	42

2.2.2 Влияние монокристалла никеля на процесс наработки химически активных частиц.....	52
2.3 Выводы к главе 2.....	55
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПРОЦЕССА КОНВЕРСИИ ГАЗОВЫХ СРЕД.....	56
3.1 Разработка импульсного периодического источника тока.....	56
3.2 Определение оптимальных энергетических параметров источника периодического импульсного тока для повышения эффективности процесса наработки химически активных частиц режимами стримерной короны.....	64
3.3 Особенности влияния температуры и давления на процесс наработки химически активных частиц.....	71
3.4 Разработка физической модели реакционной камеры устройства очистки газовых сред.....	77
3.5 Выводы к главе 3.....	84
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ИМПУЛЬСНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ УСТРОЙСТВАХ ДЛЯ КОНВЕРСИИ CO <sub>2</sub> В ЗАМКНУТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ.....	86
4.1 Разработка лабораторной установки конверсии газовых сред.....	86
4.2 Экспериментальное исследование по оптимизации энергетических характеристик в импульсных газоразрядных устройствах для конверсии CO <sub>2</sub> в поле стримерной короны.....	93
4.3 Выводы к главе 4.....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	100
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	102
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Требования к основным характеристикам газоанализатора CO <sub>2</sub> .....	112

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Вольт-амперные характеристики импульсной стримерной короны для различных скоростей воздушного потока.....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Акты внедрения результатов диссертационной работы.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Патент на полезную модель устройства очистки газовых сред.....	120

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность работы**

Состав воздуха замкнутых помещений может содержать такие примеси, как табачный дым, летучие органические соединения, оксиды углерода и азота и т.п. Концентрация перечисленных веществ связана с количеством и длительностью нахождения источников загрязнения в исследуемом замкнутом помещении. Продолжительное нахождение источников загрязнения в помещении гарантированно приводит к превышению предельно допустимых концентраций вредных примесей. Следовательно, решение проблемы совершенствования технологий и устройств для очистки воздуха от вредных примесей остается актуальным и жизненно необходимым.

Анализ работ отечественных и зарубежных ученых, таких как Е. Силкина, А.Ф. Дьякова, А.З. Понизовского, Е.А. Филимоновой, Ю.П. Пичугина, М.Б. Железняк, Р.Н. Swart, Р. Sunka, V. Babisky и др., посвященных технологическим процессам конверсии вредных оксидов атмосферного воздуха показал, что наиболее перспективными являются электрофизические способы, а именно процессы с использованием определенных параметров и режимов электрического поля стримерной короны, определяющие возможности совершенствования установок и интенсификации технологического процесса.

Однако, в указанных методах есть ряд существенных недостатков, таких как размеры источников высокого напряжения, сложность конструкций и управления технологическими процессами и высокие энергозатраты.

Перечисленные обстоятельства определили необходимость совершенствования технологий и устройств очистки экологически вредных веществ, и обозначили научную и практическую ценность исследования.

**Цель работы** – совершенствование и интенсификация процесса конверсии вредных оксидов воздушной среды замкнутых помещений импульсной стримерной короной.

**Для достижения этой цели в работе поставлены следующие задачи:**

1. Определение и обоснование методов повышения эффективности технологического процесса наработки химически активных частиц режимами импульсно-периодического стримерного разряда.

2. Разработка физической модели реакционной камеры с системой регулируемых электродов и использованием монокристаллических материалов, позволяющей интенсифицировать процесс очистки воздуха от примесей в замкнутых помещениях.

3. Разработка экспериментального образца высоковольтного генератора периодических асимметричных импульсов, позволяющего регулировать электрические параметры в широком диапазоне.

4. Разработка рекомендаций для проектирования установки очистки атмосферного воздуха в зависимости от объема помещения и количества источников загрязнения в нем, с определением оптимальных параметров высоковольтного импульсного генератора.

**Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:**

1. Определены и обоснованы методы повышения эффективности технологического процесса наработки химически активных частиц режимами импульсно-периодического стримерного разряда.

2. Разработан высоковольтный источник периодических асимметричных импульсов с регулируемой частотой – 5-500 кГц, с задержкой между двумя микроразрядами  $< 0,06$  мкс, что меньше времени распада радикалов (10-100 мкс), диапазоном амплитуд импульсных напряжений ( $U^+$ ,  $U^-$ ) – 5-12 кВ и отношением длительностей положительного и отрицательного импульса  $\tau^+/\tau^- \sim 2-5$ .

3. Разработана физическая модель реакционной камеры с системой регулируемых электродов и использованием монокристаллических материалов, позволяющая интенсифицировать процесс очистки воздуха от примесей в замкнутых помещениях.

4. Разработаны рекомендации для проектирования установки очистки атмосферного воздуха в зависимости от объема помещения и плотности размещения в нем людей, с определением оптимальных параметров высоковольтного импульсного генератора.

**Теоретическая значимость работы** заключается в определении оптимальных параметров образования стримерной короны для очистки воздуха от примесей в зависимости от объема помещения и количества источников загрязнения в нем, решении задачи понижения температуры в реакционной камере, анализа воздействия на процесс очистки использования монокристаллических материалов.

**Практическая значимость работы:**

1. Показано влияние энергетических параметров электродной системы, температуры и давления в реакционной камере на эффективность процесса очистки воздуха от примесей.

2. Структура монокристалла никеля с плоскостью среза (111), использованного в качестве электрода, позволяет интенсифицировать процесс конверсии газового состава окружающего воздуха.

3. Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы для регулирования выходных параметров устройств очистки атмосферного воздуха от примесей в зависимости от объема помещения и плотности размещения в нем людей.

4. Разработанный экспериментальный образец установки очистки воздуха от примесей в замкнутых помещениях с возможностью регулирования выходных параметров в зависимости от объема помещения и количества источников загрязнения в нем может использоваться в учебном

процессе по дисциплине «Электротехнологические процессы и аппараты высокого напряжения».

**Объектом исследования** является устройство очистки воздуха от примесей в замкнутых помещениях импульсной стримерной короной.

**Предметом исследования** являются усовершенствованные электротехнологические процессы очистки воздуха от примесей, основанные на применении определенных параметров и режимов электрического поля стримерной короны.

**Методы исследования** – методы математического и имитационного моделирования с применением современных компьютерных технологий. Электронно-микроскопические и металлографические исследования монокристалла проведены в Центре коллективного пользования «Прикладные нанотехнологии» (ЦКП ПНТ) при КНИТУ имени А.Н.Туполева. При теоретическом рассмотрении задачи понижения температуры в реакционной камере использовался эффект Джоуля-Томпсона. Для моделирования распределения электрического поля использовался программный пакет Comsol Multiphysics.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель электрофизических процессов в реакционной камере, обеспечивающей увеличение наработки радикалов и химически активных частиц в зоне стримерной короны.

2. Результаты исследования влияния структуры и геометрии электродной системы на параметры плазмы каналов стримерной зоны и электрического поля.

3. Результаты экспериментальных исследований эффективности очистки воздуха от примесей  $\text{CO}_2$  при использовании усовершенствованного устройства очистки в зависимости от объема помещения и количества источников загрязнения в нем.

**Достоверность результатов**, полученных в диссертационной работе, подтверждается качественным и количественным соответствием

теоретических и экспериментальных результатов, а также наличием патентов на конструкционные особенности реакционной камеры и режимов технологического процесса очистки. Степень достоверности результатов достаточно подтверждена применением строгих математических методов, обоснованных допущений, тестовых расчетов, а также совпадением полученных результатов с известными.

### **Апробация работы**

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. Всероссийских аспирантско-магистерских семинарах, посвященных дню энергетика (г. Казань, 2012-2016 гг.),
2. VIII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2013 г.),
3. XIII Международной научно-технической конференции «Современные проблемы экологии» (г. Тула, 2015 г.),
4. X Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2015 г.),
5. XI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016» (г. Иваново, 2016 г.),
6. XI Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2016 г.),
7. VII Международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2016» (г. Казань, 2016 г.).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, 4 из них в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, получен 1 патент РФ на полезную модель.

### **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 96 наименований и 4 приложений. Работа изложена на 121 странице машинописного текста, включая 81 рисунок и 5 таблиц.

# ГЛАВА 1 ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ ПРИМЕСЕЙ В ЗАМКНУТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

## 1.1 Математическое моделирование концентраций загрязняющих веществ в замкнутых помещениях

На качество воздушной среды помещений влияет множество факторов таких, как качество наружной воздушной среды; мощности, расположения и количества наличия источников загрязнений в помещении; системы вентиляции, ее надежности и эксплуатации; кратности воздухообмена и т.д. [1-8].

Воздухообмен является гигиеническим показателем качества системы вентиляции замкнутых помещений. Он выражается объемом воздуха, подаваемым в помещение или удаляемым из него, за единицу времени (как правило, в кубических метрах за 1 ч). Интенсивность воздухообмена определяется его кратностью или отношением объема подаваемого в помещение или удаляемого из него воздуха за 1 ч к объему помещения [9, 10].

Воздушная среда замкнутых помещений не должна содержать загрязняющие вещества в концентрациях, превышающих предельно допустимые концентрации. К таким загрязняющим веществам можно отнести различного рода газы, а также пары, микроорганизмы, табачный дым и ряд аэрозолей. В роли источников загрязнений могут выступать люди, технологические процессы, мебель, строительные и декоративные материалы, также загрязнения в помещения попадают с приточным воздухом из вне, но одним из основных загрязнителем является повышенная концентрация углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ). Например, при концентрациях 800-1200 ppm возникает усталость, сонливость и снижение внимания, а при концентрациях выше 1200 ppm – полная потеря работоспособности. Углекислый газ может превысить допустимую норму при большом

количестве людей в закрытом помещении, что часто происходит в конференц-залах, спортзалах, офисах, аудиторных помещениях и т.д.

Состав вдыхаемого и выдыхаемого воздуха в нормальных условиях здорового человека представлен в таблице 1.1. Представленные данные меняются в зависимости от различных условий, таких как подвижность, психологическое состояние и т.д. Однако, объединяющим фактором любых состояний является большее содержание  $\text{CO}_2$  в выдыхаемом воздухе. Также источником  $\text{CO}_2$  являются крупные производственные комплексы и объекты энергетики, вследствие чего, в крупных городах, а заодно и в помещениях изначально присутствует концентрация  $\text{CO}_2$  порядка 400-500 ppm.

Таблица 1.1 – Состав вдыхаемого и выдыхаемого в нормальных условиях здорового человека воздуха

	Кислород	Углекислый газ	Азот и другие газы
Вдыхаемый воздух	20,94	0,03	79,03
Выдыхаемый воздух	16,3	4,4	79,7

Моделирование концентраций загрязняющих веществ в помещении основано на уравнении материального баланса (уравнение Селиверстова) [11]:

$$C = \frac{M_{\text{вр}}}{L_{\text{пр}}} + C_{\text{пр}} - \left( \frac{M_{\text{вр}}}{L_{\text{пр}}} + C_{\text{пр}} - C_0 \right) e^{-\tau \frac{L_{\text{пр}}}{V_{\text{пом}}}}, \quad (1.1)$$

где  $L_{\text{пр}}$  – величина воздухообмена;  $M_{\text{вр}}$  – количество выделяющихся вредностей;  $C$  – концентрация вредных примесей в помещении в момент времени  $\tau$ ;  $C_{\text{пр}}$  – концентрация вредных примесей в приточном воздухе;  $C_0$  –

начальная концентрация вредных примесей в помещении;  $V_{\text{пом}}$  – объем помещения.

Приведенное уравнение Селиверстова к виду, учитывающему вместо величины воздухообмена его кратность:

$$C = \frac{C_{\text{уд}}}{V_{\text{уд}} \cdot k} [1 - e^{-k}] + C_{\text{пр}}, \quad (1.2)$$

где  $k$  – кратность воздухообмена;  $C_{\text{уд}}$  – концентрация  $\text{CO}_2$  выделяемая одним человеком в час;  $V_{\text{уд}}$  – удельный объем на одного человека.

По данным ГОСТ 30494-96, предлагается принимать концентрацию  $\text{CO}_2$  в атмосферном воздухе 300-500 ppm, при расчете нами принято, что начальная концентрация  $\text{CO}_2$  равна 400 ppm.

Рассчитав зависимость концентрации  $\text{CO}_2$  от удельного объема помещения, получаем графики для различных кратностей воздухообмена (рисунок 1.1), как видно, концентрация углекислого газа при реальных условиях очень часто превышает допустимый уровень в 600 ppm.

Проведенные исследования в конференц-залах, лекционных аудиториях, офисных кабинетах и в машинах (во время длительных поездок) подтвердили, что в невентилируемых или недостаточно вентилируемых помещениях воздушная среда ухудшается в зависимости от количества источников загрязнения, таких как человек, и времени их пребывания.

Также проведенные исследования показали, что на воздушную среду помещений влияет состав наружного воздуха, так в городах, вблизи промышленных источников загрязнения концентрация  $\text{CO}_2$  выше, чем в пределах городской черты при отсутствии крупных промышленных объектов, а за пределами города концентрации вредных веществ еще ниже.

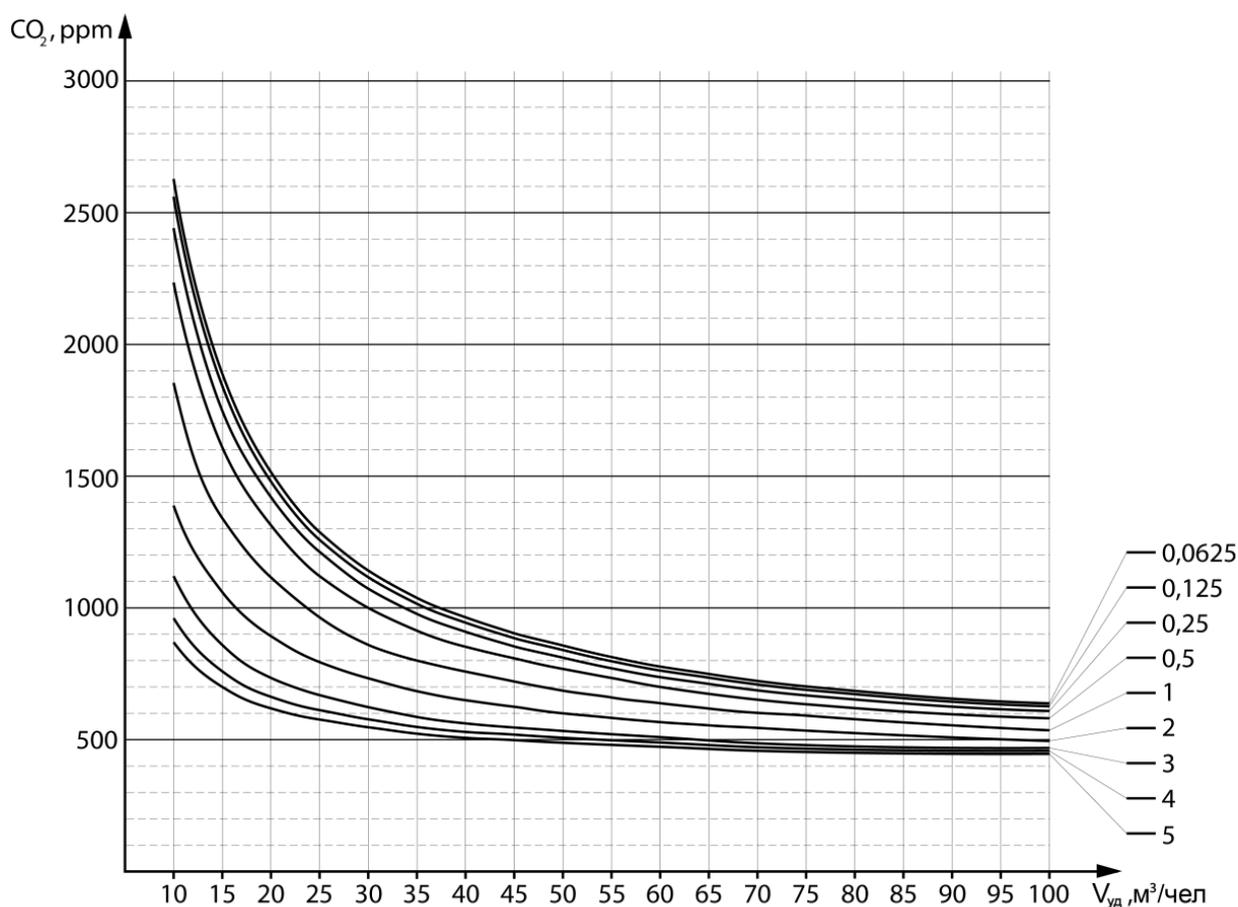


Рисунок 1.1 – Зависимость концентрации CO<sub>2</sub> от удельного объема помещения для различных кратностей воздухообмена

## 1.2 Оценка современных электрофизических способов и технологий очистки атмосферного воздуха от примесей

Электрофизические способы очистки газовых сред от примесей можно разделить на две основные группы:

1. Методы с использованием электронных пучков
2. Электроразрядные методы

Методы очистки газовой среды электронными пучками заключаются в активации химических реакций за счет воздействия на вещество

электронными пучками. Данные методы обеспечивают взаимодействие  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  с аммиаком в реакциях при отсутствии катализатора. Топочные газы отделяются от взвешенных частиц, после происходит их взаимодействие с аммиаком. Полученная смесь облучается в реакторе электронными пучками. В результате экологически вредные оксиды вместе с аммиаком преобразуются в форму сухого порошка неорганических солей:  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  и  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{NH}_4\text{NO}_3$  [12-17].

В основе этого процесса лежит создание плазмы, в которой нарабатывается большое количество химически активных частиц и свободных радикалов, вступающие в плазмохимические реакции, приводящие к конверсии экологически вредных веществ. Источником Электронные пучки образуются в вакуумных трубках. Ускорители такого типа имеют разделительную фольгу между вакуумным и газовым составами, которая имеет относительно малый ресурс работы. Поэтому промышленное применение для очистки газовых сред электронных ускорителей отсутствует [18-25].

Данные методы очистки можно разделить на две основных группы:

- 1) *использование непрерывных пучков;*
- 2) *использование импульсных пучков.*

При облучении дымовых газов непрерывными электронными пучками под действием электронов пучка в увлажненном дымовом газе образуются свободные радикалы  $\text{O}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{O}_2\text{H}$  и др., которые приводят к окислению  $\text{SO}_2$  до  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . В условиях действующих электростанций проводились эксперименты с применением непрерывных электронных пучков с плотностью тока  $10^{-9}$ - $10^{-5}$   $\text{A}/\text{cm}^2$ . Было показано, что этот способ очистки позволяет снизить концентрацию  $\text{SO}_2$  более чем на 95%. Применение электронно-пучкового метода очистки дымовых газов ограничивается высоким уровнем потребляемой мощности, необходимой для его реализации. Причиной этого являются значительные затраты энергии  $E$  на удаление одной токсичной молекулы  $\text{SO}_2$ , которые составляют 10-20 эВ/мол [26-30].

Эффективность обработки газовой среды электронными пучками можно повысить при условии облучения газа в несколько этапов при наличии временных и пространственных интервалов [31-35]. Однако для применения «многоэтапного эффекта» необходимо использовать несколько генераторов постоянного тока, а также потребуется физическое исключение электронных пучков. «Многоэтапный эффект» имеет ряд недостатков таких, как потери пучка, большой объем необходимый для оборудования, что приводит к дивергенции электронных пучков, поступающих в конверсируемую газовую среду, а также, необходимость использования большого количества генераторов электронного пучка постоянного тока [36-39].

В настоящее время известны устройства очистки газовых сред, содержащие кольцевую многоэлектродную разрядную систему, использующую генераторы высоковольтных периодических импульсов. Они работают за счет плазмохимического и газодинамического воздействия на газовые среды [40-43]. Также известны методы плазмохимического воздействия на газы с помощью микроволнового плазмотрона (RU 83682 U1, 27.03.2009; RU 80450 U1, 03.10.2008; RU 8044903 U1, 03.10.2008). Существует способ очистки газовой среды от оксидов, заключающийся в прохождении потока очищаемого газа через низкотемпературную плазму, образуемую в электрическом барьерном разряде, с последующей очисткой сорбентом-катализатором. Катализатор основан на металле, нанесенном на сорбент. В качестве сорбента выступает гамма-окись алюминия. В качестве металлов – индий, галлий или олово при рабочих температурах катализаторов 350-550 °С [44-49].

Недостатками перечисленных способов являются высокие материальные и энергетические затраты, необходимость применения дорогостоящих высокотемпературных катализаторов, а также сложность технологического процесса их производства.

Электроразрядные методы очистки заключаются в том, что в момент развития стримерных каналов в резконеоднородном поле в головках стримеров напряженность электрического поля достигает порядка 150 кВ/см, а электроны приобретают энергии порядка 5-15 эВ. Такой энергии хватает для процессов ионизации, диссоциации и возбуждения молекул газовой среды, и, как следствие, для образования активных химических частиц и радикалов, таких как  $O_3$ ,  $OH^-$ ,  $O$ ,  $H_2O_2$  и др. Полученные активные химические частицы и радикалы, взаимодействуют с оксидами и другими примесями (окисляют, разлагают или происходит конверсия газов) [50].

Методы образования радикалов и химически активных частиц, например, таких как  $O_3$ , были рассмотрены в работах зарубежных и отечественных ученых, таких как Е. Силкин, А.З. Позинковский, Е.А. Филимонова, Ю.П. Пичугин, М.Б. Железняк, Ю.М. Емельянов, Ю.В. Филиппов, R. Brandenburg, H. Wagner и др. [51-56].

Импульсный коронный разряд имеет значительные плотности и энергии электронов, которые способны создать в газоразрядном промежутке высокую концентрацию химически активных частиц и радикалов ( $O$ ,  $O_3$ ,  $OH^-$ ,  $H_2O_2$  и др.) [57].

Достоинством способа очистки импульсным коронным разрядом являются технологичность, способность селективного или одновременного удаления целого ряда вредных примесей из газовой среды, относительно малые энергозатраты, а также стоимость.

Известно, что концентрация полученного озона зависит от размера помещения, от относительной влажности и температуры воздуха. Озон остается безопасным для здоровья людей, если его содержание не превышает 500-2500 ppm [58].

### 1.3 Способы повышения эффективности процесса очистки воздуха от примесей импульсной стримерной короной

Наработка активных химических частиц и радикалов, таких как  $O_3$ ,  $OH\cdot$ ,  $O$ ,  $H_2O_2$  и т.д. является достаточно энергоемким процессом [58]. Главной задачей производства озона ( $O_3$ ) является снижение энергетических затрат на его образование.

Наиболее экономически выгодными со стороны энергозатрат для получения озона являются коронный и барьерный разряды. Используя технологический процесс электросинтеза озона в коронном разряде, сложно получить высокие концентрации озона из-за относительно малого объема зоны ионизации. Данный вопрос можно решить с помощью изменения конфигурации системы электродов.

Одной из основных проблем реакционных камер озонаторов является их быстрый выход из строя из-за того, что электрофизические и химические процессы приводят к интенсивному износу элементов реакционной камеры. [59].

Как известно [60-62], химически активные частицы эффективно вырабатываются при импульсном напряжении с напряженностью электрического поля выше 100 кВ/см в межэлектродном пространстве, при ограниченной длительности импульса с коротким фронтом и недопущении перехода стримерного разряда в искровой. Описанные условия можно получить, если импульс напряжения имеет прямоугольную форму, так как при использовании других различных форм импульсов происходит увеличение потребления энергии от источника и уменьшения числа стримерных каналов. Источник импульсного тока должен быть малогабаритным, экономически оправданным и технологически простым.

В электрическом разряде значительная часть электрической энергии преобразуется в тепловую энергию, нагревая очищаемый газ, что приводит к

снижению выработки радикалов и химически активных частиц за счет их распада при повышенной температуре [63].

Существуют и широко применяются устройства с принудительными водяными и воздушными способами охлаждения озонаторов. Такой подход позволяет увеличить их производительность, но при этом усложняется конструкция, технологический процесс, а также капитальные и энергетические затраты.

Из выше описанного следует, что для повышения эффективности наработки химически активных частиц и радикалов, таких как  $O_3$ , необходимо использовать следующие способы:

1. Подобрать наиболее подходящую конфигурацию системы электродов с максимально неоднородным электрическим полем и максимально большой зоной ионизации;

2. Выбрать наиболее стойкие к агрессивной окислительной среде материалы системы электродов с сохранением высоких электрофизических параметров;

3. Подобрать форму импульсного напряжения, близкую к прямоугольной, с коротким фронтом, ограниченной длительностью импульса и недопускающую перехода стримерного разряда в искровой;

4. Найти эффективный способ понижения температуры в рабочей зоне озонатора для повышения выработки радикалов и химически активных частиц.

#### 1.4 Выводы к главе 1

1. Воздушная среда замкнутых неветилируемых или плохо вентилируемых помещений, ухудшается в зависимости от количества источников загрязнения, таких как человек, и времени их воздействия на среду, и концентрация углекислого газа при реальных условиях очень часто превышает допустимый уровень в 600 ppm.

2. Определены и обоснованы методы повышения эффективности технологического процесса конверсии вредных оксидов режимами импульсно-периодического стримерного разряда.

## ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ И МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И РАЗРЯДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

### 2.1 Исследование распределения электрических полей в устройствах очистки газовых сред

Как известно [64-67], в газообразных диэлектриках присутствует некоторое количество свободных электронов и ионов, перемещающиеся под воздействием электрического поля к аноду. Главную роль при разряде, на начальной стадии, необходимо отвести электронам, так как они обладают на порядок большей подвижностью в сравнении с ионами. При ударе с молекулой электрона, часть его энергии переходит к молекуле, после чего возникает вероятность двух различных событий, которые с упрощениями можно описать следующим образом:

1. Молекула, ионизируясь, испускает электрон, таким образом, получаются два электрона, которые ионизируют две следующие молекулы с образованием четырех свободных электронов, ионизирующих следующие молекулы и т.д., в результате этого процесса (ударной ионизации) возникает электронная лавина;

2. Молекула переходя в возбужденное состояние, выделяет избыточную энергию в виде излучения фотона, который способен ионизировать следующую молекулу, таким образом, возникает фотонная ионизация, которая приводит к появлению канала с стримера с повышенной проводимостью.

Фотоны, опережая электронные лавины и сталкиваясь с нейтральными молекулами, двигаются со скоростью света равной  $3 \cdot 10^8$  м/с, ионизируют молекулы, создавая новые электронные дочерние лавины.

Обе приведенные выше лавины растут, двигаются к аноду, догоняя друг друга, сливаясь и образуя стример, называемый электроотрицательным,

или цепочку из электронных лавин, которые сливаются в одно целое. Также в обратном направлении возникает поток ионов, который образует электроположительный стример.

Пробивное напряжение газовых промежутков существенно снижается в резко неоднородных полях. Поэтому для создания импульсной стримерной короны в реакционной камере необходимо резко неоднородное электрическое поле.

Существует множество пар различных электродов: шар – шар, шар – игла, шар – плоскость, плоскость – плоскость, коаксиальная труба – провод и т.д. [68].

Среди разнообразных форм электродов особое место в технике высоких напряжений занимают пары электродов игла – игла и игла – плоскость. Электрическое поле этих электродов обладает наибольшей степенью неоднородности, вследствие чего они широко используются для изучения разряда в резко неоднородных полях. Картина электрического поля промежутков игла – игла и игла – плоскость дана на рисунке 2.1.

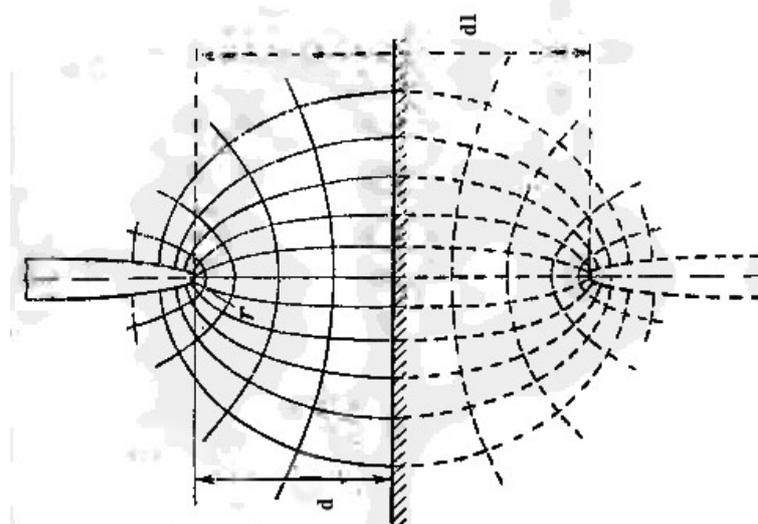


Рисунок 2.1 – Электрическое поле для промежутков игла – плоскость и игла – игла (поле для промежутка игла – игла построено пунктирными линиями) [69]

### 2.1.1 Расчет максимальной напряженности для различных типов электродов

Для выбора электродной системы «игла – игла» или «игла – плоскость» произведем расчет по методике Долгинова [70].

1. Максимальная напряженность для электродов «игла – игла» (иг-иг) в зависимости от полученного разрядного напряжения определяется по формуле:

$$E_m = 2 \frac{U \frac{1}{r}}{\ln\left(2 \frac{s}{r}\right)}, \quad (2.1)$$

где  $U$  – разрядное напряжение,  $s$  – промежуток, соответствующий разрядному напряжению,  $r$  – радиус кривизны иглы ( $r = 25$  мкм).

2. Максимальная напряженность для электродов «игла – плоскость» (иг-пл) в зависимости от полученного разрядного напряжения определяется по формуле:

$$E_m = 4 \frac{U \frac{1}{r}}{\ln\left(4 \frac{s}{r}\right)}. \quad (2.2)$$

Определим максимальные напряженности (таблица 2.1) по формулам (2.1, 2.2) и построим графики зависимостей  $f_2 = E_m(U)$  для электродов типа «игла – игла» и  $f_3 = E_m(U)$  для электродов типа «игла – плоскость» (рисунок 2.2).

Также нами был проведен расчет в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics зависимости электрического поля от типа электродной системы «игла – игла» (рисунки 2.3, 2.4, 2.5) и «игла – плоскость» (рисунки 2.6, 2.7, 2.8) при расстоянии – 1 см, напряжении – 10 кВ на верхней игле, на нижней игле и на плоскости – земля, толщина иглы – 2 мм, радиус кривизны на игле – 1 мм.

Таблица 2.1 – Максимальные напряженности и разрядное напряжение при изменении расстояния между электродами для систем «игла – игла» (иг-иг) и «игла – плоскость» (иг-пл)

№ п/п	s	U <sub>p</sub> , В	E <sub>m</sub> для иг-иг, В/см	E <sub>m</sub> для иг-пл, В/см
1	3	56120	141300	231900
2	4	72030	166300	277100
3	5	87500	189800	319500
4	6	102600	212100	359800
5	7	117500	233500	398500
6	8	132200	254200	435800
7	9	146600	274300	472100
8	10	160900	293800	507400
9	11	175100	312800	541800
10	12	189100	331500	575500
11	13	203000	349700	608600
12	14	216800	367600	641100
13	15	230600	385300	673100
14	16	244200	402600	704600
15	17	257700	419700	735600
16	18	271200	436500	766200
17	19	284600	453200	796500
18	20	297900	469600	826300

Анализ полученных результатов показал, что при использовании системы электродов «игла – плоскость» получаем наибольшую напряженность электрического поля при одинаковом расстоянии между электродами и одинаковом радиусе кривизны электродов «игла», чем при

использовании электродной системы «игла – игла». Поэтому далее рассматривается электродная система «игла – плоскость».

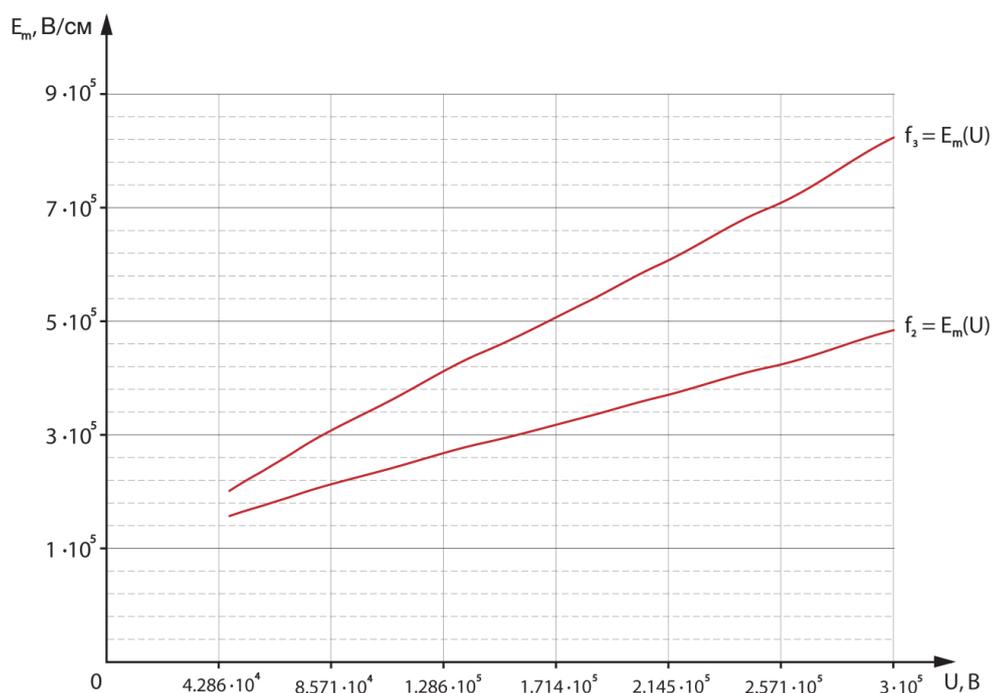


Рисунок 2.2 – Зависимости  $f_2 = E_m(U)$  для электродов типа игла – игла и  $f_3 = E_m(U)$  для электродов типа игла – плоскость

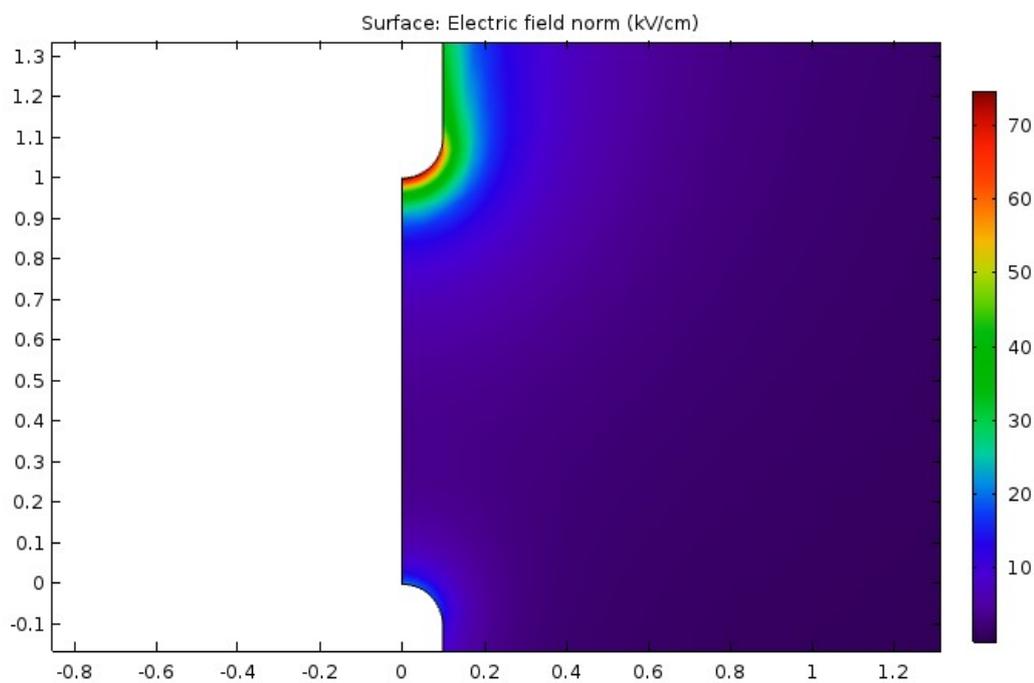


Рисунок 2.3 – Распределение электрического поля для электродной системы «игла – игла» в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

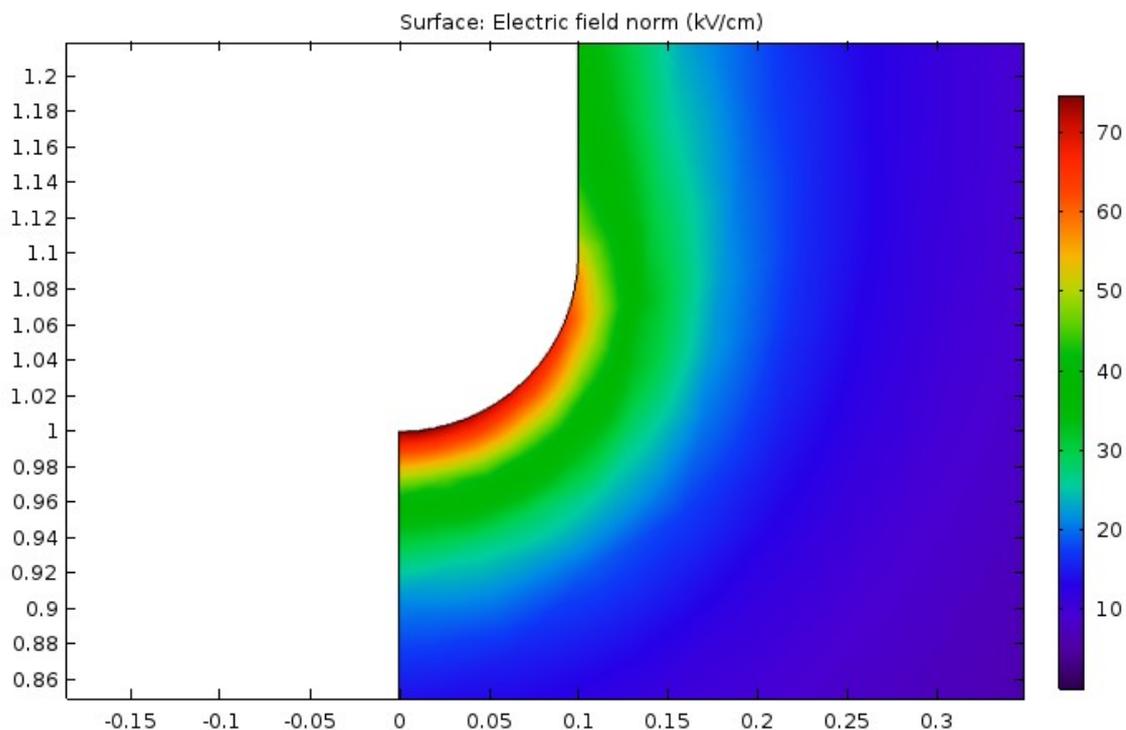


Рисунок 2.4 – Распределение электрического поля для электродной системы «игла – игла» в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

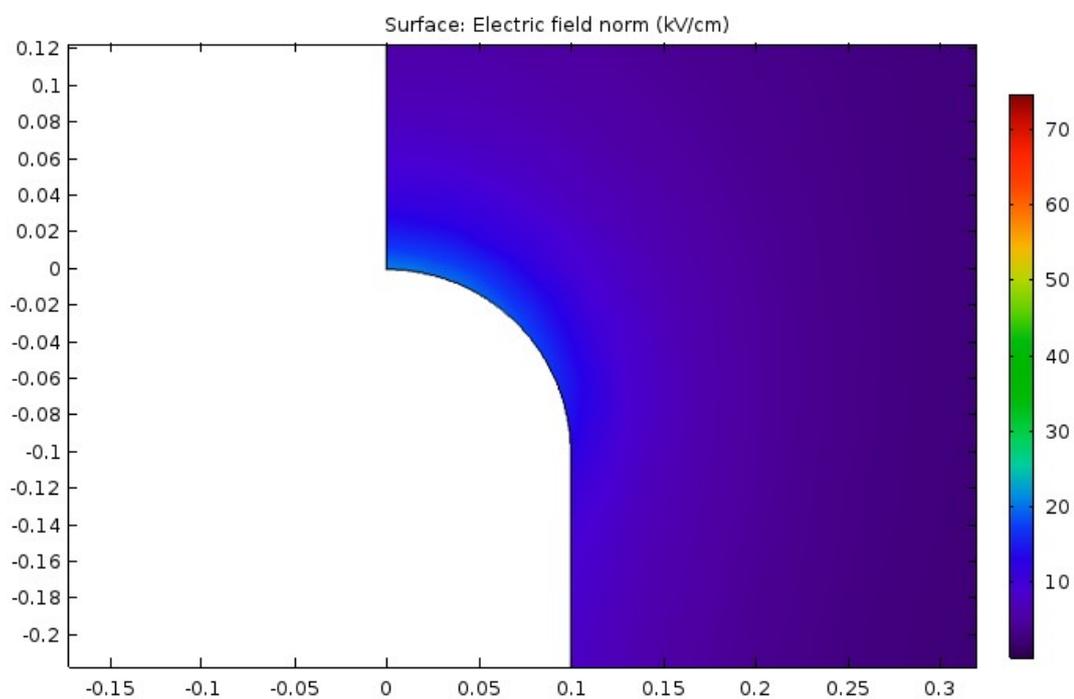


Рисунок 2.5 – Распределение электрического поля для электродной системы «игла – игла» в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

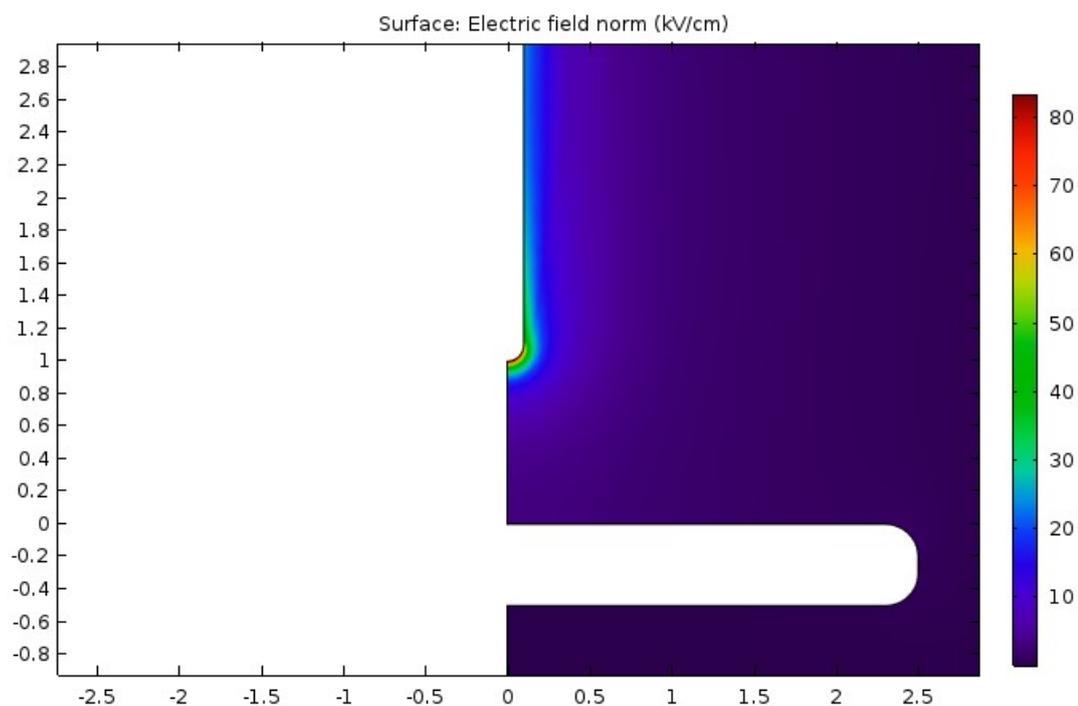


Рисунок 2.6 – Распределение электрического поля для электродной системы «игла – плоскость» в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

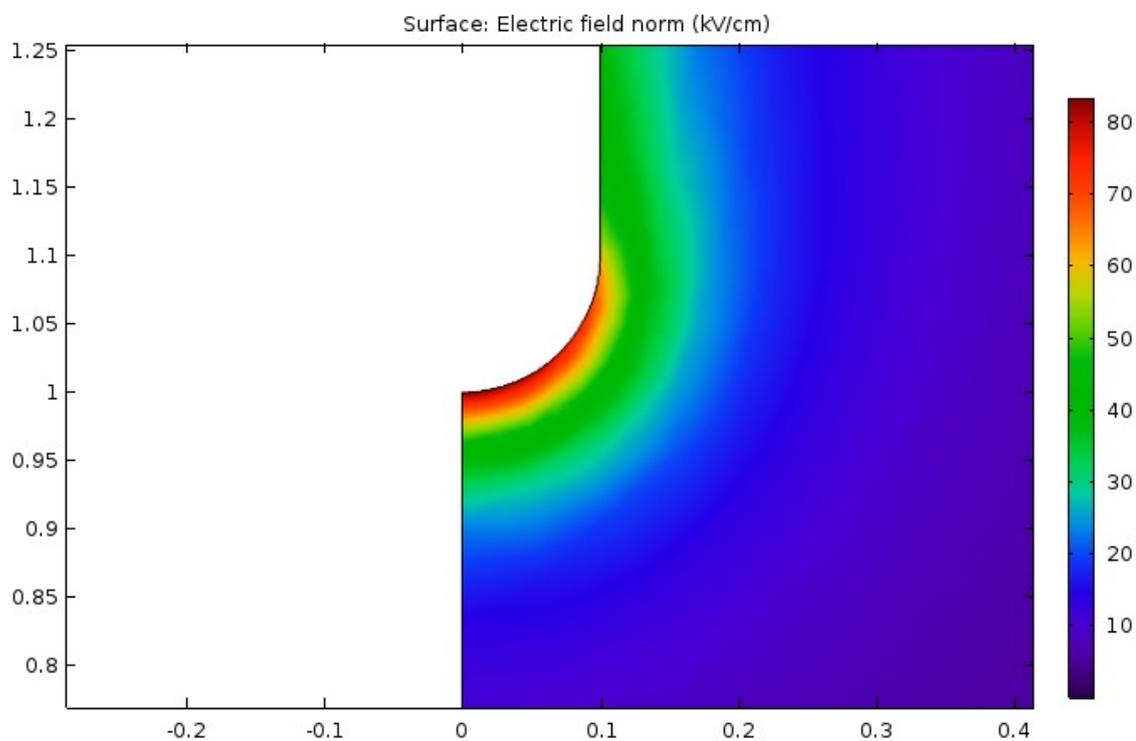


Рисунок 2.7 – Распределение электрического поля для электродной системы «игла – плоскость» в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

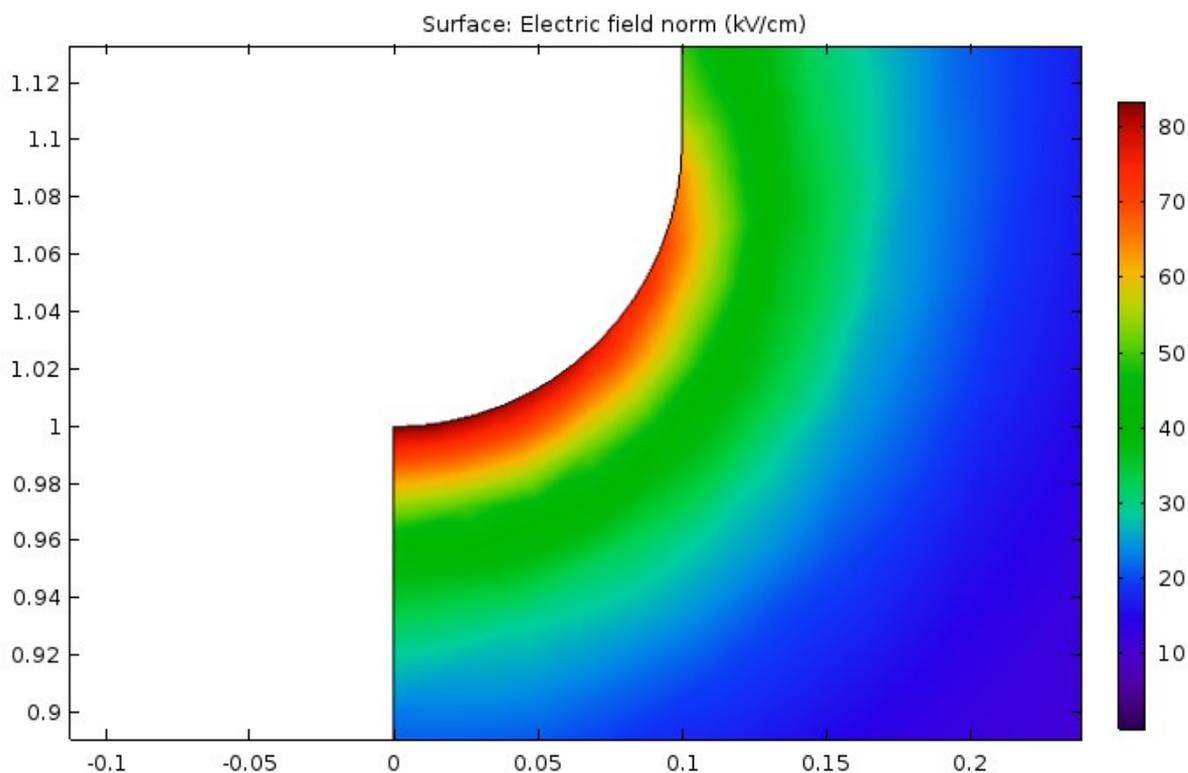


Рисунок 2.8 – Распределение электрического поля для электродной системы «игла – плоскость» в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

### 2.1.2 Расчет зависимости разрядного напряжения от величины межэлектродного пространства

Для выбора расстояния между электродами рассчитаем разрядное напряжение в зависимости от расстояния между электродами. По закону Пашена [71-73] разрядное напряжение газовых промежутков находится по формуле:

$$U_p = \frac{B(\delta s)}{C + \ln(\delta s)}, \quad (2.3)$$

где  $B = A_\delta U_u$  и  $C = \ln \left( \frac{A_\delta}{\ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right)$  являются коэффициентами, зависящими от

газовой среды,  $\delta$  – плотность воздуха,  $s$  – расстояние между электродами.

Для воздушной среды [74]:

$A_\delta = 11,1 \cdot 10^3$  1/см – волновое число;

$U_u = 12,5$  В – напряжение ионизации;

$\ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right) = 20$ .

Из чего следует, что коэффициенты  $B$  и  $C$  равны следующим значениям:  $B = 1,387 \cdot 10^5$  и  $C = 6,319$ .

Так как исследования будут происходить в помещении, то параметры давления и температуры принимаем равными  $P_0 = 10^5$  Па и  $T_0 = 293$  К. Следовательно, плотность воздуха  $\delta = 1$ .

Определим  $\ln(\delta s)$  для  $s$  от 3 см до 20 см с шагом в 1 см (так как при расстоянии меньше 3 см большая вероятность перехода стримерной стадии разряда в искровую) и разрядное напряжение воздушных промежутков  $U_p$  в вольтах (таблица 2.2) и построим график зависимости  $f = U_p(\delta s)$  для расстояния между электродами  $s$  от 3 см до 20 см с шагом в 1 см (рисунок 2.9).

Таблица 2.2 – Разрядное напряжение различных воздушных промежутков

№ п/п	$s$	$\ln(\delta s)$	$U_p$ , В
1	3	1,099	56120
2	4	1,386	72030
3	5	1,609	87500
4	6	1,792	102600
5	7	1,946	117500
6	8	2,079	132200

*Окончание таблицы 2.2*

№ п/п	s	$\ln(\delta s)$	$U_p, В$
7	9	2,197	146600
8	10	2,303	160900
9	11	2,398	175100
10	12	2,485	189100
11	13	2,565	203000
12	14	2,639	216800
13	15	2,708	230600
14	16	2,773	244200
15	17	2,833	257700
16	18	2,890	271200
17	19	2,944	284600
18	20	2,996	297900

Также нами был проведен расчет в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics зависимости плотности электрического поля и величины разрядного напряжения от расстояния для промежутков между электродами в 10 мм на рисунке 2.10, в 15 мм на рисунке 2.11, в 20 мм на рисунке 2.12, в 25 мм на рисунке 2.13 и в 30 мм на рисунке 2.14.

Анализ полученных результатов показал, что для возникновения короны более благоприятным является наименьшее расстояние между электродами, что также подтверждается расчетами в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics (рисунок 2.15).

Поэтому дальше в работе используется расстояние в 10 мм при изучении характеристик импульсной стримерной короны и расстояние в 30 мм в экспериментальном образце устройства очистки газовых сред.

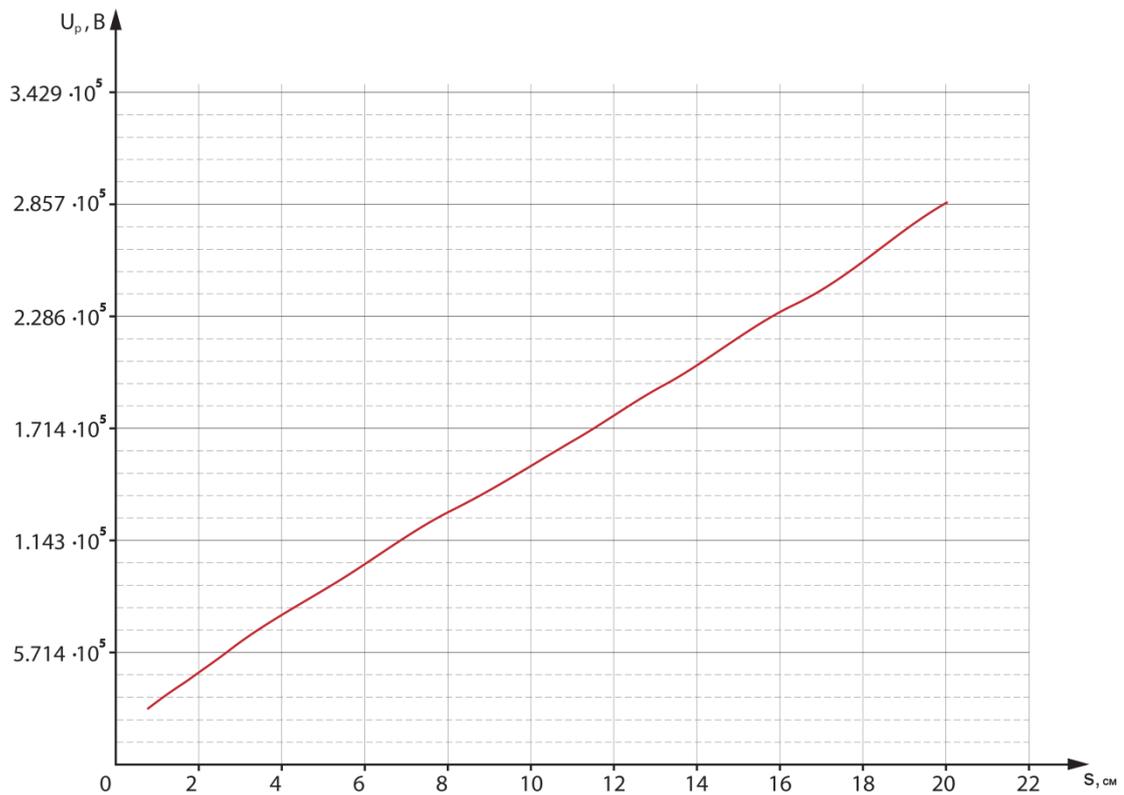


Рисунок 2.9 – Зависимость  $f = U_p(\delta s)$

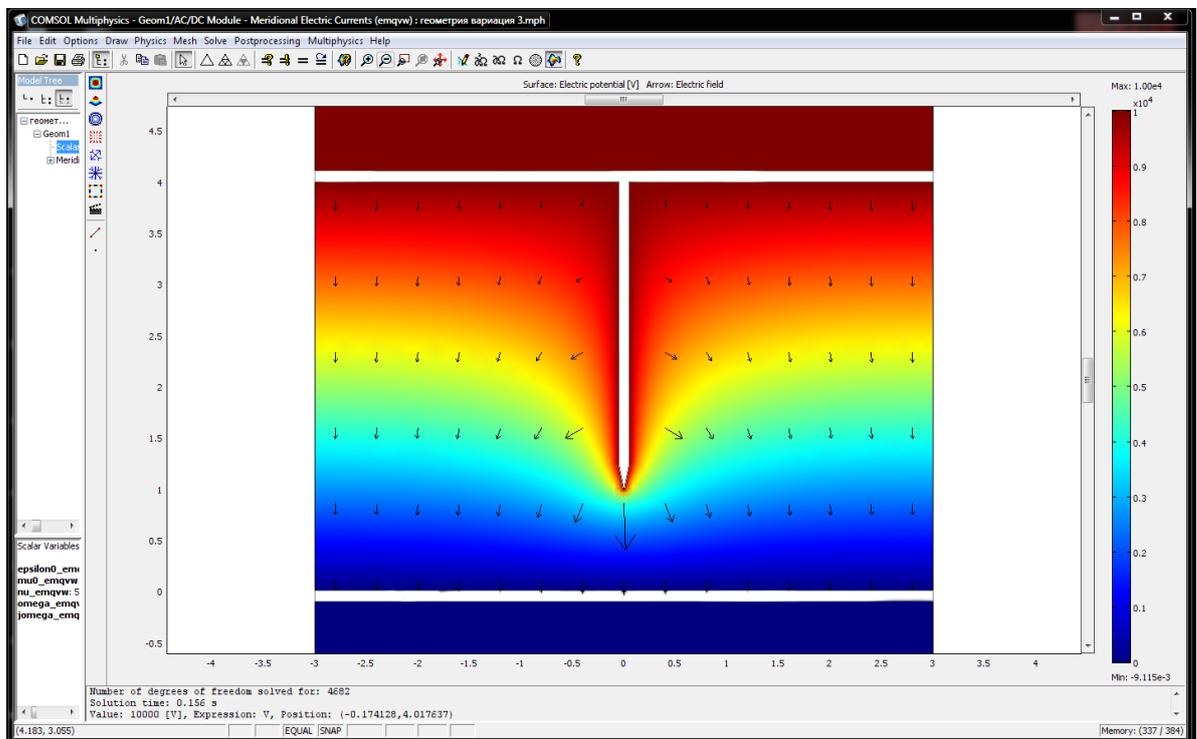


Рисунок 2.10 – Распределение электрического поля и напряжения для промежутка между электродами 10 мм в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

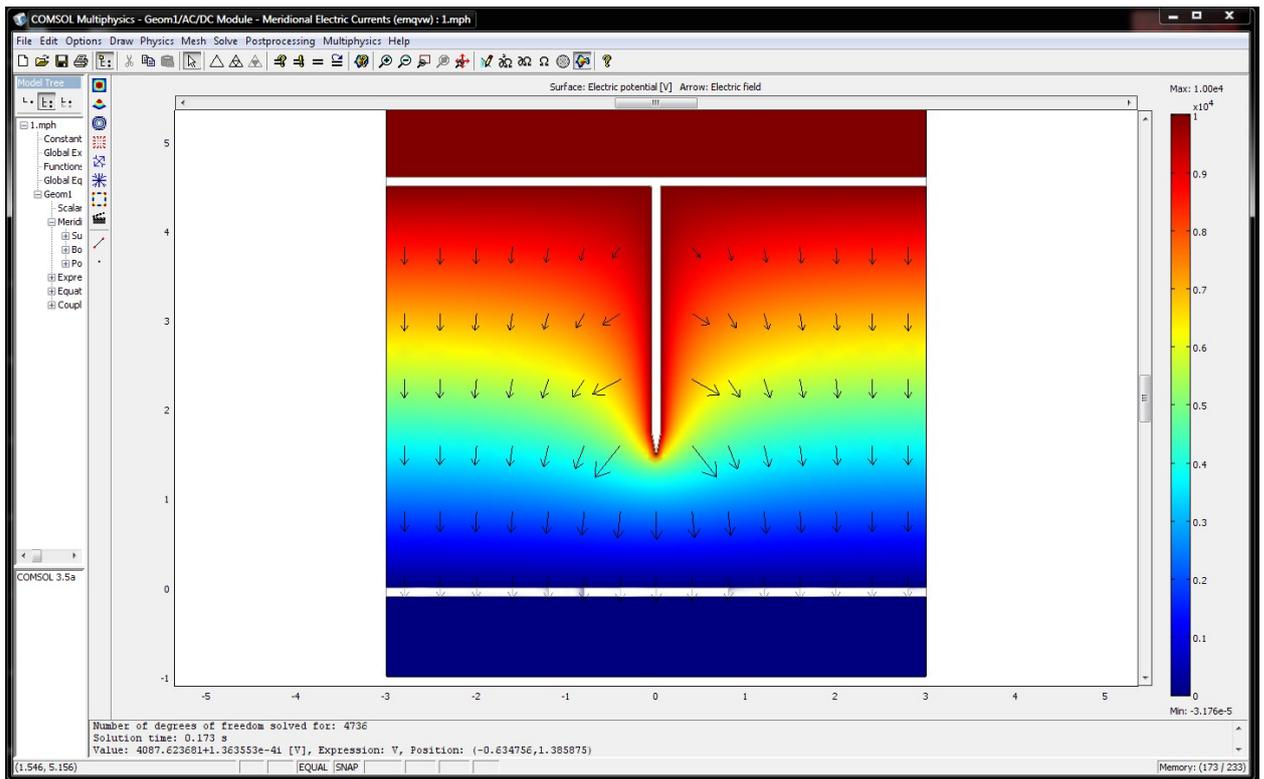


Рисунок 2.11 – Распределение электрического поля и напряжения для промежутка между электродами 15 мм в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

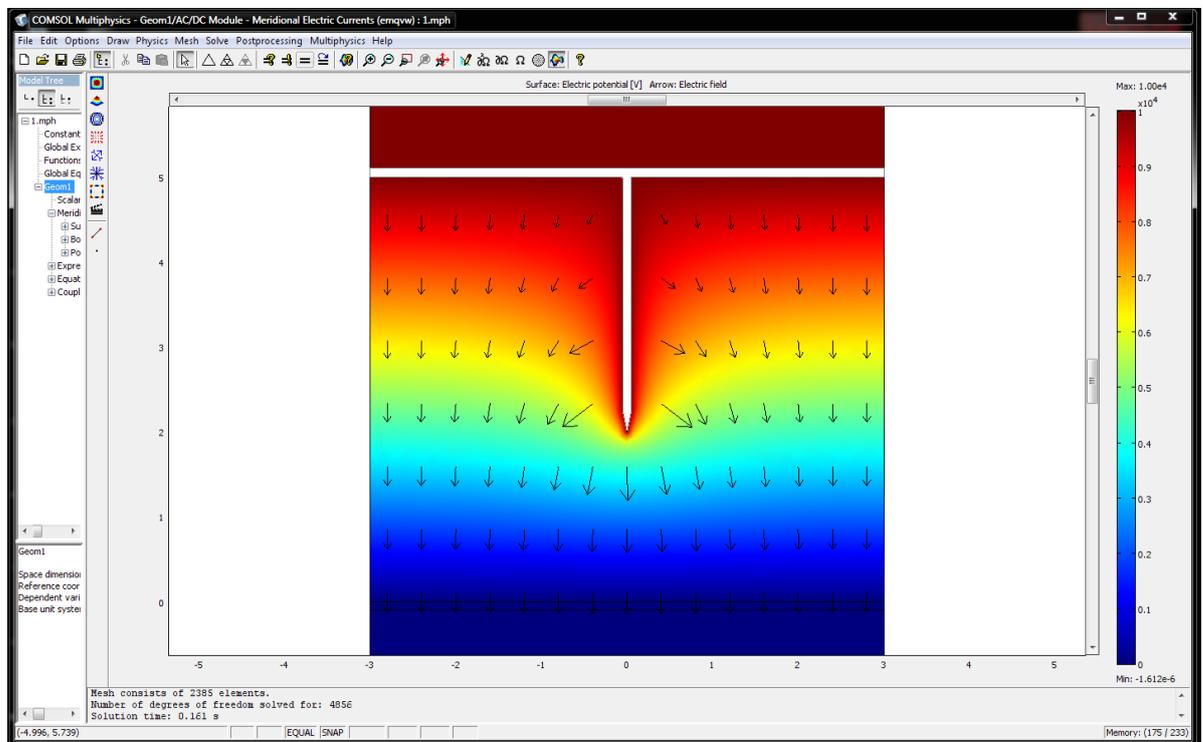


Рисунок 2.12 – Распределение электрического поля и напряжения для промежутка между электродами 20 мм в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

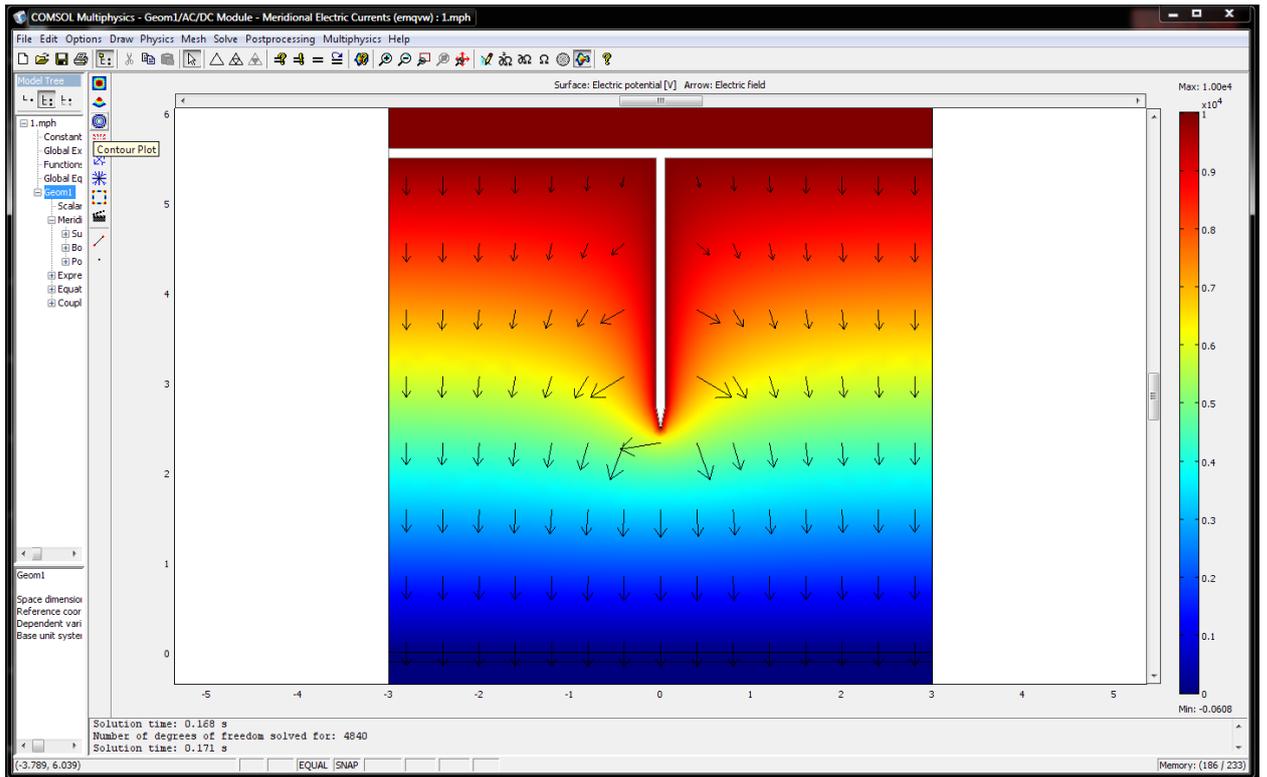


Рисунок 2.13 – Распределение электрического поля и напряжения для промежутка между электродами 25 мм в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

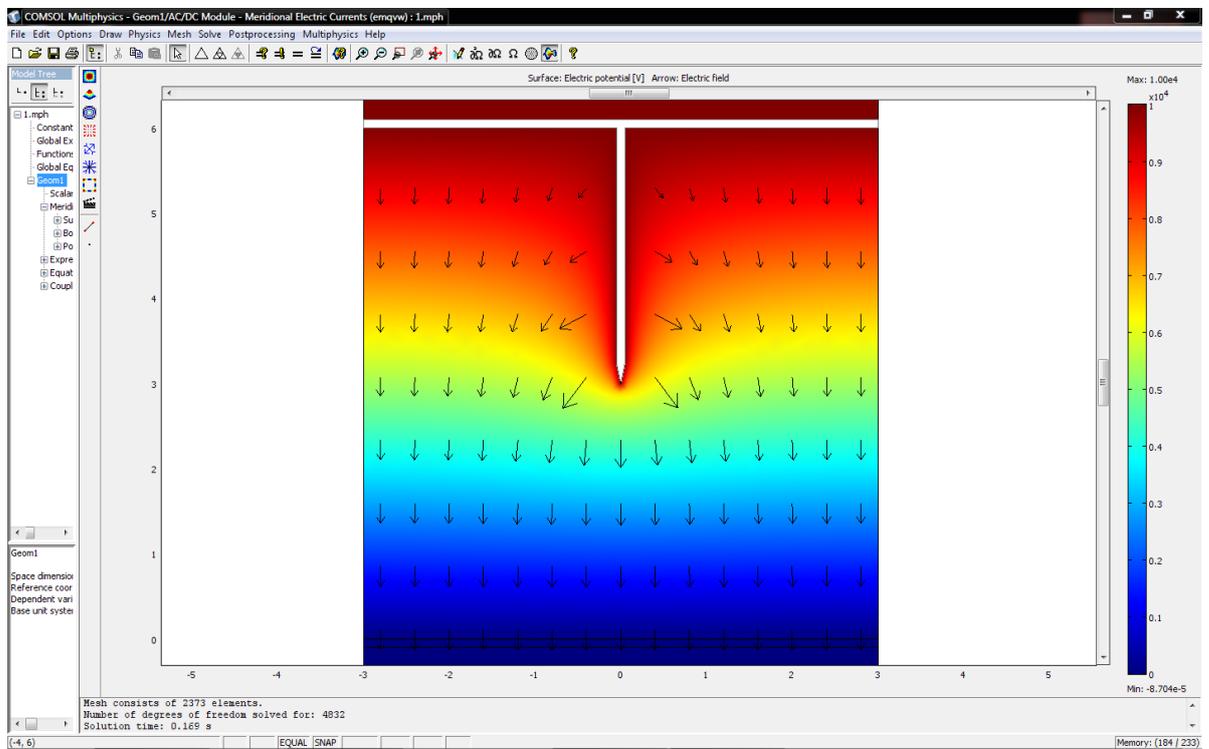


Рисунок 2.14 – Распределение электрического поля и напряжения для промежутка между электродами 30 мм в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

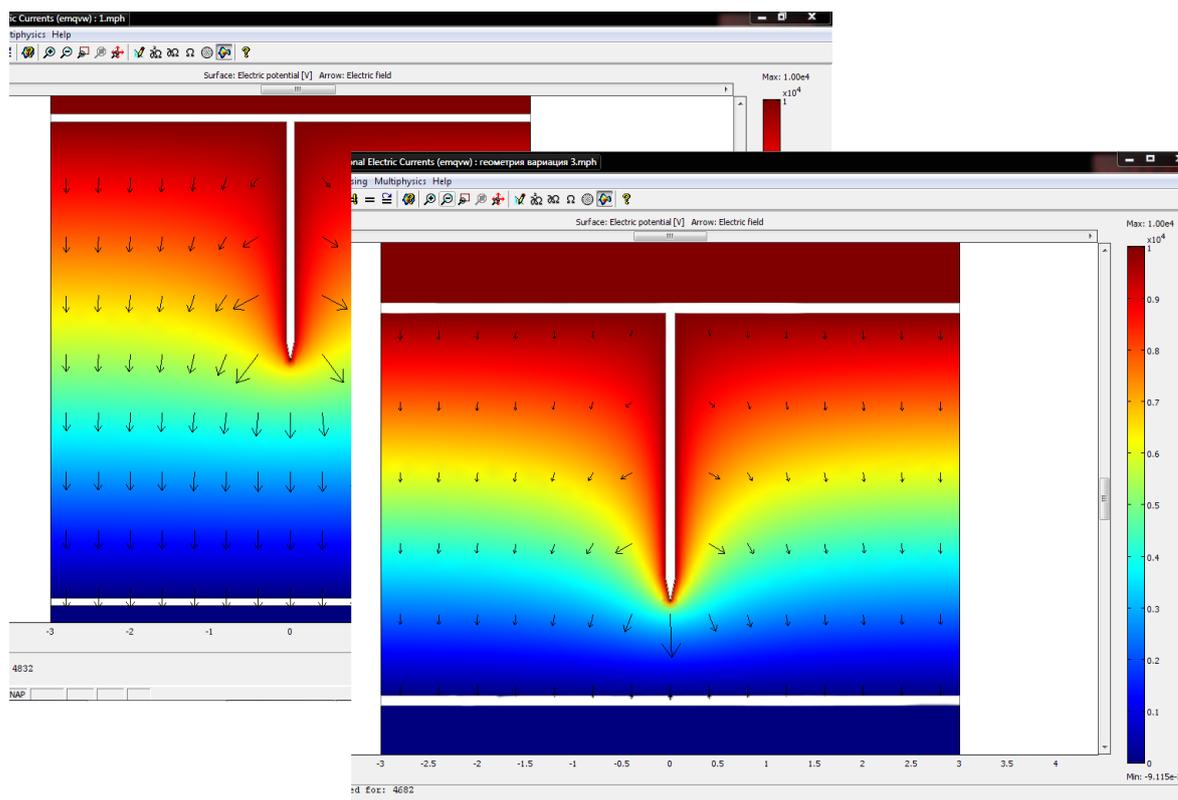


Рисунок 2.15 – Зависимости распределения электрического поля и напряжения от расстояния между электродами выполненные в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

### 2.1.3 Расчет зависимости напряженности появления короны от радиуса кривизны электродов

Коронный разряд является самостоятельным газовым разрядом, возникающим при резко неоднородном поле у поверхности электрода с наибольшим радиусом кривизны (тонкие провода, острия). Зона вблизи электрода с большим радиусом кривизны характеризуется гораздо более высокими значениями напряженности электрического поля в сравнении с остальными значениями для всего оставшегося промежутка [75-78].

При достижении напряжённостью поля пробивного значения (для воздушной среды порядка 30 кВ/см), вокруг поверхности электрода появляется свечение, напоминающее корону. Ионизационные процессы при

коронном разряде происходят в основном около коронирующего электрода, а сам коронный разряд появляется при относительно высоком давлении воздуха (порядка атмосферного).

Для расчета напряженности появления короны воспользуемся формулой Пика [79]:

$$E_k = B\delta \left[ 1 + \frac{A_\delta}{(r\delta)^C} \right], \quad (2.4)$$

где  $r$  – радиус кривизны стержня.

Определяя напряженность появления короны  $E_k$  воздушных промежутков (таблица 2.3), построим график зависимости  $f_1 = E_k(r)$  для радиуса кривизны стержня  $r$  от 25 мкм до 250 мкм с шагом в 25 мкм (рисунок 2.16).

Таблица 2.3 – Напряженность появления короны воздушных промежутков для различных радиусов кривизны электрода «игла»

№ п/п	$r$ , мкм	$E_k$ , кВ/см
1	25	51,469
2	50	45,224
3	75	42,265
4	100	40,425
5	125	39,130
6	150	38,151
7	175	37,374
8	200	36,737
9	225	36,202
10	250	35,742

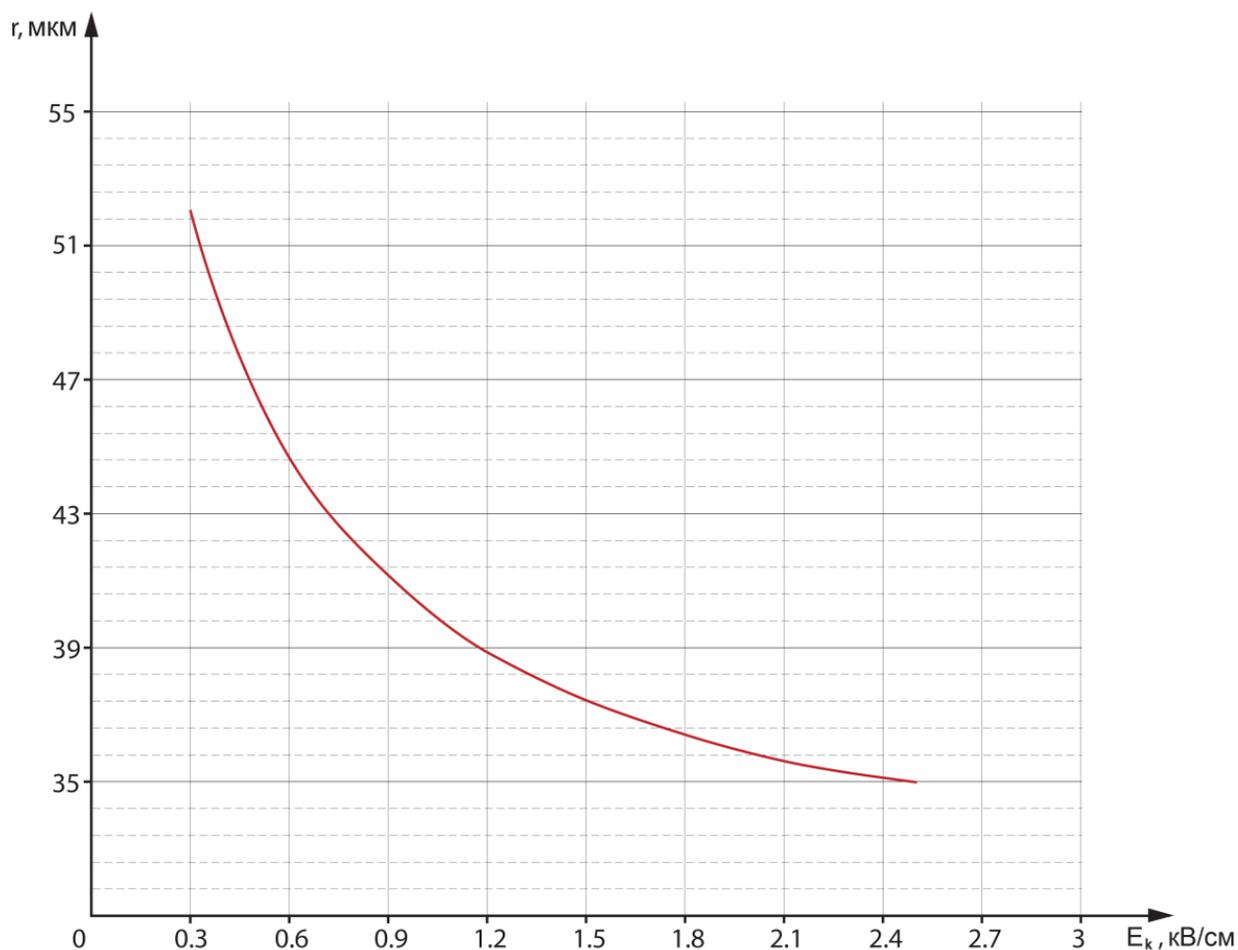


Рисунок 2.16 – Зависимость  $f_1 = E_k(r)$

Также нами был проведен расчет в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics зависимости плотности электрического поля и величины разрядного напряжения от радиуса кривизны электрода «игла»:

- при 125 мкм на рисунке 2.17,
- при 100 мкм на рисунке 2.18,
- при 75 мкм на рисунке 2.19,
- при 50 мкм на рисунке 2.20,
- при 25 мкм на рисунке 2.21.

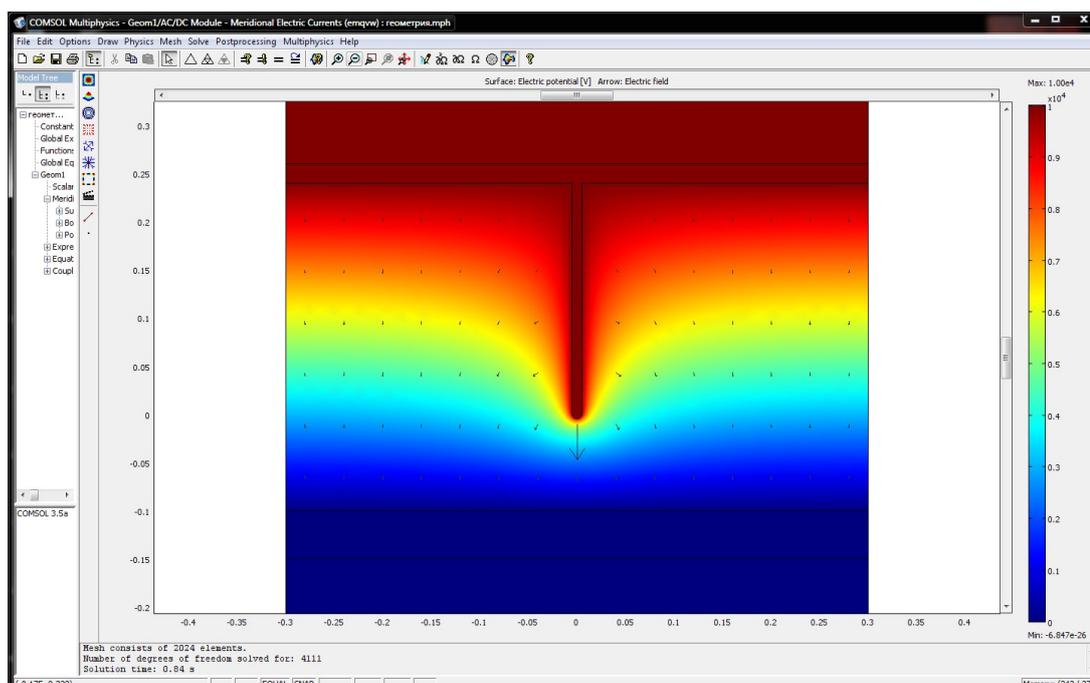


Рисунок 2.17 – Распределение электрического поля и напряжения для промежутка между электродами 10 мм с радиусом кривизны электрода «игла» 125 мкм в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

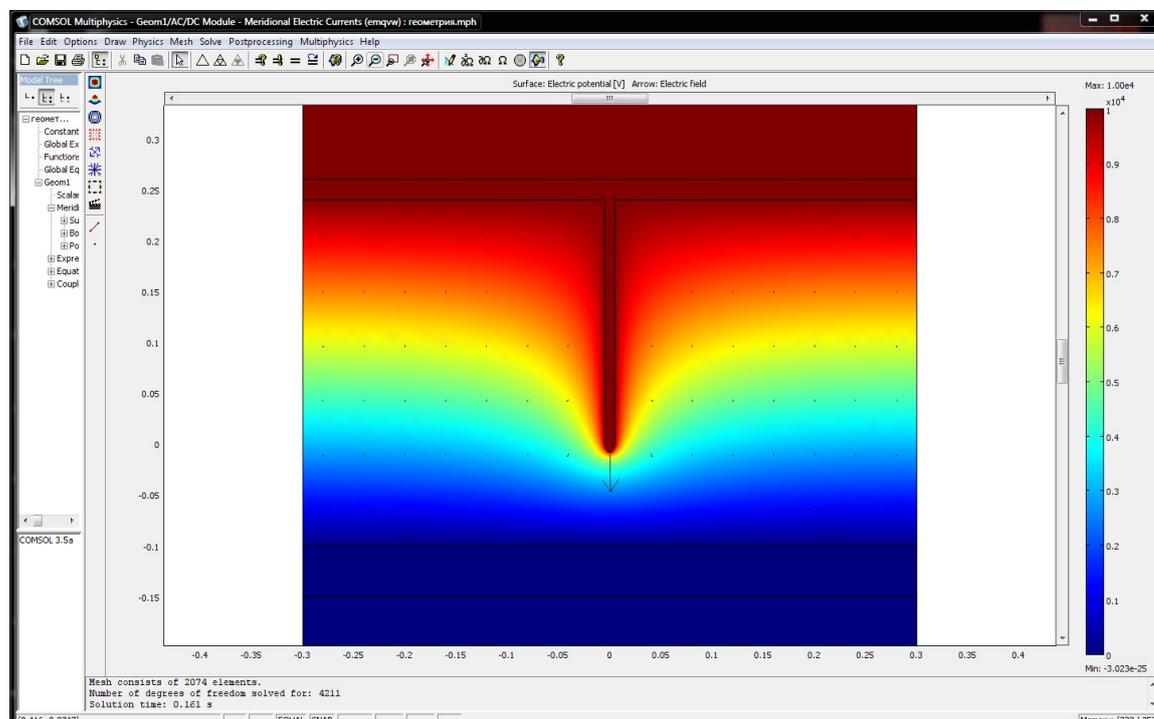


Рисунок 2.18 – Распределение электрического поля и напряжения для промежутка между электродами 10 мм с радиусом кривизны электрода «игла» 100 мкм в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

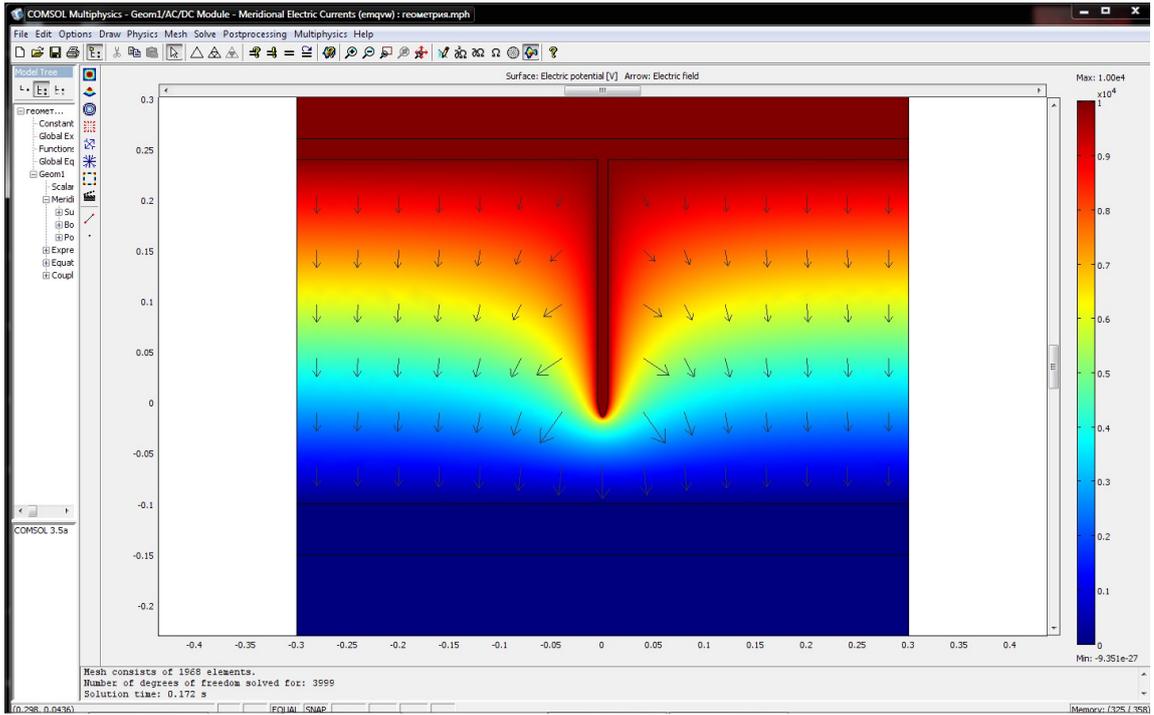


Рисунок 2.19 – Распределение электрического поля и напряжения для промежутка между электродами 10 мм с радиусом кривизны электрода «игла» 75 мкм в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

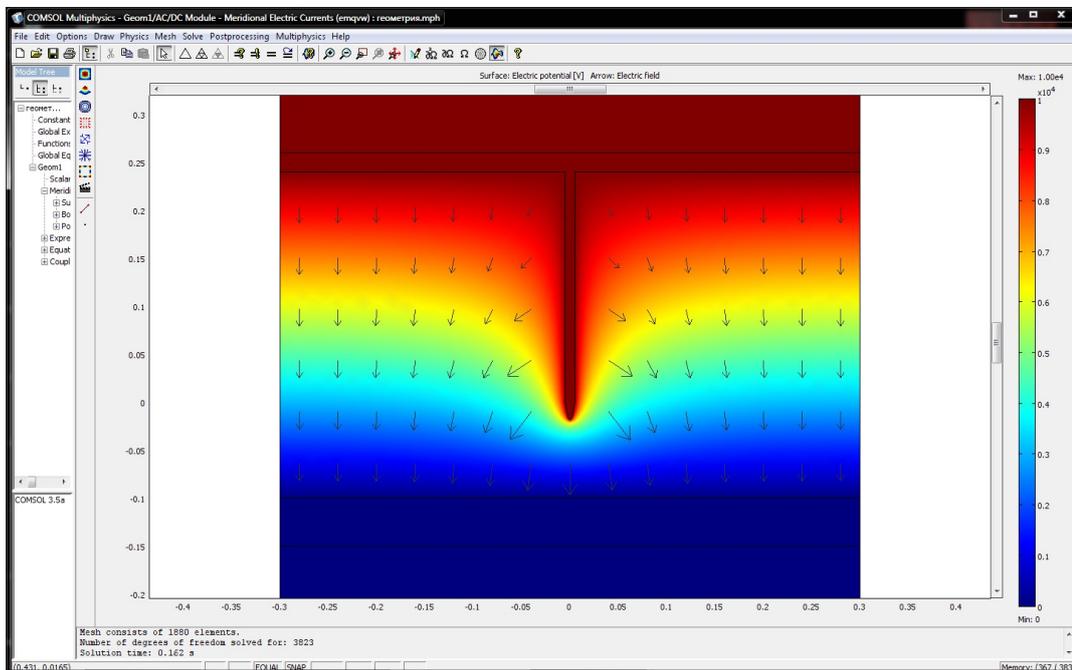


Рисунок 2.20 – Распределение электрического поля и напряжения для промежутка между электродами 10 мм с радиусом кривизны электрода «игла» 50 мкм в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

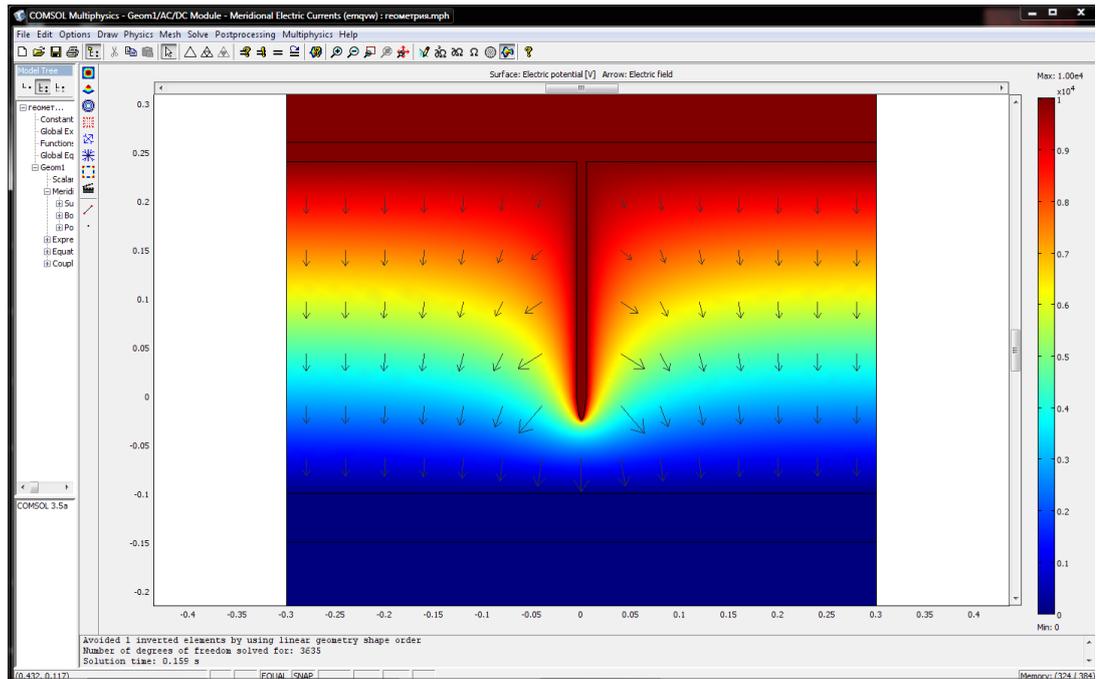


Рисунок 2.21 – Распределение электрического поля и напряжения для промежутка между электродами 10 мм с радиусом кривизны электрода «игла» 25 мкм в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

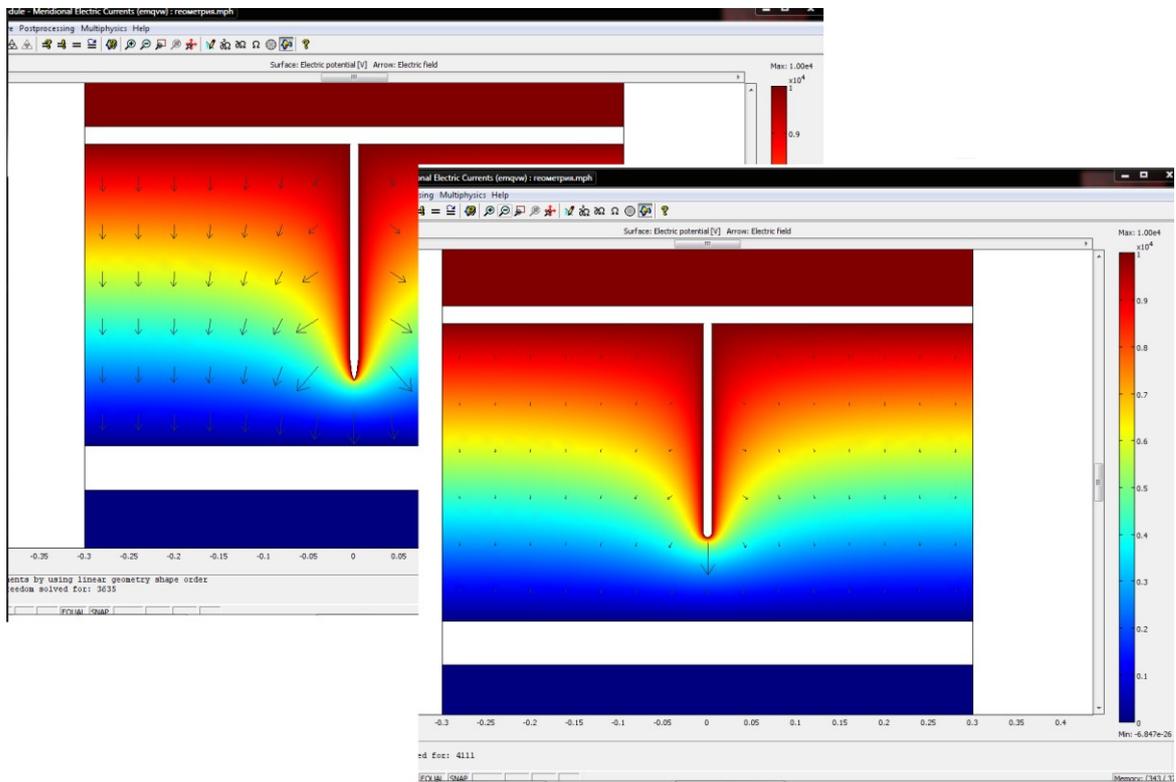


Рисунок 2.22 – Зависимости распределения электрического поля и напряжения от радиуса кривизны электродов выполненные в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics

Анализ полученных результатов показал, что для возникновения короны более благоприятным является наименьший радиус кривизны электродов, что подтверждается расчетами в программном пакете для мультифизического моделирования Comsol Multiphysics (рисунок 2.22).

Также из полученных расчетов можно сделать вывод, что используя систему электродов иглу – плоскость с наименьшим расстоянием между электродами и минимальным радиусом кривизны иглы, наблюдается высокий уровень неоднородности поля, что позволяет получать наибольшее разрядное напряжение при наименьших энергозатратах.

## 2.2 Исследование влияния материалов электродов на процесс наработки химически активных частиц в межэлектродном пространстве

Как утверждается в ряде работ [80-85], химически активные частицы образуются вблизи электрода с максимальной неоднородностью электрического поля, остальное межэлектродное пространство не участвует в процессе наработки радикалов.

Однако, как показывают, наши экспериментальные данные, полученные при исследовании различных зон межэлектродного пространства на предмет образования озона в поле стримерной короны с помощью специально изготовленной реакционной камеры (рисунок 2.23) с четырьмя независимыми выходами, озон образуется во всем объеме межэлектродного пространства.

Межэлектродное пространство реакционной камеры условно было поделено на четыре зоны, из каждой зоны производился забор ионизированного воздуха, состав которого: кислород – 20,03%, углекислый газ – 0,94%, азот – 78,93%. Анализ полученного воздуха показал, что в I условной зоне, в среднем, образуется порядка 700 ppm O<sub>3</sub>, во II зоне – 350 ppm, в III зоне – 100 ppm, в IV зоне – 10 ppm.

При этом полученные данные распределения концентрации озона  $O_3$  вдоль диэлектрической реакционной камеры показывают, что именно в I зоне вырабатывается наибольшее количество химически активных частиц (700 ppm  $O_3$ ), при этом во II и III зонах образуется достаточное количество озона для химических окислительных реакций.

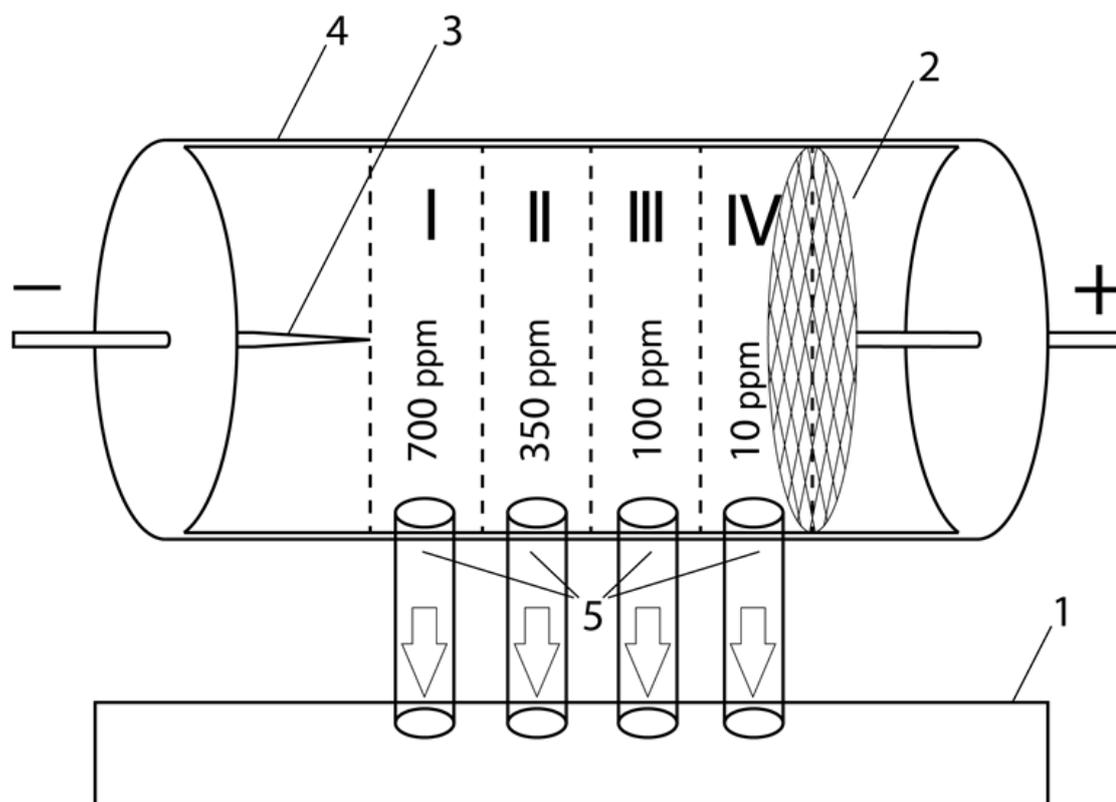


Рисунок 2.23 – Распределение концентрации озона  $O_3$  вдоль диэлектрической реакционной камеры: 1 – газоаналитическая система; 2 – положительный электрод; 3 – отрицательный электрод; 4 – диэлектрическая реакционная камера; 5 – выходные каналы; I, II, III, IV – зоны разделения реакционной камеры по длине на интервалы в 6 мм

## 2.2.1 Анализ разрядных характеристик в зависимости от материалов электродов

Нами был проведен ряд экспериментов на экспериментальной установке, включающую в себя открытую систему электродов, импульсный источник питания, делитель напряжения и комплекс измерительной аппаратуры с поликристаллическими и монокристаллическими электродами различных материалов, таких как железо, магний, никель, медь и др. На электроды воздействует агрессивная химическая и физическая среда с такими параметрами, как влажность воздушной среды, концентрация оксидов азота, серы, углерода, изменение температуры и давления. Помимо перечисленных факторов материал электродов должен обладать высокой электропроводимостью, температурой плавления и работой выхода электрона [86-88]. Анализируя выше перечисленные факторы, в качестве электрода «игла» мы использовали материал платина, так как данный материал обладает достаточной электропроводимостью, и другими необходимыми высокими химическими и физическими показателями (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Металлы, их проводимость, температура плавления и работа выхода электрона

Материал	Проводимость, См/м	Температура плавления, С°	Работа выхода электрона, эВ
серебро	62 500 000	961	4.3
медь	59 500 000	1083	4.4
золото	45 500 000	1063	4.76
алюминий	38 000 000	660.1	4.25
магний	22 700 000	650	3.69
цинк	16 900 000	906	4.24
никель	11 500 000	1455	4.84
железо	10 000 000	1539	4.31
платина	9 350 000	1768	5.32

Нами был проведен ряд экспериментов с поликристаллическими и монокристаллическими электродами различных материалов, таких как железо, медь, никель и др.

На базе Казанского национального исследовательского технологического университета имени А.Н. Туполева в Центре коллективного пользования «Прикладные нанотехнологии» был проведен ряд электронно-микроскопических и металлографических исследований монокристаллических и поликристаллических материалов. Подготовка монокристаллических и поликристаллических электродов к электронно-микроскопическому анализу [89] была осуществлена путем химического травления в растворе «царской водки», состоящей из 1-ого объема  $\text{HNO}_3$ , 3-ех объемов  $\text{HCl}$  при температуре 60-700 °С. Для проведения исследования нами был использован сканирующий электронный микроскоп AURIGA CrossBeam с энергодисперсионным спектрометром INCA X-MAX. Подготовленные к исследованию образцы кристаллов фиксировались токопроводящим углеродным скотчем на алюминиевом держателе.

Рельеф поликристалла никеля был исследован при 12000-20000 кратном увеличении с помощью методов топографического и композиционного контраста [90] с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа (рисунок 2.24). Также нами была сфотографирована ионизируемая область при использовании поликристалла никеля (рисунок 2.25).

Сканирующий растровый электронный микроскоп (РЭМ) – это прибор класса электронных микроскопов, который предназначен для фиксации изображений поверхностей объектов с высоким (до 0,4 нанометра) пространственным разрешением, а также фиксируется информация о строении, составе и других свойств поверхностных слоёв исследуемых объектов.

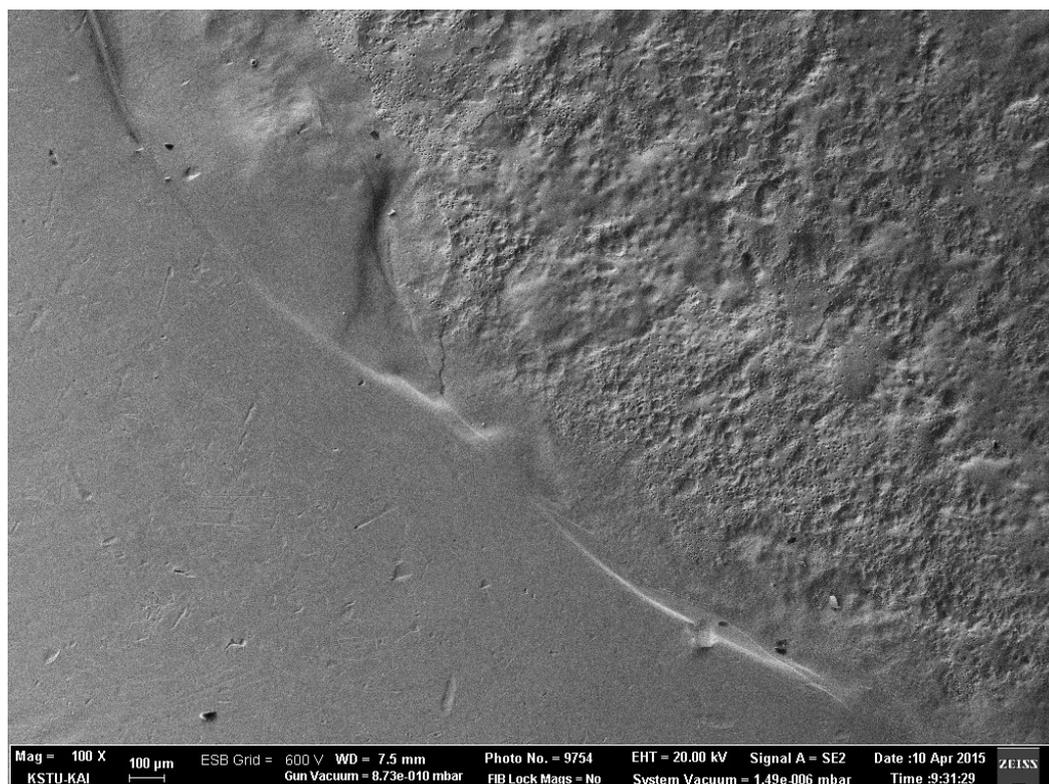


Рисунок 2.24 – Поликристалл никеля снятый электронным микроскопом AURIGA CrossBeam с энергодисперсионным спектрометром INCA X-MAX с увеличением 12000 крат

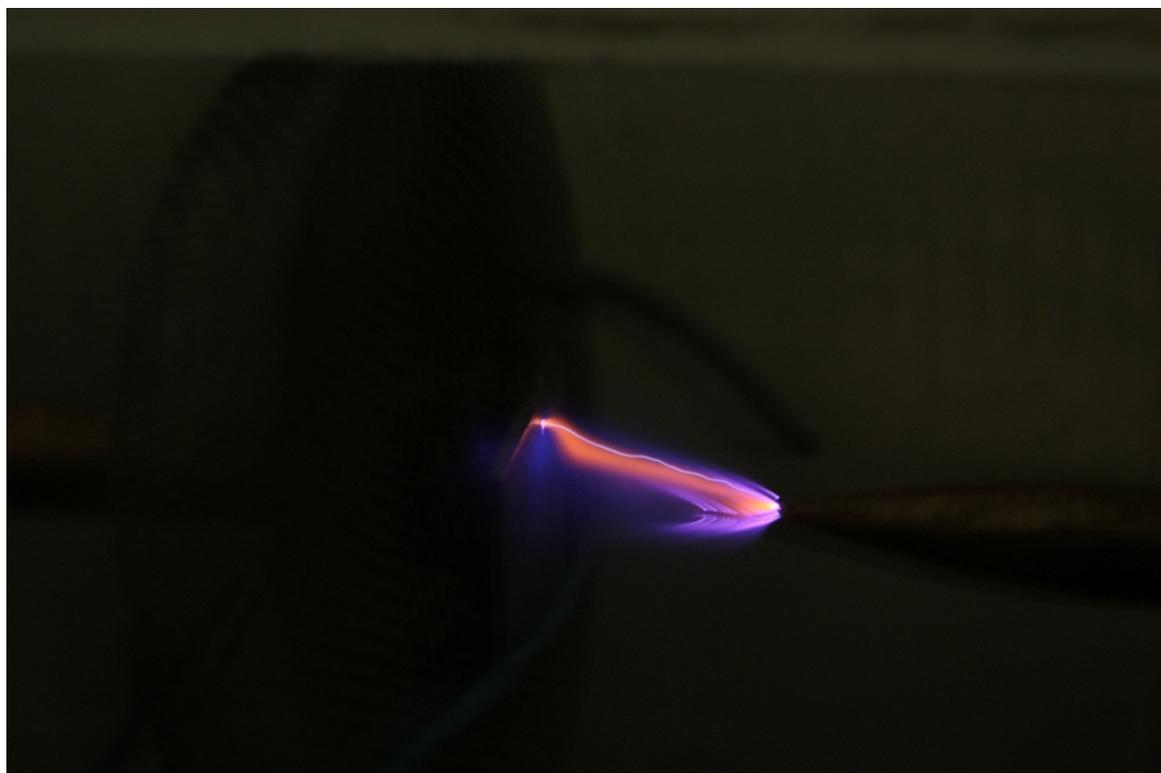


Рисунок 2.25 – Фотография ионизируемой области реакционной камеры с использованием поликристалла никеля в качестве электрода «плоскость»

Рельеф поликристалла железа был исследован при 12000-20000 кратном увеличении с помощью методов топографического и композиционного контраста с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа (рисунок 2.26). Также нами была сфотографирована ионизируемая область при использовании поликристалла никеля (рисунок 2.27).

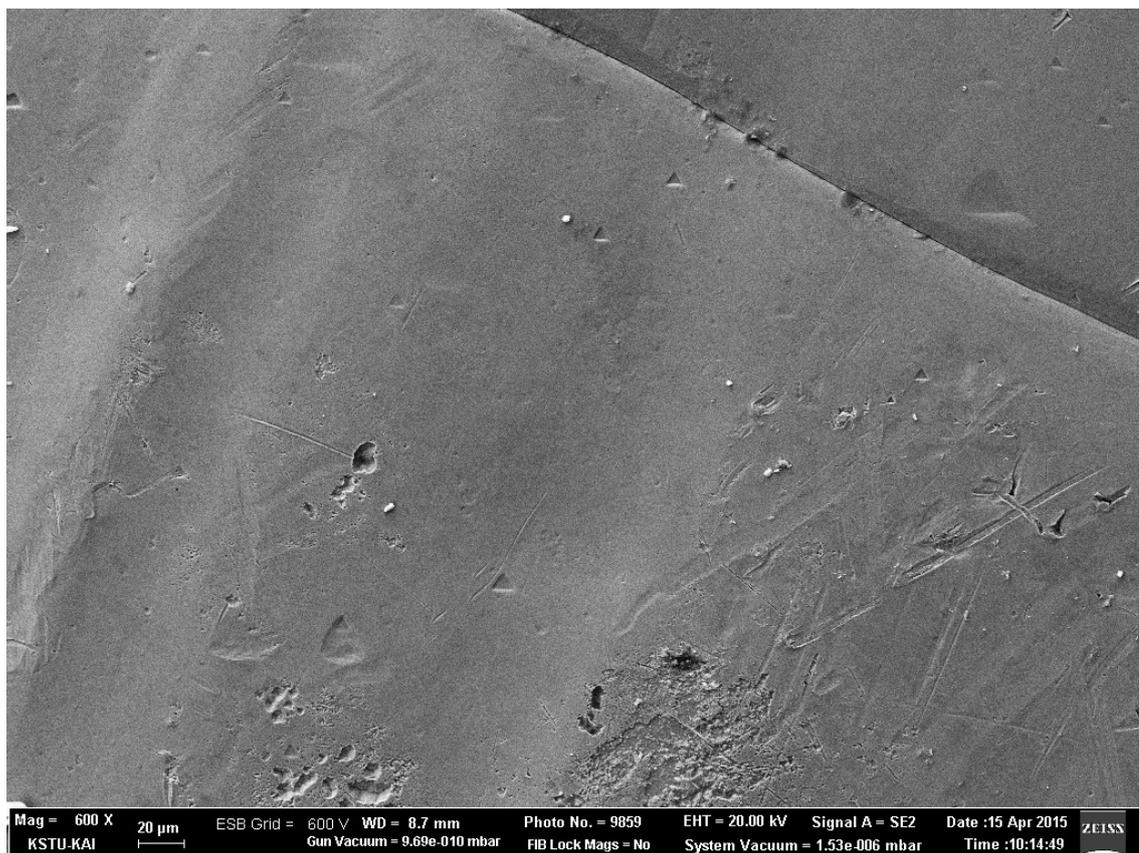


Рисунок 2.26 – Поликристалл железа снятый электронным микроскопом AURIGA CrossBeam с энергодисперсионным спектрометром INCA X-MAX с увеличением 12000 крат

Рельеф поликристалла платины был исследован при 12000-20000 кратном увеличении с помощью методов топографического и композиционного контраста с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа (рисунок 2.28). Также нами была сфотографирована ионизируемая область при использовании поликристалла никеля (рисунок 2.29).



Рисунок 2.27 – Фотография ионизируемой области реакционной камеры с использованием поликристалла железа в качестве электрода «плоскость»

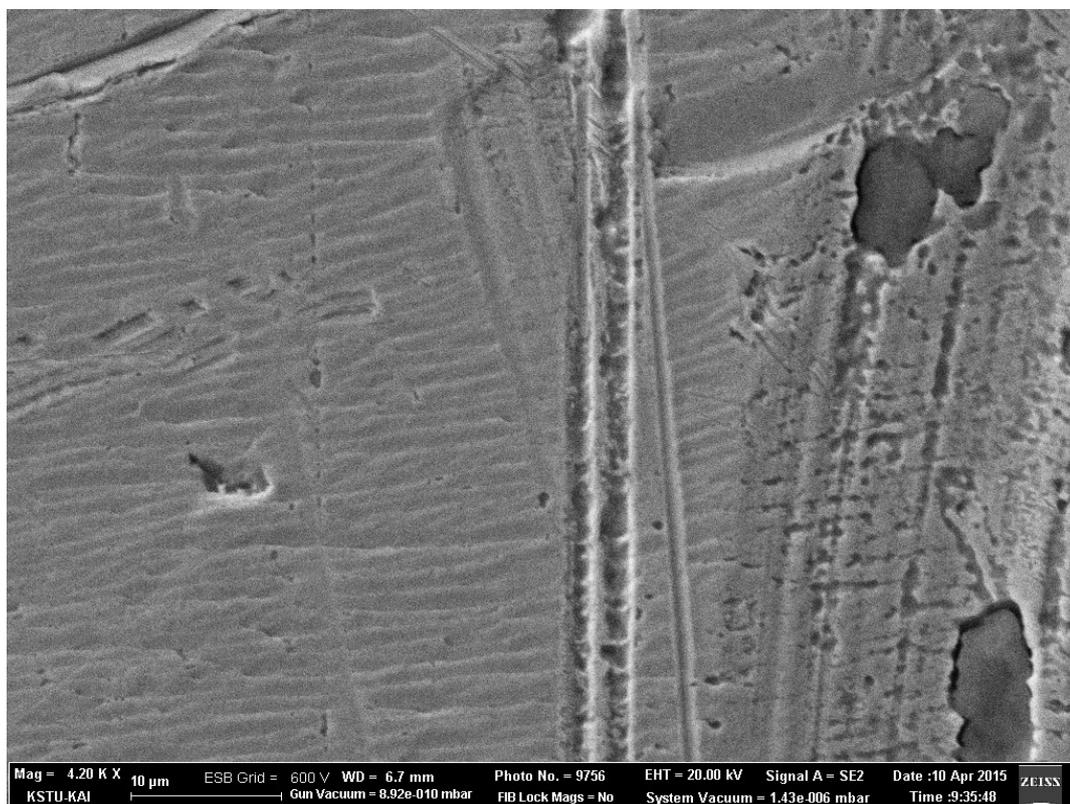


Рисунок 2.28 – Поликристалл платины снятый электронным микроскопом AURIGA CrossBeam с энергодисперсионным спектрометром INCA X-MAX с увеличением 12000 крат

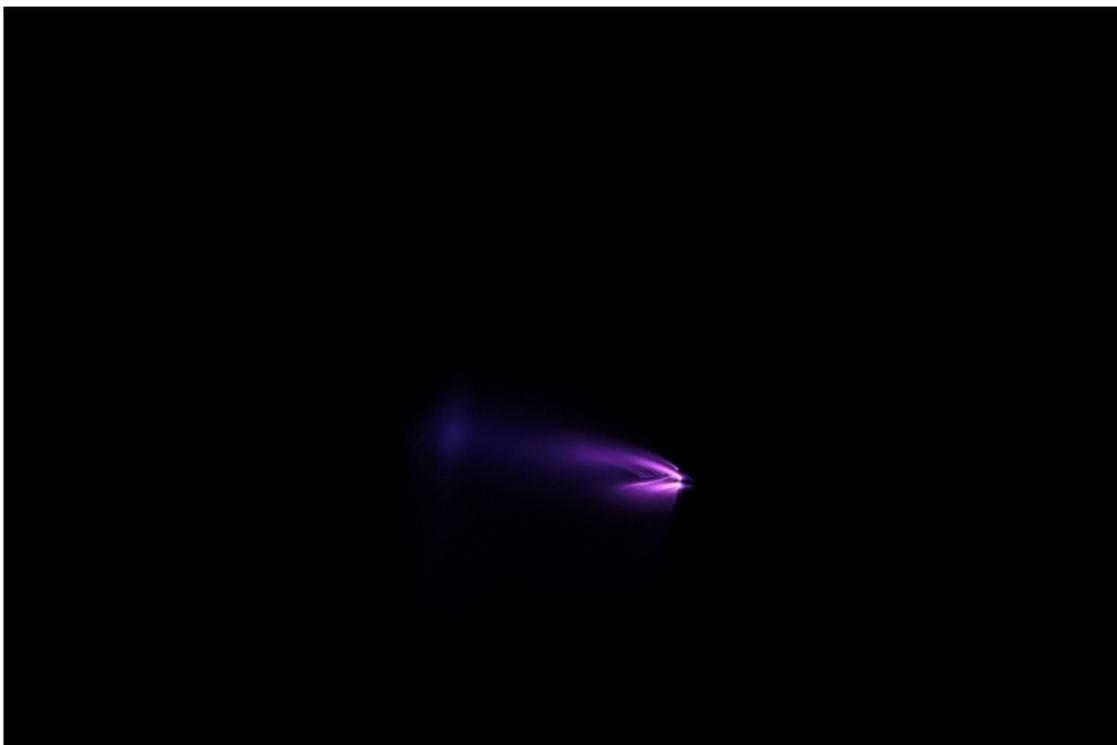


Рисунок 2.29 – Фотография ионизируемой области реакционной камеры с использованием поликристалла платины в качестве электрода «плоскость»

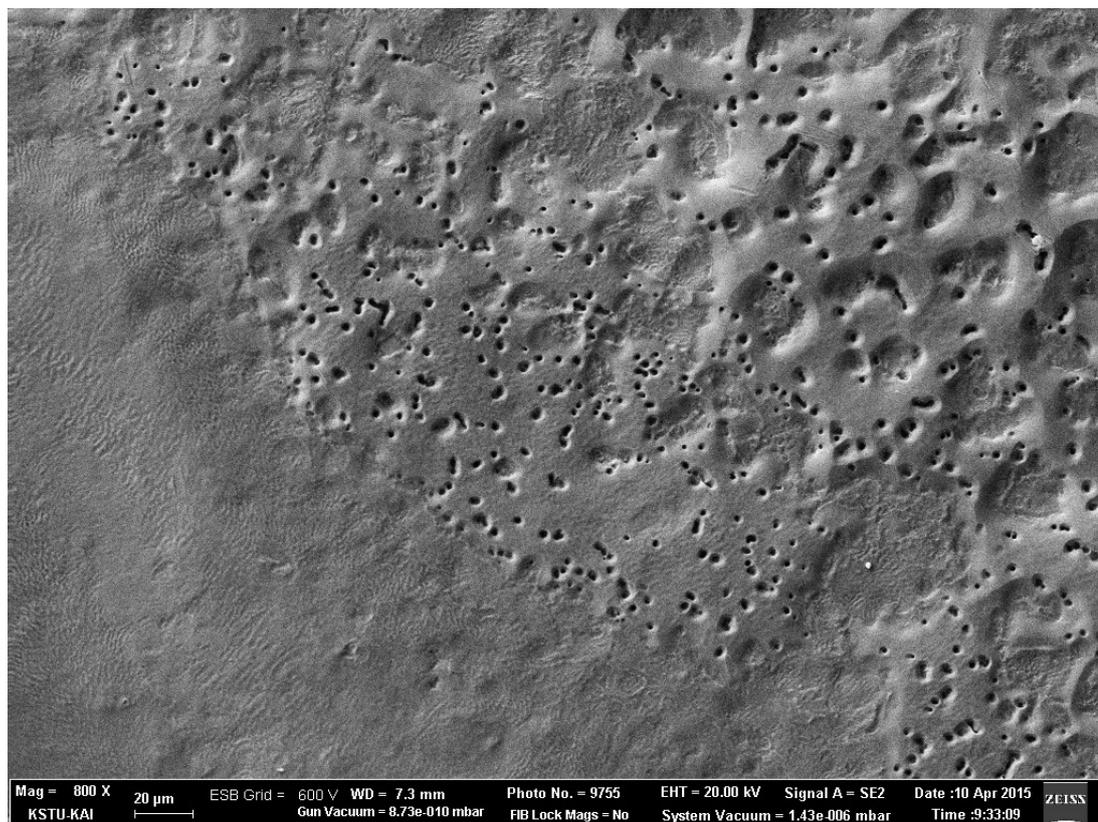


Рисунок 2.30 – Поликристалл меди снятый электронным микроскопом AURIGA CrossBeam с энергодисперсионным спектрометром INCA X-MAX с увеличением 12000 крат

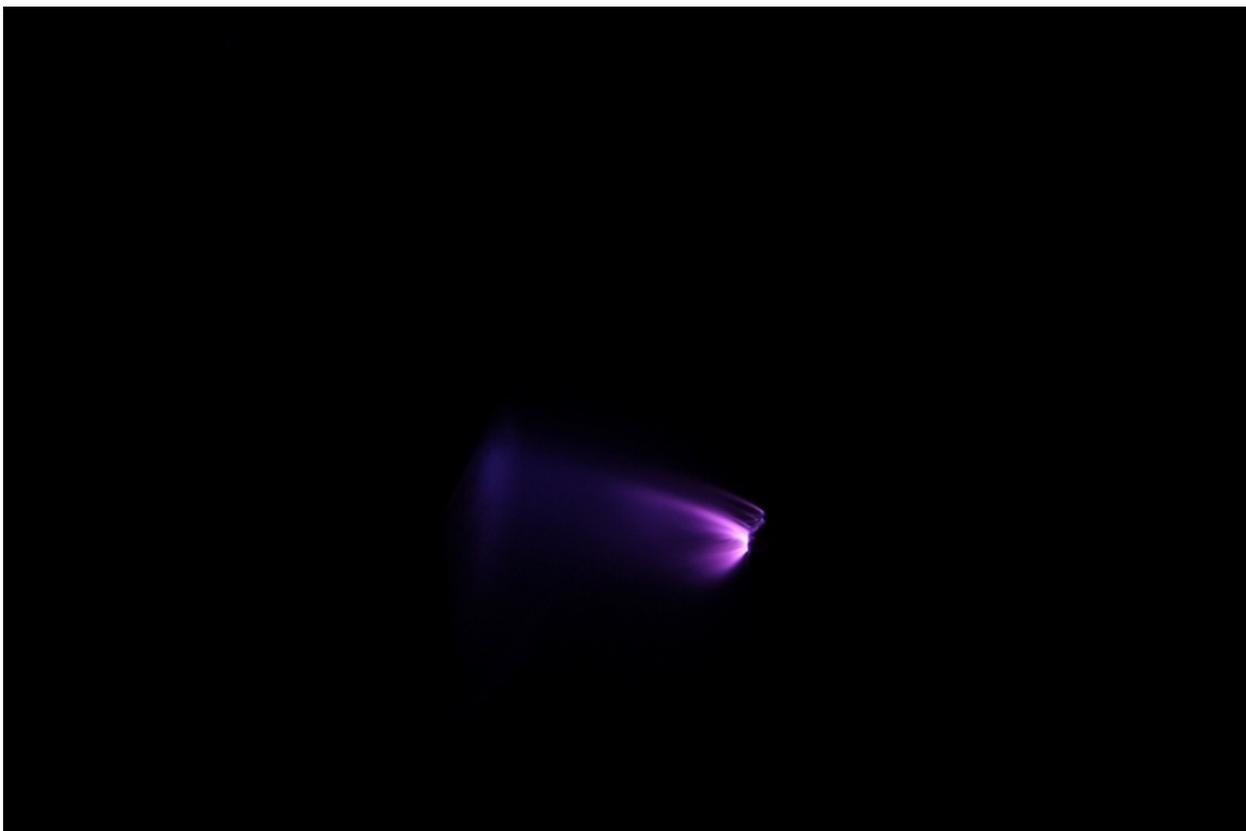


Рисунок 2.31 – Фотография ионизируемой области реакционной камеры с использованием поликристалла меди в качестве электрода «плоскость»

Рельеф поликристалла меди был исследован при 12000-20000 кратном увеличении с помощью методов топографического и композиционного контраста с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа (рисунок 2.30). Также нами была сфотографирована ионизируемая область при использовании поликристалла никеля (рисунок 2.31).

Для экспериментальной установки электрод «плоскость» был выращен методом Бриджмена-Стокбаргера из монокристалла никеля. с Плоскость среза, выращенного монокристалла никеля – (111) при площади в  $1,5 \text{ см}^2$ , выращенный в лаборатории Казанского физико-технического института Российской академии наук.

Рельеф монокристалла никеля был исследован при 12000-20000 кратном увеличении с помощью методов топографического и композиционного контраста (рисунки 2.32, 2.33).

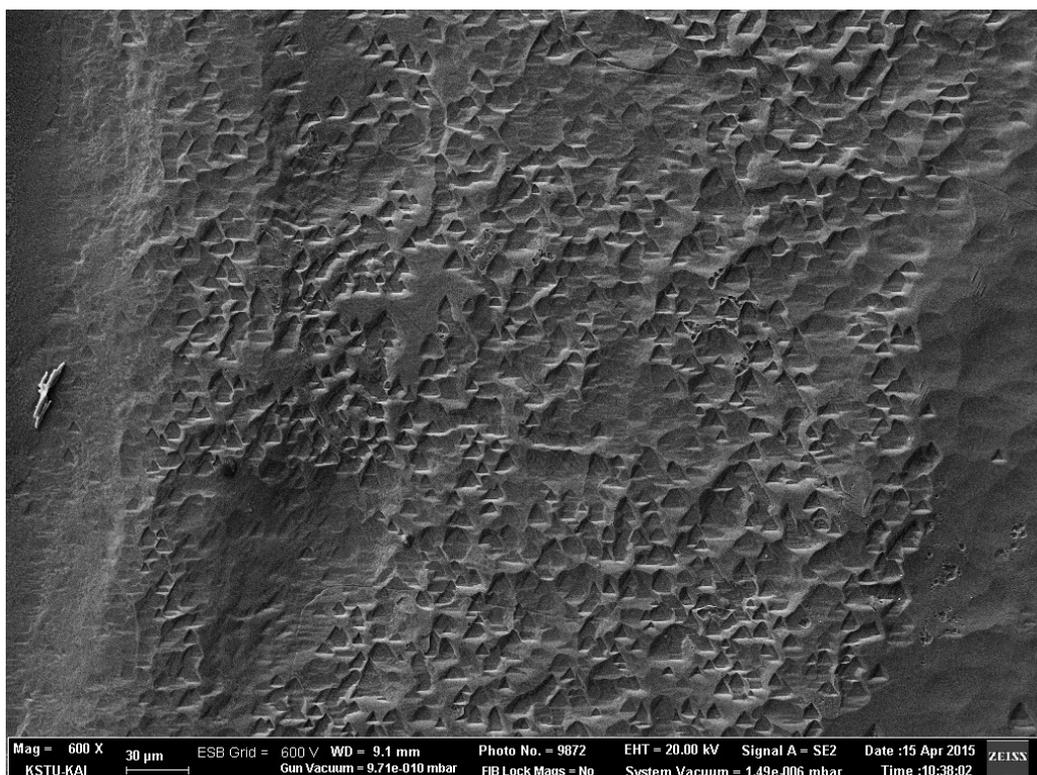


Рисунок 2.32 – Монокристалл никеля снятый электронным микроскопом AURIGA CrossBeam с энергодисперсионным спектрометром INCA X-MAX с увеличением 12000 крат

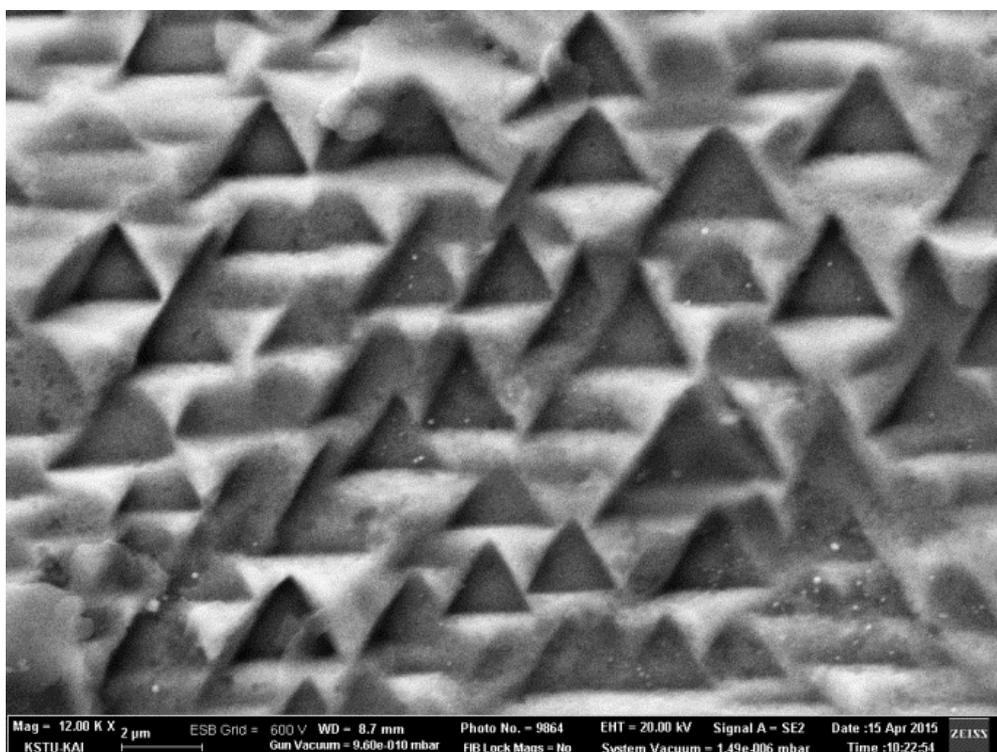


Рисунок 2.33 – Монокристалл никеля снятый электронным микроскопом AURIGA CrossBeam с энергодисперсионным спектрометром INCA X-MAX с увеличением 18000 крат

При сравнении рельефов монокристалла никеля с поликристаллическими металлами, следует отметить, что только у монокристалла присутствуют характерно выраженные выступы в виде «треугольников», которые, вероятно могут повышать напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве. Вероятно, в следствии данного факта, свечение стримерного разряда ярче, чем при использовании поликристаллических материалов.

Также при сравнении рельефов монокристалла никеля с поликристаллическими металлами, видно, что выступы в виде «треугольников» равномерно распределены по сканируемой поверхности монокристалла никеля. При этом рельеф поликристаллических металлов не обладает свойством равномерной структуры поверхности.

Описанный факт, вероятно, влияет на равномерное распределение стримерных каналов в ионизируемой области. То есть при равномерной структуре материала стримерные каналы равномерно распределены по площади кристалла, и при неравномерной структуре металла стримерные каналы распределены не равномерно.

Так как одной из главных проблем наработки химически активных частиц в коронном разряде является относительно малый объем зоны ионизации, описанный выше эффект может позволить расширить зону ионизации, тем самым повлиять на количество нарабатываемых радикалов, таких как  $O_3$ .

Также во время исследования разрядных характеристик монокристалла никеля с плоскостью среза (111) при увеличении напряжения перед искровой стадией можно было наблюдать повторение стримерным каналом на электроде «плоскость» структуру материала, а именно «треугольник» схожий со структурой металла во время микроскопических исследований (рисунки 2.35, 2.36).



Рисунок 2.34 – Фотография ионизируемой области реакционной камеры с использованием монокристалла никеля в качестве электрода «плоскость»



Рисунок 2.35 – Фотография ионизируемой области на электроде «плоскость» с использованием монокристалла никеля в качестве электрода «плоскость»

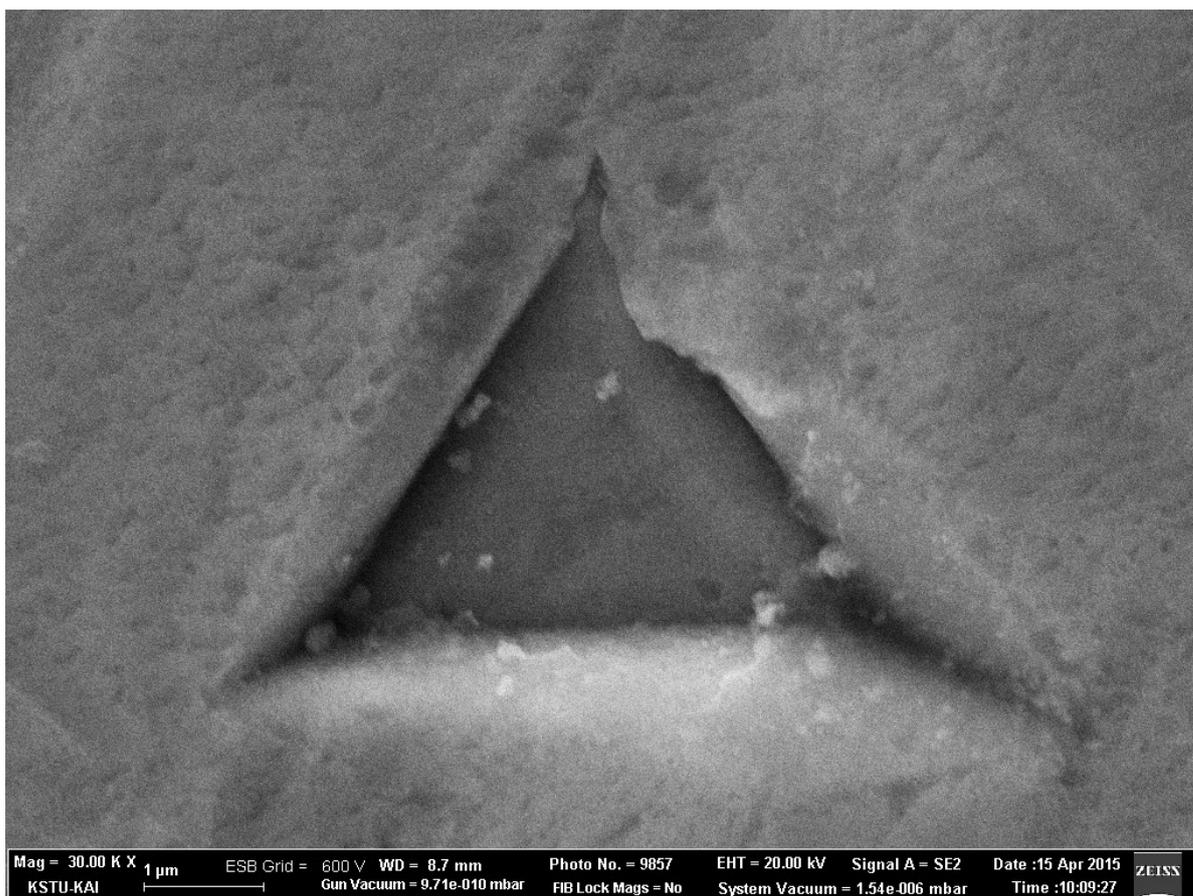


Рисунок 2.36 – Монокристалл никеля снятый электронным микроскопом AURIGA CrossBeam с энергодисперсионным спектрометром INCA X-MAX с увеличением 20000 крат

## 2.2.2 Влияние монокристалла никеля на процесс наработки химически активных частиц

Основой технологического процесса образования радикалов и химически активных частиц в поле стримерной короны является их неравномерное распределение в объеме ионизируемой области. А именно в зоне резко неоднородного поля вблизи стримерных каналов, которые распределены, как показывают экспериментальные данные, неравномерно в межэлектродном пространстве. Но при использовании предложенного монокристалла было установлено равномерное распределение стримерных каналов по всему объему ионизируемой области в сравнении с

поликристаллическими материалами, и как следствие увеличение наработки химически активных частиц (рисунки 2.37, 2.38).

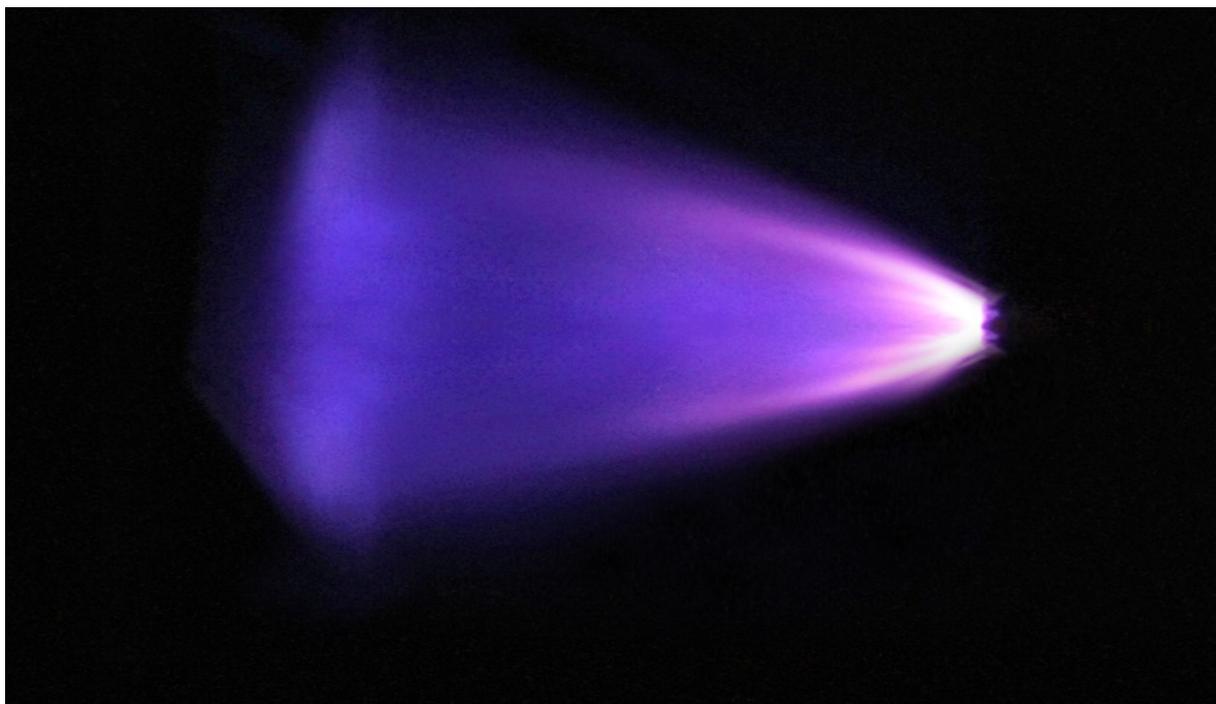


Рисунок 2.37 – Фотография ионизируемой области реакционной камеры с использованием монокристалла никеля в качестве электрода «плоскость»

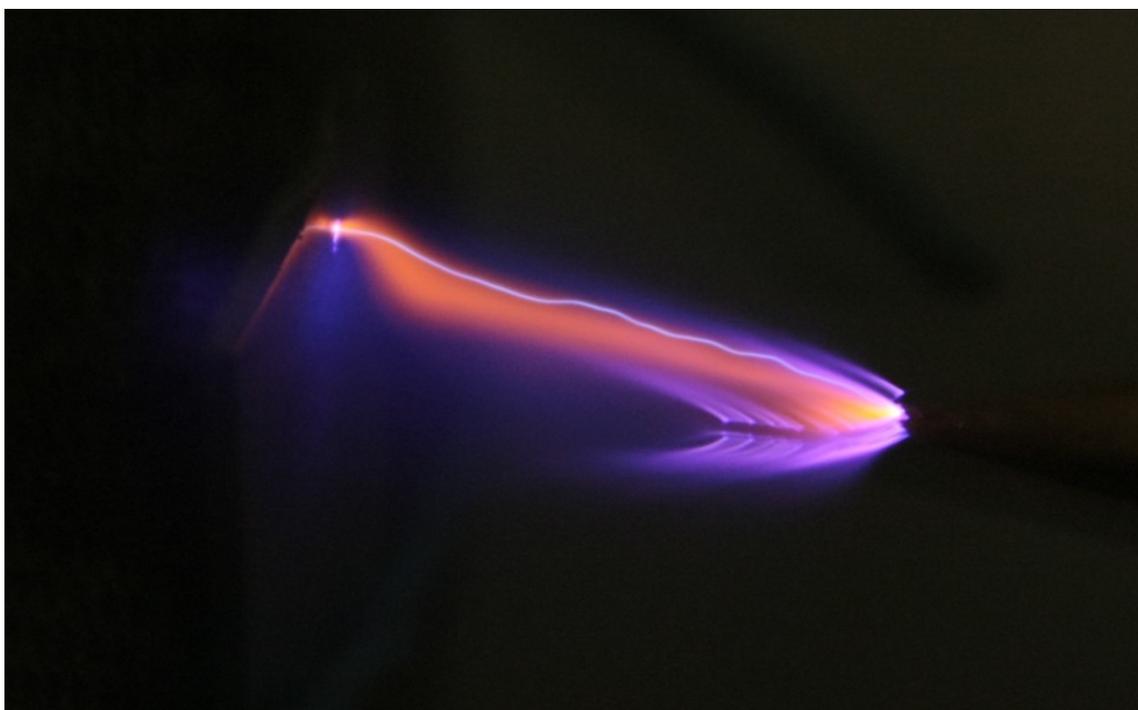


Рисунок 2.38 – Фотография ионизируемой области реакционной камеры с использованием поликристалла никеля в качестве электрода «плоскость»

В ходе экспериментальных замеров были установлены зависимости изменения концентраций  $O_3$  от энерговклада в стримерную корону. Как показано на рисунке 2.39, использование монокристаллических материалов, а именно монокристалла никеля, увеличивает на 20-25% количество вырабатываемых в рабочей зоне установки радикалов и химически активных частиц таких как  $O_3$ , что, вероятно, связано с работой выхода электрона никеля, анизотропными свойствами и геометрической структурой поверхности монокристалла.

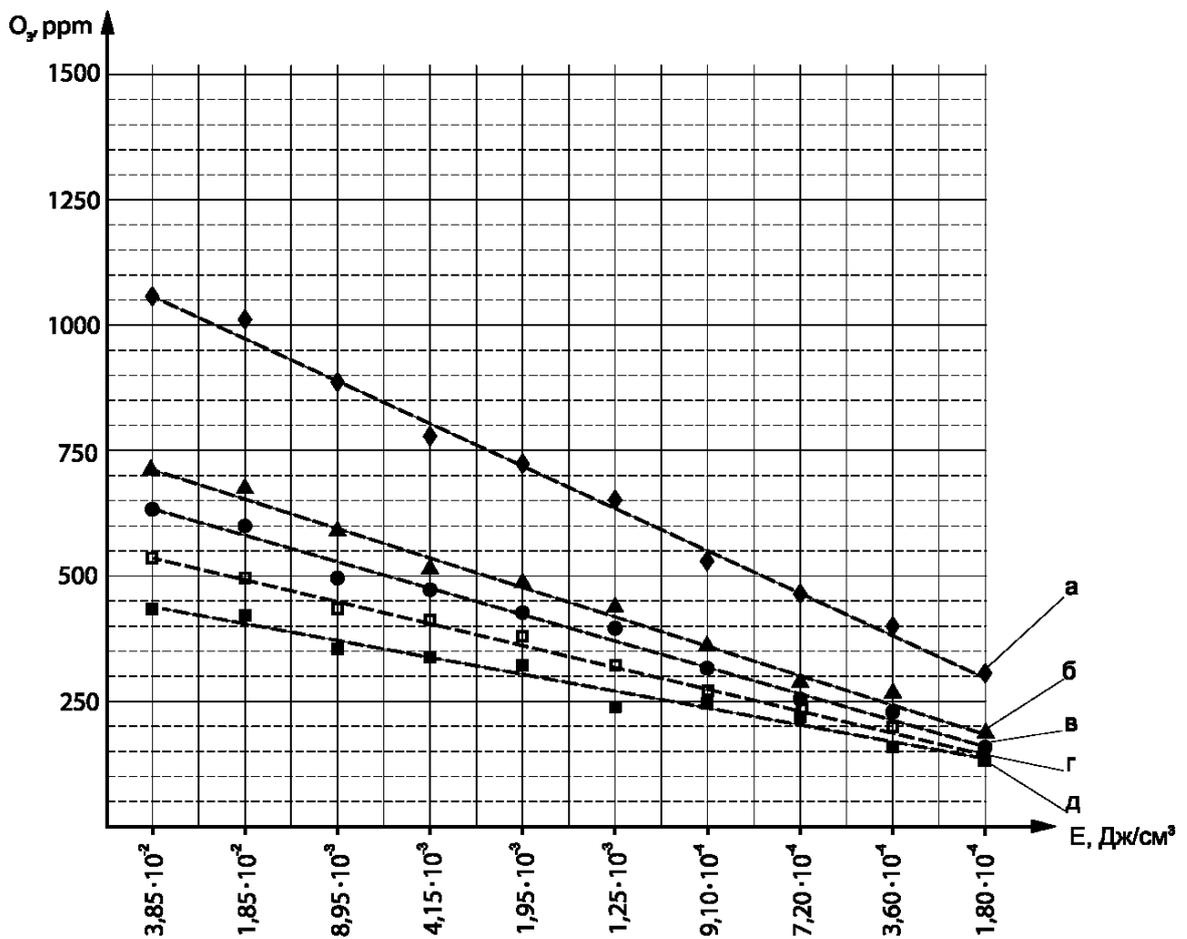


Рисунок 2.39 – Зависимости изменения концентраций  $O_3$  от энерговклада в стримерную корону для а) монокристалла никеля, б) поликристалла меди, в) поликристалла никеля, г) поликристалла железа, д) поликристалла платины

## 2.3 Выводы к главе 2

1. Используя систему электродов игла – плоскость с наименьшими расстоянием между электродами и минимальным радиусом кривизны иглы, получаем высокий уровень неоднородности поля, что позволяет получать наибольшее разрядное напряжение при наименьших энергозатратах.

2. Экспериментально установлено, что, использование монокристалла никеля в качестве электрода «плоскость» влияет на равномерное распределение стримерных каналов по объему ионизируемой области и увеличивает на 20-25% количество вырабатываемых в рабочей зоне установки радикалов и химически активных частиц таких как  $O_3$ .

## ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПРОЦЕССА КОНВЕРСИИ ГАЗОВЫХ СРЕД

### 3.1 Разработка импульсного периодического источника тока

Как известно [91-93], химически активные частицы эффективно вырабатываются при импульсном напряжении с напряженностью электрического поля выше 100 кВ/см в межэлектродном пространстве, при ограниченной длительности импульса с коротким фронтом и недопущении перехода стримерного разряда в искровой. Описанные условия можно получить, если импульс напряжения имеет прямоугольную форму, так как при использовании других различных форм импульсов происходит увеличение потребления энергии от источника и уменьшения числа стримерных каналов. Источник импульсного тока должен быть малогабаритным, экономически оправданным и технологически простым.

В высоковольтной лаборатории Казанского государственного энергетического университета нами был собран генератор Блюмляйна для исследования влияния импульсного тока на процесс наработки химически активных частиц.

Генератор Блюмляйна получен увеличением количества линий формирования импульсов (ЛФИ). ЛФИ позволяет получить высокое напряжение прямоугольных импульсов шириной меньше 1 микросекунды с плоской вершиной и быстрым временем нарастания [94]. Простая ЛФИ показана на рисунке 3.1, а. Длительность импульса  $\tau$  в два раза больше времени импульса электромагнитной волны.

Основной недостаток ЛФИ заключается в том, что на согласованной нагрузке получается импульс с в два раза меньшей амплитудой от начального напряжения, а при быстром заряде линии часть напряжения пропускается на нагрузку до момента включения генератора. Эти недостатки преодолены в линии Блюмляйна.

У классического генератора Блюмляйна (рисунок 3.1, б), использующего две линии, которые соединены последовательно, выходное напряжение соответствует зарядному напряжению.

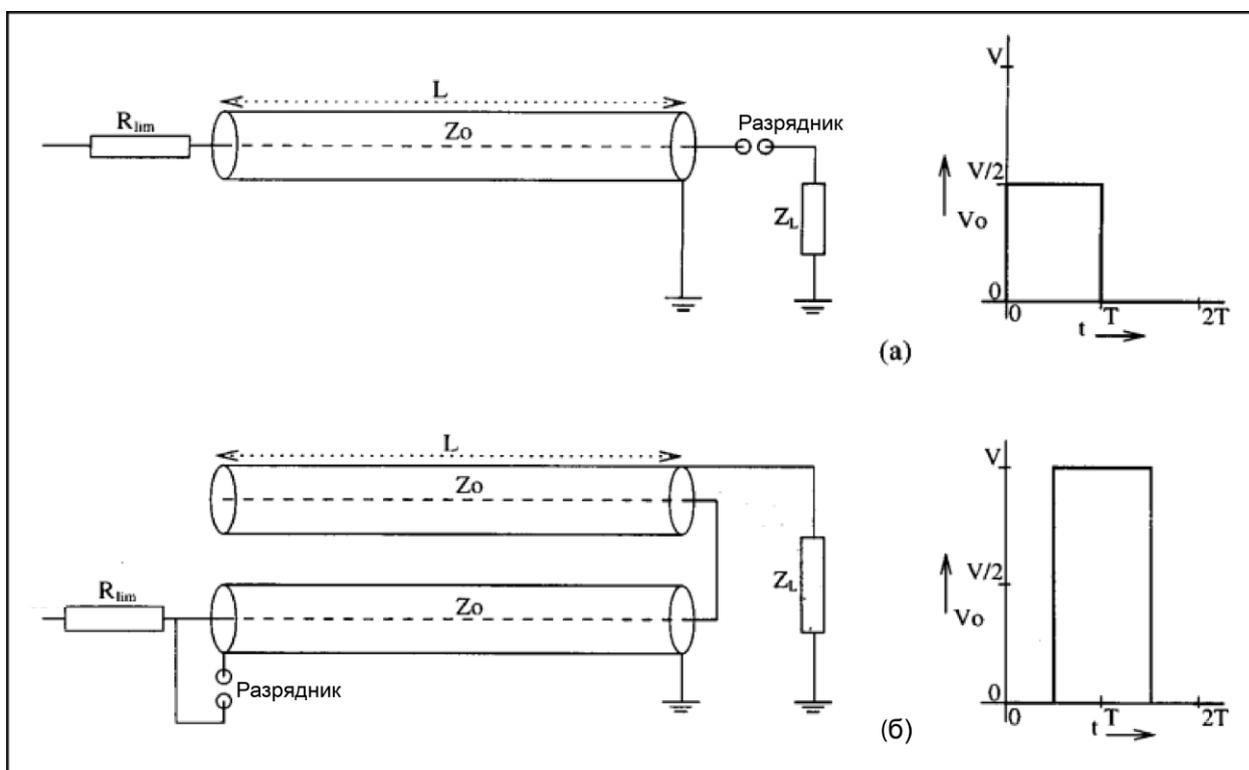


Рисунок 3.1 – Схемы и выходные сигналы с согласованной нагрузкой:

а) простая линия формирования импульса; б) генератора Блюмляйна

Для получения импульсов требуемой длительности нами был использован генератор, выполненный по схеме Блюмляйна с четырьмя линиями из коаксиального кабеля (рисунок 3.2). Для зарядки генератора использовался регулируемый высоковольтный источник питания постоянного тока типа ВИП-04 (рисунок 3.3), собранный по схеме умножения. Положительный выход генератора был заземлен, а отрицательный подключен к шаровому разряднику –  $P_2$ .

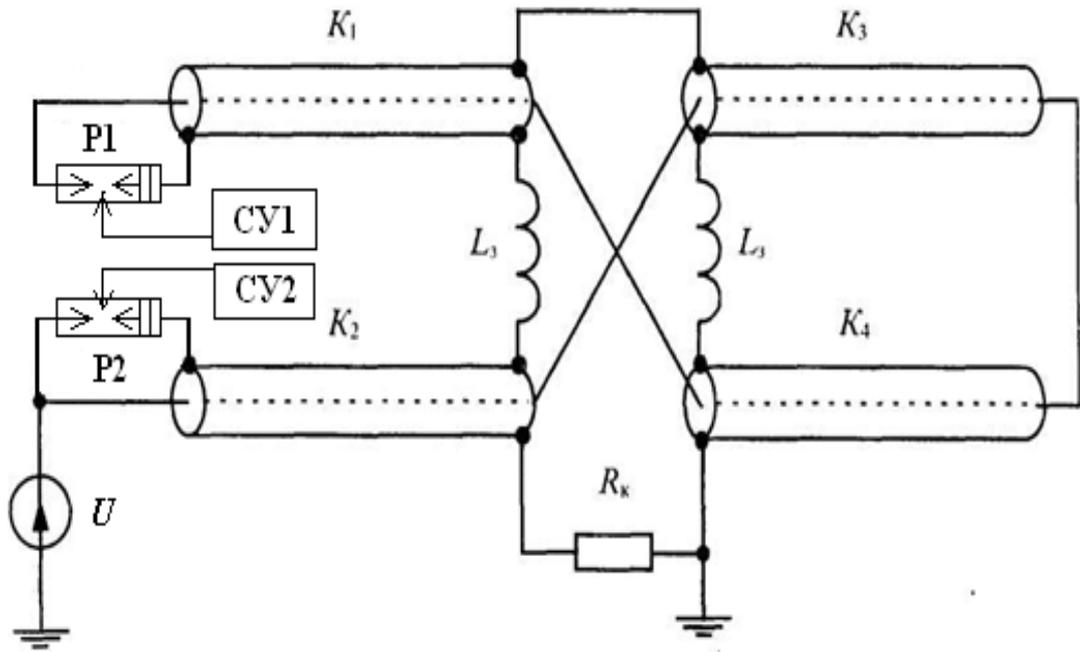


Рисунок 3.2 – Схема кабельного генератора наносекундных импульсов, собранного по схеме Блюмляйна

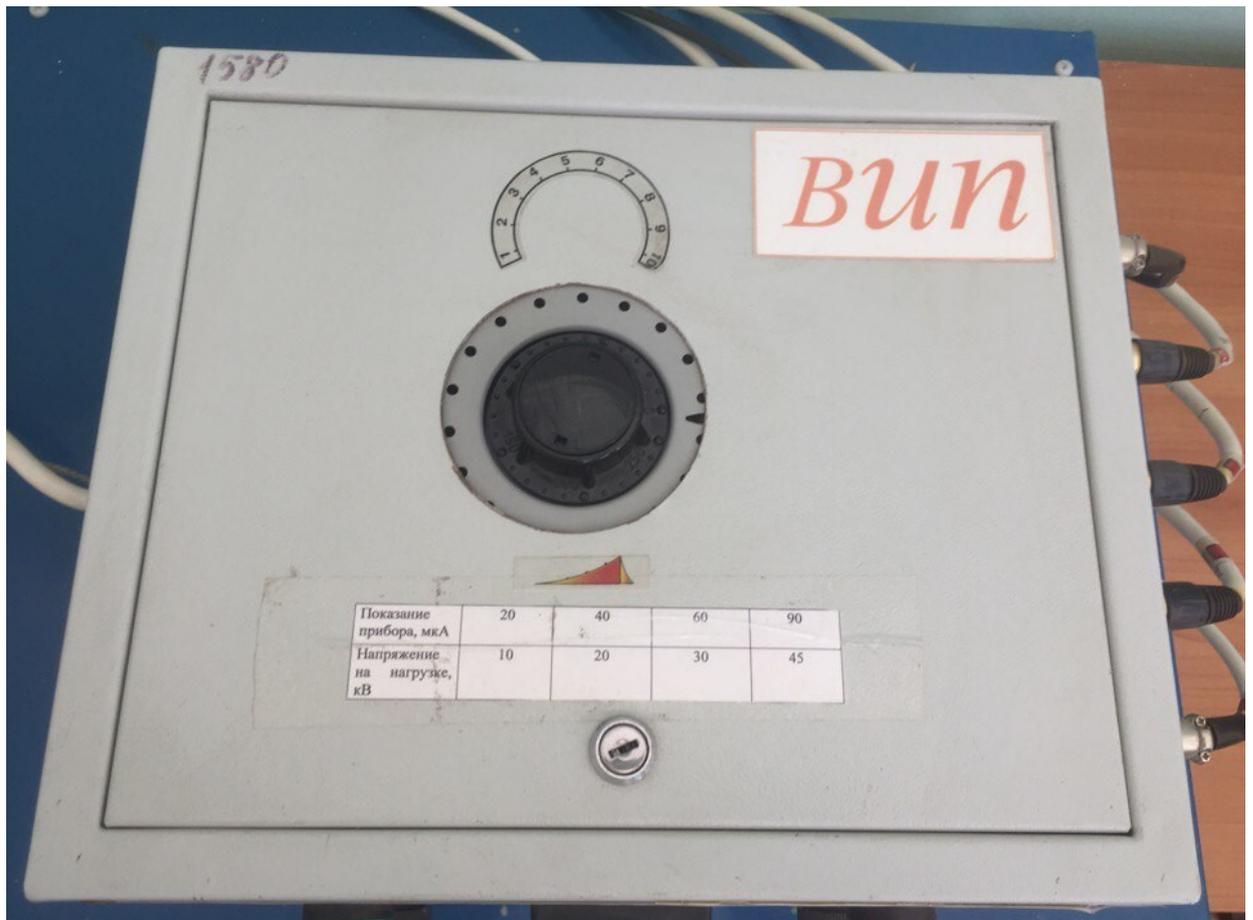


Рисунок 3.3 – Регулируемый высоковольтный источник питания постоянного тока типа ВПН-04

Экспериментальный образец генератора импульсных напряжений (ГИН), выполненного по схеме Блюмляйна (рисунок 3.4), сделан из кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, рассчитанной на напряжение 110 кВ с волновым сопротивлением порядка 35 Ом. Однако, габариты данного генератора не позволяют применять его в помещениях для очистки газовой среды, а также данный генератор не позволяет получать обратные импульсы напряжения.



Рисунок 3.4 – Экспериментальный ГИН с шаровыми разрядниками

Для создания асимметричного переменного электрического поля был применен источник асимметричного периодического высокого напряжения (ИАПВН), разработанный в высоковольтной лаборатории КГЭУ, позволяющий управлять распределением напряженности поля и плотностью объемного заряда в рабочем объеме реакционной камеры (рисунки 3.5, 3.6, 3.7).

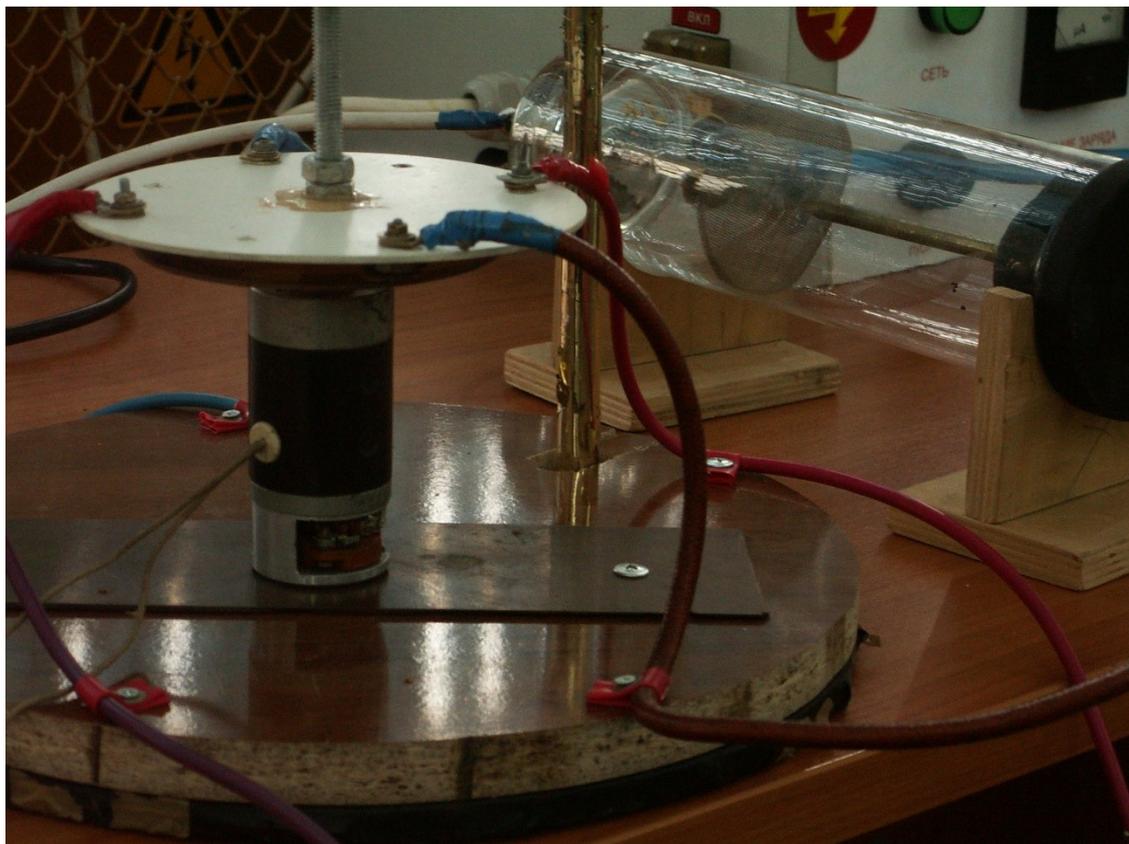


Рисунок 3.5 – Экспериментальный источник асимметричного периодического высокого напряжения

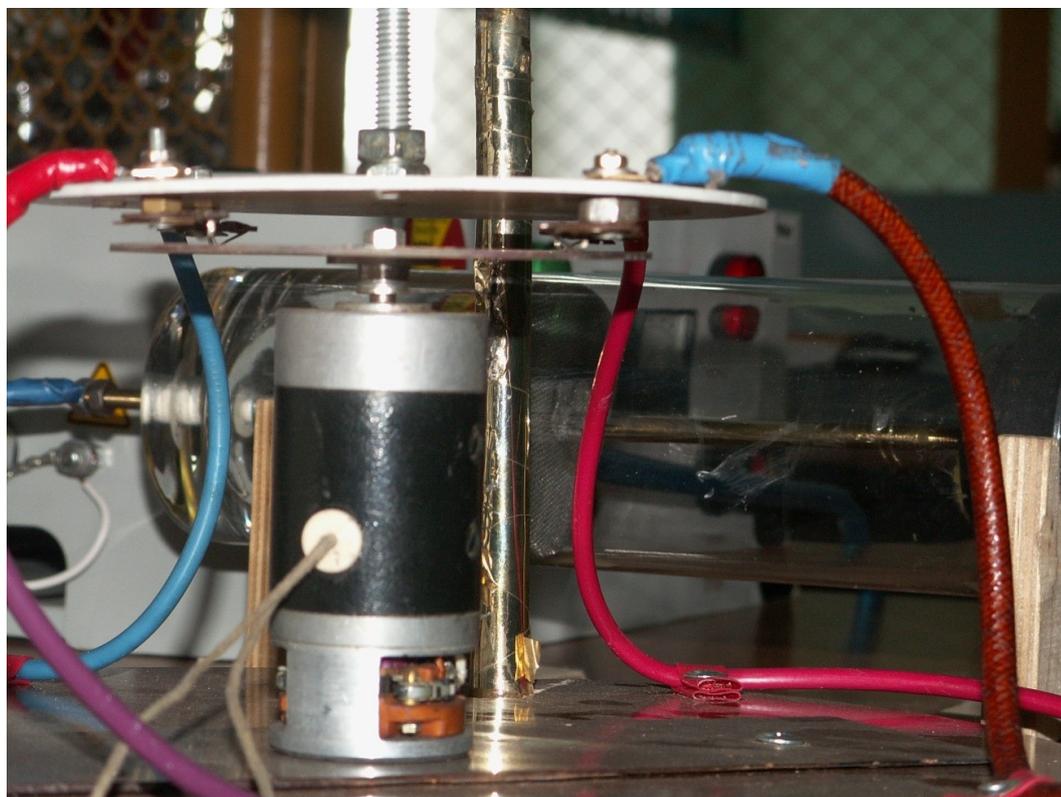


Рисунок 3.6 – Экспериментальный источник асимметричного периодического высокого напряжения

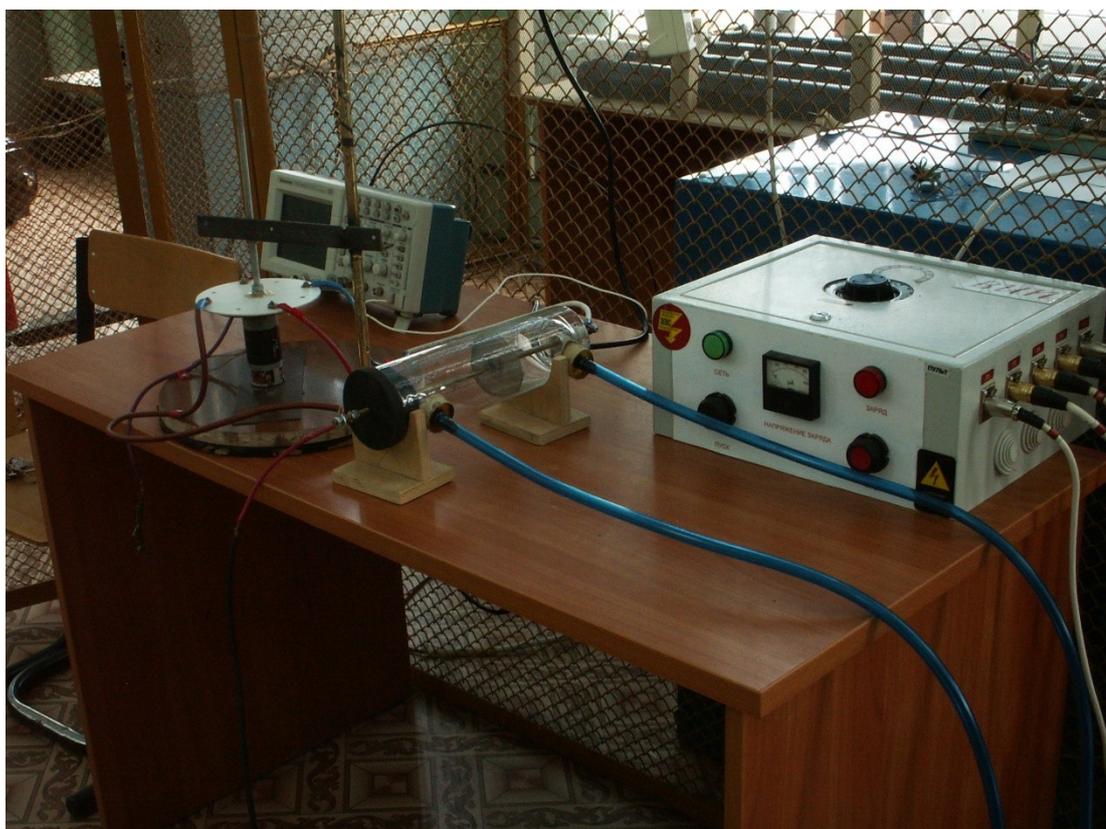


Рисунок 3.7 – Экспериментальный источник асимметричного периодического высокого напряжения с реакционной камерой и ВИП

Источник асимметричного периодического высокого напряжения (рисунок 3.8) работает следующим образом: электропривод 6 задает угловую скорость диска с проводящими пластинами 3. При этом два скользящих токосъемника 2 присоединены к отрицательному и положительному выводам источника высокого напряжения 7. Токосъемники коммутируют поочередно клеммы электродной системы «игла – плоскость», расположенной в реакционной камере (РК). При этом происходит смена полярности приложенного напряжения.

Аналогом данного генератора будет являться схема с генератором импульсных напряжений, форма и длительность импульсов которого регулируется через преобразователь (силовые ключи) и блок управления (рисунок 3.9). Нами был собран преобразователь (рисунок 3.10) для исследования влияния импульсного тока на процесс наработки химически активных частиц.

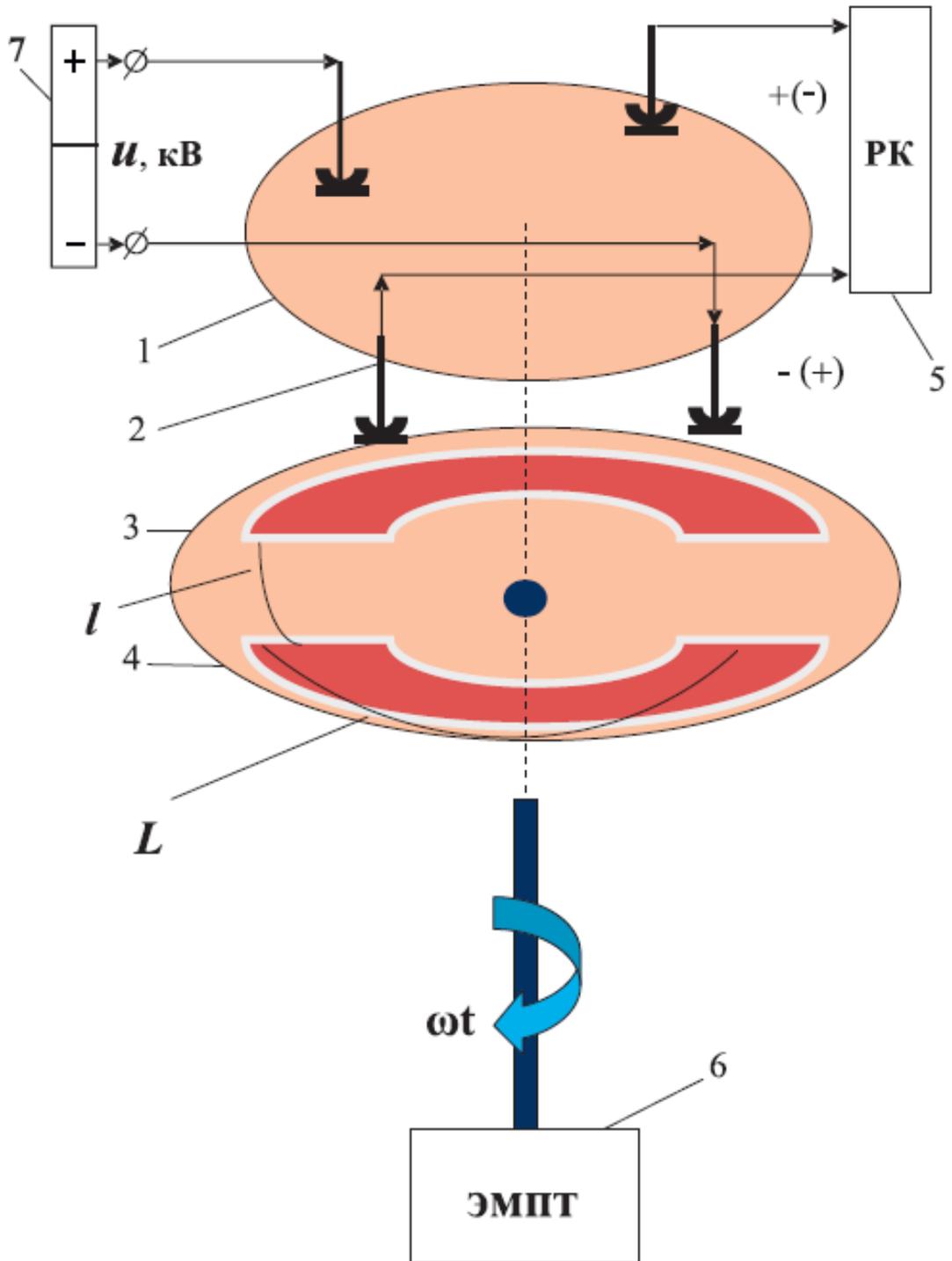


Рисунок 3.8 – Источник асимметричного периодического напряжения 1 – диэлектрический диск; 2 – скользящие токосъемники; 3 – вращающийся диск с токопроводящими пластинами; 4 – контактирующие пластины; 5 – реакционная камера; 6 – электропривод для регулирования вращения диска; 7 – высоковольтный источник постоянного напряжения;  $l$  – длина между пластинами,  $L$  – длина пути контактной поверхности пластин

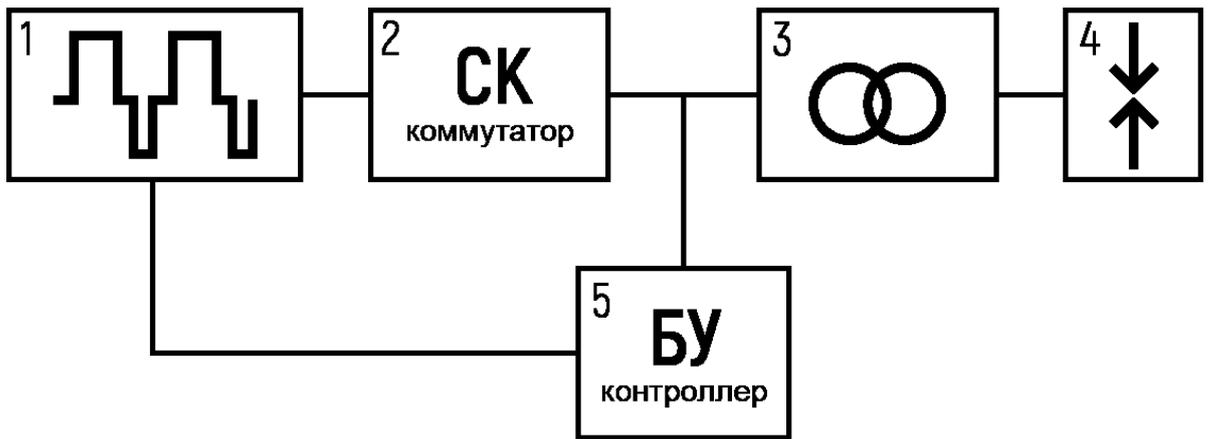


Рисунок 3.9 – Схема с генератором импульсных напряжений:

1 – генератор импульсных напряжений; 2 – силовой электронный ключ;

3 – высоковольтный трансформатор (типа ТВС-110);

4 – реакционная камера; 5 – блок управления

Схема преобразователя (рисунок 3.11) состоит из силового однофазного трансформатора, фазосдвигающей цепи, формирователей импульсов и выпрямителя.



Рисунок 3.10 – Генератор импульсно-периодического тока с преобразователем и блоком управления

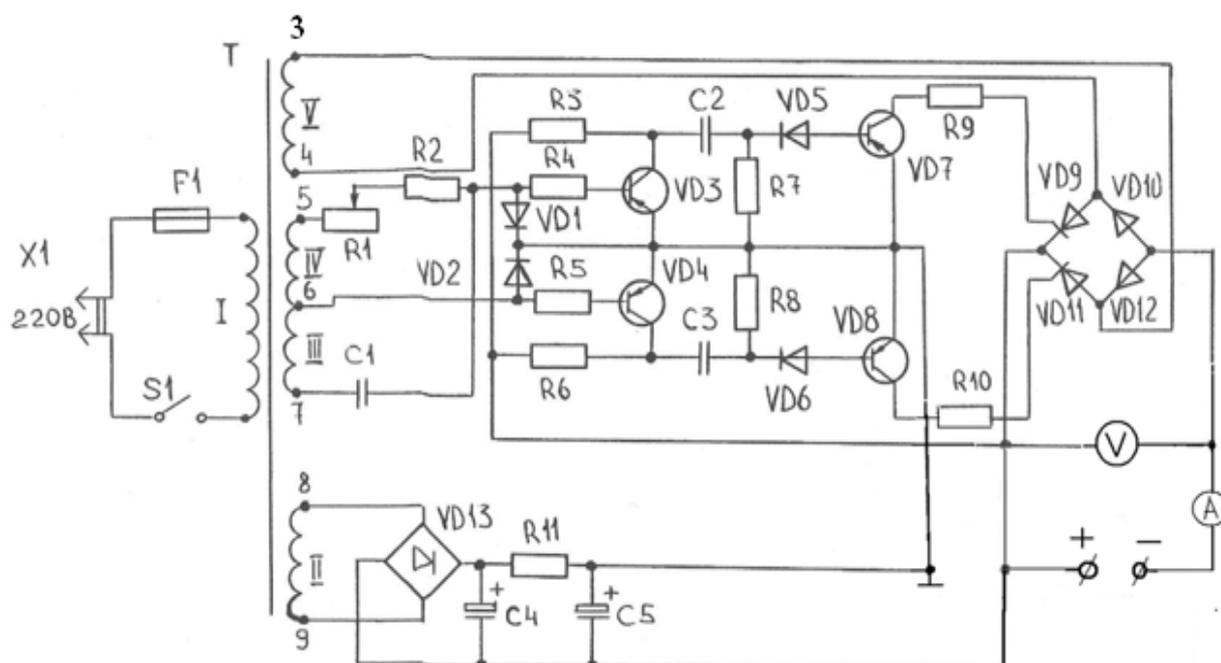


Рисунок 3.11 – Электрическая схема преобразователя пульсирующего тока

3.2 Определение оптимальных энергетических параметров источника периодического импульсного тока для повышения эффективности процесса наработки химически активных частиц режимами стримерной короны

Посредством выше описанных генераторов импульсных напряжений были получены осциллограммы импульсных напряжений различных форм и произведен сравнительный анализ наработки химически активных частиц при изменении параметров импульсного напряжения.

При использовании схемы кабельного генератора наносекундных импульсов, собранного по схеме Блюмляйна были получены осциллограммы, изображенные на рисунках 3.12 и 3.13.

Параметры полученные в результате использования схемы кабельного генератора наносекундных импульсов, собранного по схеме Блюмляйна:

- частота – 500 кГц;
- напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве – 150-200 кВ/см;

- задержка между двумя микроразрядами  $< 0,06$  мкс.
- Диапазон амплитуд импульсных напряжений ( $U^+$ ,  $U^-$ ) – 5-12 кВ;
- Отношение длительностей положительного и отрицательного импульса  $\tau^+/\tau^-$  отсутствует.

При использовании источника асимметричного периодического высокого напряжения были получены осциллограммы, изображенные на рисунках 3.14 и 3.15.

- частота – 5-500 кГц;
- напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве – 120-150 кВ/см;
- задержка между двумя микроразрядами  $< 0,06$  мкс.
- Диапазон амплитуд импульсных напряжений ( $U^+$ ,  $U^-$ ) – 5-12 кВ;
- Отношение длительностей положительного и отрицательного импульса  $\tau^+/\tau^- \sim 2-4$ .

При использовании генератора импульсных напряжений с преобразователем и блоком управления были получены осциллограммы, изображенные на рисунках 3.16 и 3.17.

- частота – 5-500 кГц;
- напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве – 150-250 кВ/см;
- задержка между двумя микроразрядами  $< 0,06$  мкс.
- Диапазон амплитуд импульсных напряжений ( $U^+$ ,  $U^-$ ) – 5-12 кВ;
- Отношение длительностей положительного и отрицательного импульса  $\tau^+/\tau^- \sim 2-4$ .
- Возможность регулировать амплитуду отрицательного импульса при сохранении положительного.

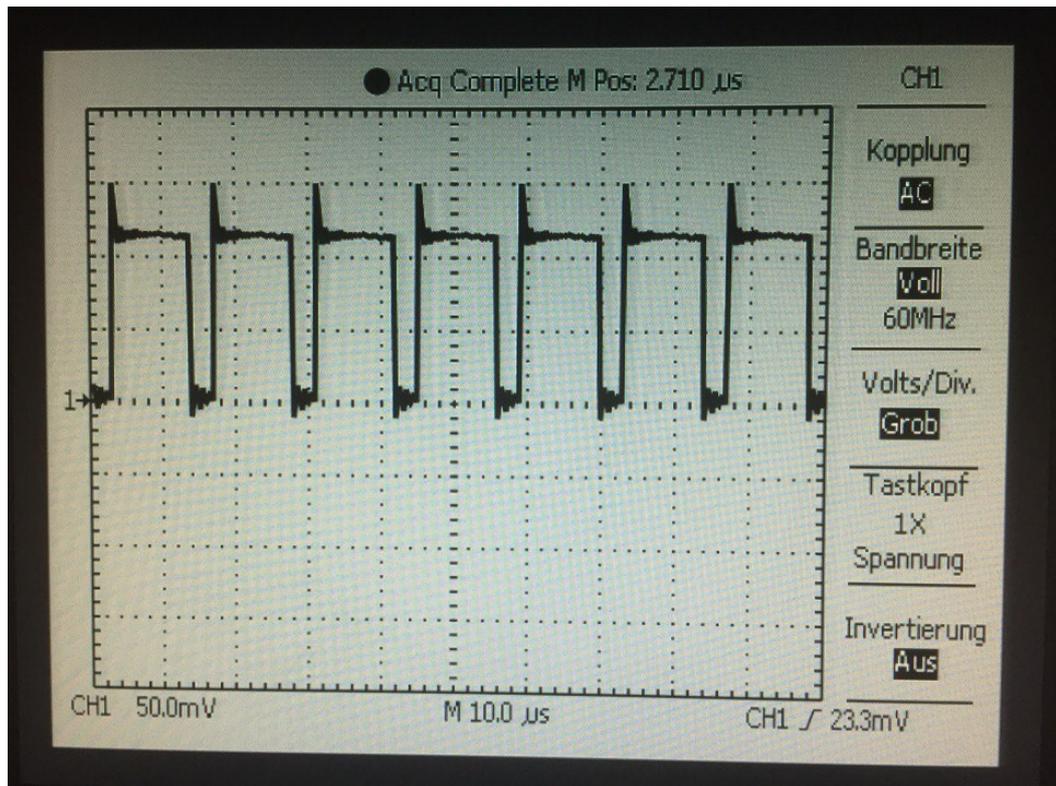


Рисунок 3.12 – Осциллограмма импульсного напряжения, полученного при использовании схемы кабельного генератора наносекундных импульсов, собранного по схеме Блюмляйна

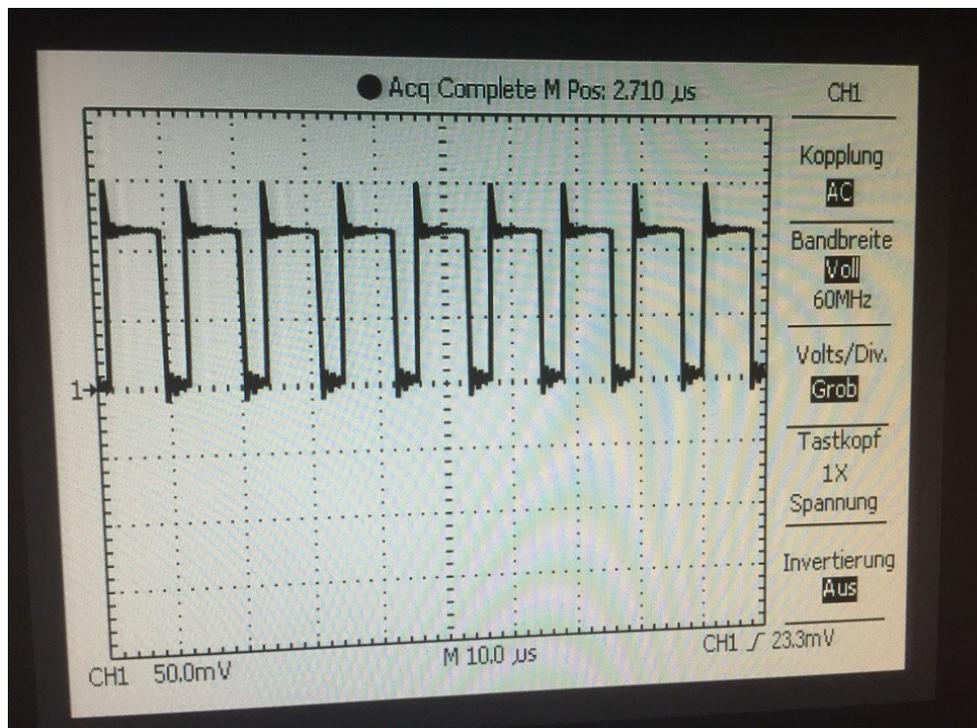


Рисунок 3.13 – Осциллограмма импульсного напряжения, полученного при использовании схемы кабельного генератора наносекундных импульсов, собранного по схеме Блюмляйна

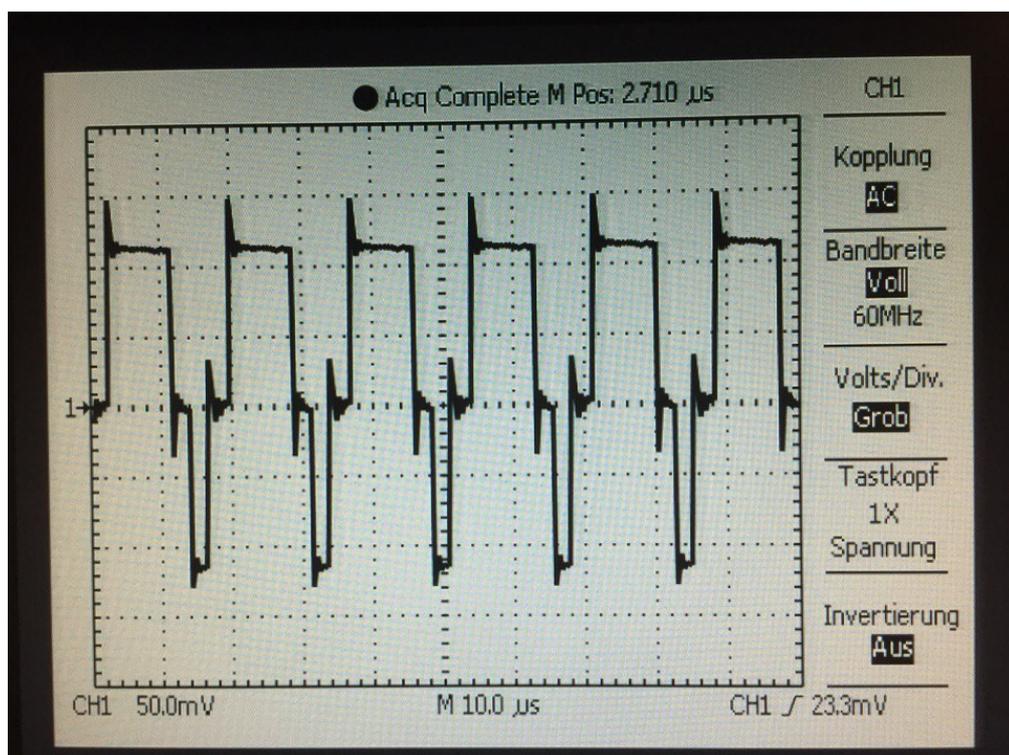


Рисунок 3.14 – Осциллограмма импульсного напряжения, полученного при использовании источника асимметричного периодического высокого напряжения

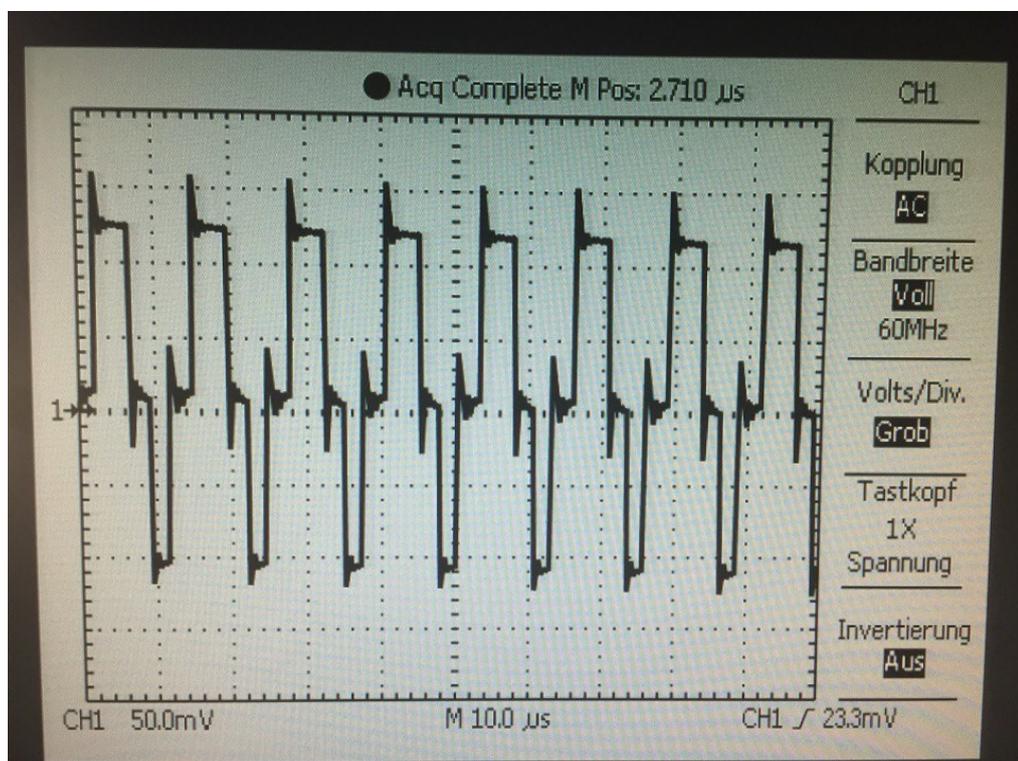


Рисунок 3.15 – Осциллограмма импульсного напряжения, полученного при использовании источника асимметричного периодического высокого напряжения

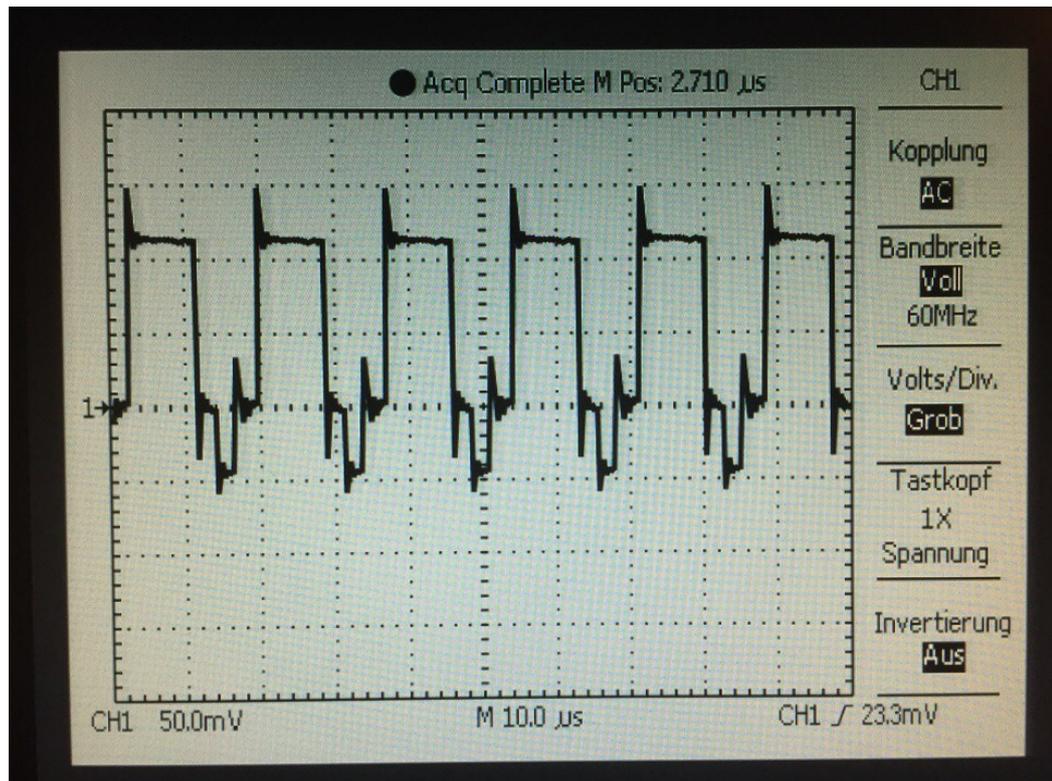


Рисунок 3.16 – Осциллограмма импульсного напряжения, полученного при использовании генератора импульсных напряжений с преобразователем и блоком управления

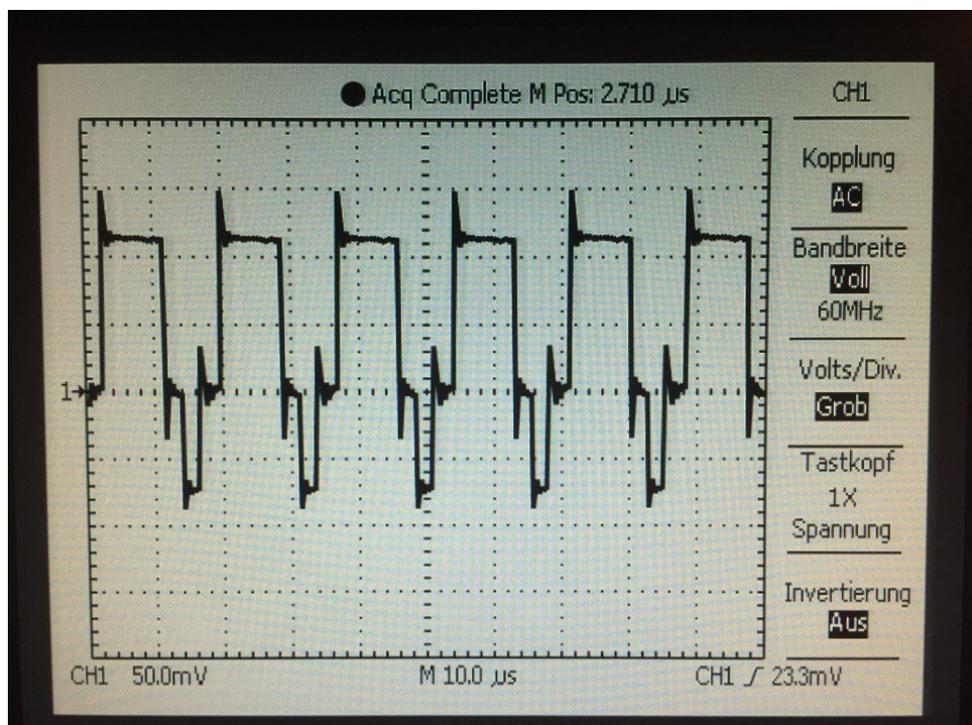


Рисунок 3.17 – Осциллограмма импульсного напряжения, полученного при использовании генератора импульсных напряжений с преобразователем и блоком управления

Как видно из рисунков 3.12-3.17 полученные формы напряжений удовлетворяют общим требованиям эффективной наработки химически активных частиц и радикалов в ионизируемой области, а именно, ограниченные длительности импульса с коротким фронтом, недопущение перехода стримерного разряда в искровой и прямоугольная форма импульсов напряжений.

Нами было проведено исследование влияния каждой из полученных форм напряжения на количество нарабатываемых в реакционной камере химически активных частиц, а именно,  $O_3$ .

Исходя из полученных данных (рисунок 3.18), нами были сформулированы условия которые должны создавать импульсные источники высокого напряжения для эффективной выработки активных химических частиц при наименьшем потреблении энергии от импульсного источника, а именно (рисунок 3.19):

- регулируемая частота – 5-500 кГц;
- большой диапазон регулируемой напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве;
- регулирование конверсии частотой импульсов (задержка между двумя микрозарядами  $< 0,06$  мкс, что меньше времени распада радикалов (10-100 мкс));
- Диапазон амплитуд импульсных напряжений ( $U^+$ ,  $U^-$ ) – 5-12 кВ;
- Отношение длительностей положительного и отрицательного импульса  $\tau^+/\tau^- \sim 2-4$ .

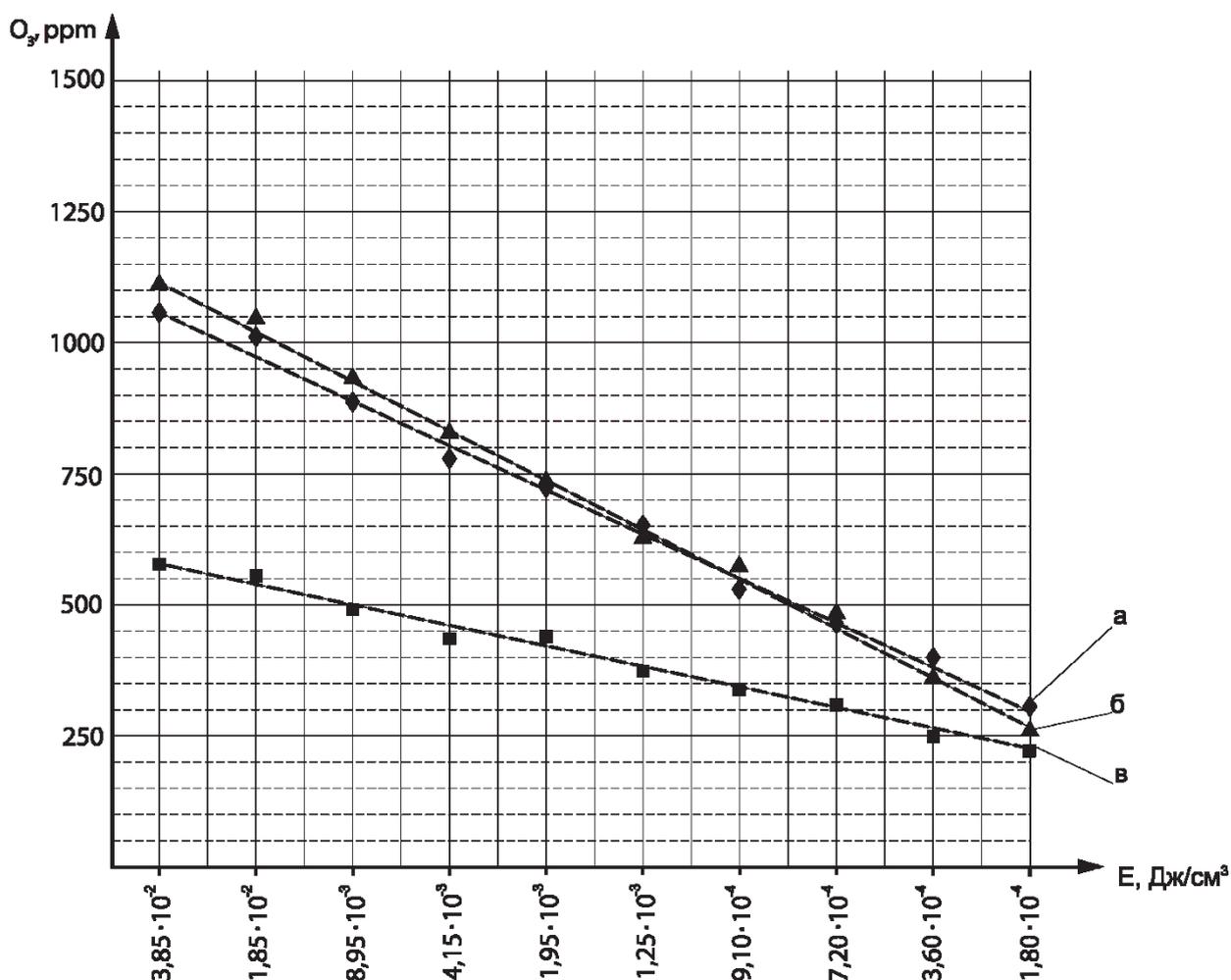


Рисунок 3.18 – Зависимости изменения концентраций  $O_3$  от энерговклада в стримерную корону для форм напряжений, полученных при использовании а) источника асимметричного периодического высокого напряжения, б) генератора импульсных напряжений с преобразователем и блоком управления, в) при использовании схемы кабельного генератора наносекундных импульсов, собранного по схеме Блюмляйна

Такие параметры источника позволяют производить достаточное количество радикалов и химически активных частиц для конверсии газовой смеси при следующих параметрах: расход газа 250-2500 л/мин, длина реакционной камеры – 230 мм, диаметр – 105 мм.

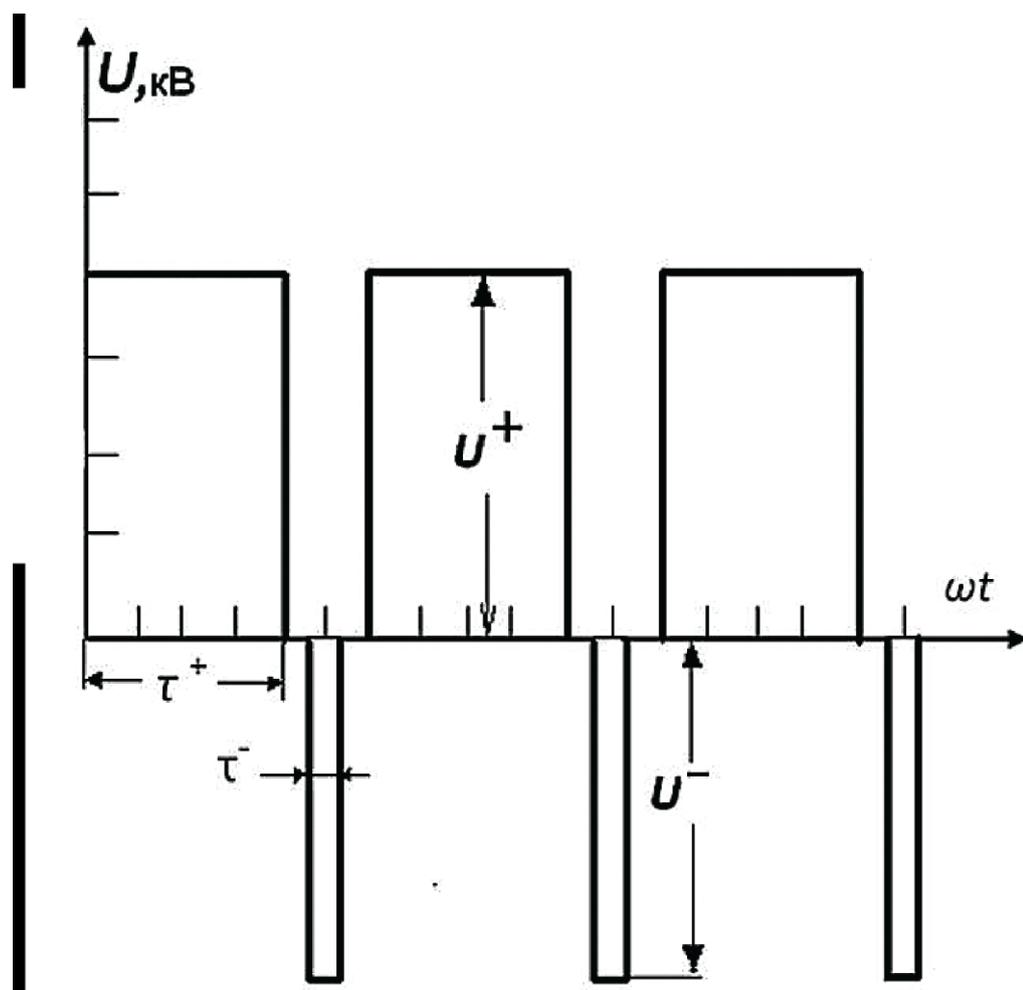


Рисунок 3.19 – Форма импульсного напряжения для эффективного процесса наработки химически активных частиц, где  $\tau^+$ ,  $\tau^-$  – длительности положительного и отрицательного импульса соответственно,  $U^+$ ,  $U^-$  – положительная и отрицательная амплитуды импульсных напряжений

### 3.3 Особенности влияния температуры и давления на процесс наработки химически активных частиц

В электрическом разряде значительная часть электрической энергии преобразуется в тепловую энергию, нагревая очищаемый газ, что приводит к снижению выработки радикалов и химически активных частиц за счет их распада при повышенной температуре [63].

Существуют и широко применяются устройства с принудительными водяными и воздушными способами охлаждения озонаторов. Такой подход

позволяет увеличить их производительность, но при этом усложняется конструкция, технологический процесс, а также капитальные и энергетические затраты.

При теоретическом рассмотрении задачу понижения температуры в реакционной камере можно решить, опираясь на эффект Джоуля-Томпсона, основанного на протекании газа сквозь дроссель (местное резкое сужение в канале (рисунок 3.20)) при постоянном перепаде давлений [95-97].

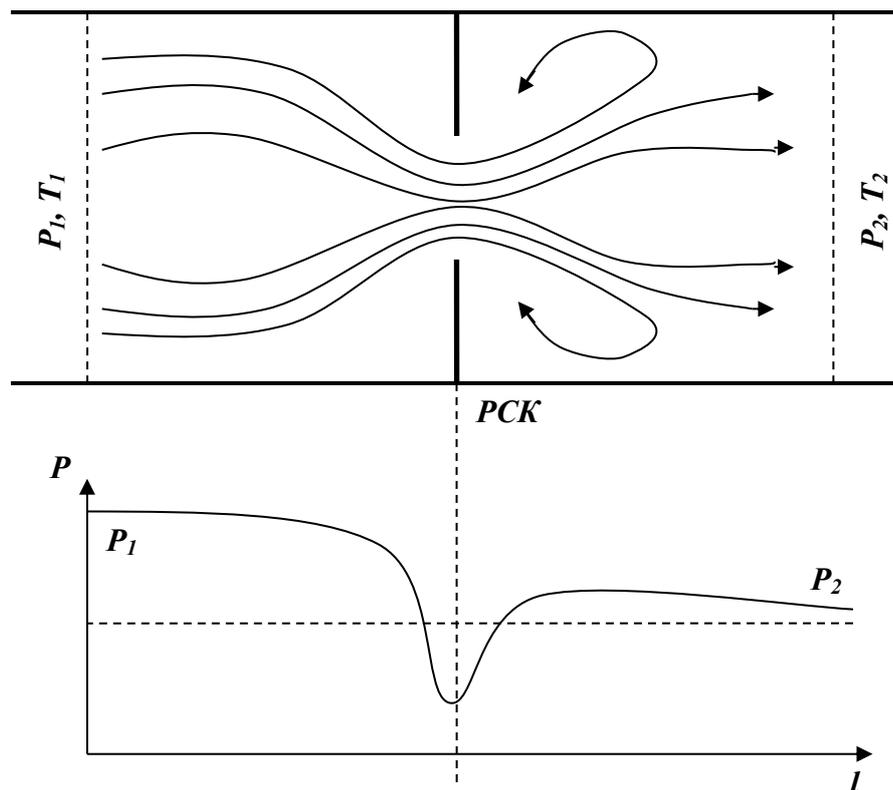


Рисунок 3.20 – а) модель реакционной камеры с местным резким сужением в канале (PCK); б) график изменения давления по длине реакционной камеры

Газ продавливается через пористую перегородку из области с высоким давлением  $P_1$  в область с низким давлением  $P_2$  (часто  $P_1 \gg P_2$ ). При этом обычно  $V_2 \gg V_1$ . При адиабатическом процессе дросселирование дает неравенство температур  $T_1 \neq T_2$ . При комнатной температуре ( $T_K \sim 300\text{K}$ ) для всех газов, кроме водорода  $\text{H}_2$  и гелия  $\text{He}$ , получаем охлаждение газа при прохождении через пористую перегородку:  $T_1 > T_2$ . Физическая причина изменения температуры – «трение» газа в дросселе, иначе говоря, наличие

взаимодействия между молекулами. Следовательно, изменение температуры справедливо только для реальных газов, молекулы которого взаимодействуют между собой.

Итак, на входе и выходе получаем разность температур  $\Delta T = T_2 - T_1$ , при этом говорят, что если:

$\Delta T < 0$  – то имеем положительный эффект Джоуля-Томсона,

$\Delta T > 0$  – то имеем отрицательный эффект Джоуля-Томсона.

Согласно эффекту Джоуля-Томпсона при математическом моделировании принимаем следующие допущения:

1. Изменение внутренней энергии газа  $\Delta E$  равно механической работе, производимой над газами:

$$\Delta E = E_2 - E_1, \quad (3.1)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  соответственно энергия газа в начальном и конечном состояниях.

Тогда

$$\Delta E = - \left( \int_{V_1}^0 p_1 dV + \int_0^{V_2} p_2 dV \right) = (p_2 V_2 - p_1 V_1), \quad (3.2)$$

$$E_1 + p_1 V_1 = E_2 + p_2 V_2 \text{ или } H_1 = H_2 = \text{const}, \quad (3.3)$$

где  $H$  – энтальпия газа.

2. Уравнение состояния газа Ван-дер-Ваальса:

$$\left( p + \frac{av^2}{V_m^2} \right) (V_m - bv) = vRT, \quad (3.4)$$

где  $p$  – давление,  $V_m$  – молярный объем,  $v$  – количество молей газа,  $T$  – абсолютная температура,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

3. Вычисление концентраций активных компонентов в струйном канале определяется приближенным способом основанным на введении G-факторов. Концентрация  $i$ -ого компонента определяется:

$$n_i = \frac{\sum_j G_{ij} x_j w_{st}}{100}, \quad (3.5)$$

где  $G_{ij}$  – количество частиц  $i$ , полученных из молекул  $j$  на 100 эВ электрической энергии;  $w_{st}$  – энергия на единицу объема стримерного канала, необходимая для образования активных компонентов;  $x_j$  – мольная доля  $j$ -го компонента.

Разность температур определим по формуле:

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p - V}{C_v}, \quad (3.6)$$

где  $C_v$  – молярная теплоемкость при постоянном объеме. Воспользовавшись тождеством:

$$\left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = - \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_V = - \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_V / \left( \frac{\partial p}{\partial V} \right)_T, \quad (3.7)$$

преобразуем формулу (3.6) к виду:

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = - \frac{T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_V + V \left( \frac{\partial p}{\partial V} \right)_T}{C_v \left( \frac{\partial p}{\partial V} \right)_T}. \quad (3.8)$$

Из уравнения Ван-дер-Ваальса получим:

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{\frac{bRT}{(V-b)^2} - \frac{2a}{V^2}}{C_v \left( \frac{\partial p}{\partial V} \right)_T}. \quad (3.9)$$

Из уравнения Клапейрона, при условии  $H = \text{const}$ :

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{1}{C_v + R} \left[ RT_1 \frac{b}{V-b} - \frac{2a}{V} \right]. \quad (3.10)$$

Тепло, выделяющееся в микрозаряде:

$$Q_p = UI\tau_p = T_1 C m, \quad (3.11)$$

где  $C$  – удельная теплоемкость газа,  $m$  – масса газа. Следовательно, разность температур:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{1}{C_v + R} \left[ \frac{RUI\tau_p b}{C_m(V-b)} - \frac{2a}{V} \right]. \quad (3.12)$$

Зависимость температуры  $T_1$  от объема  $V_1$  изображена на рисунке 3.21. Вдоль этой кривой  $T = T(V_1)$  эффект отсутствует. При обычных условиях  $V_1 \gg b$ , тогда изменение знака эффекта Джоуля – Томсона происходит при температуре, называемой *температурой инверсии*:

$$T_i = \frac{2a}{Rb}. \quad (3.13)$$

Подставив параметры конкретного газа, можно получить температуру инверсии для каждого газа. И если эффект Джоуля – Томсона происходит при температурах выше температуры инверсии, то имеем возрастание температуры при протекании газа:  $\Delta T > 0$ . Наоборот, при температурах ниже  $T_i$ , получаем  $\Delta T < 0$  (рисунок 3.21).

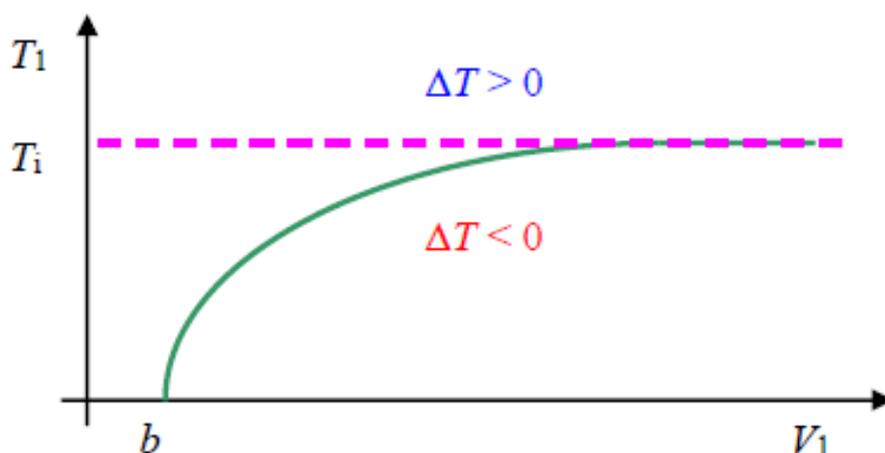


Рисунок 3.21 – Зависимость температуры  $T_1$  от объема  $V_1$

Температура инверсии связано с критической температурой  $T_{кр}$ :

$$T_i = 6.75 \cdot T_{кр}. \quad (3.14)$$

Для большинства газов температура инверсии  $T_i > 300\text{K}$ . Для легких газов водорода  $\text{H}_2$  и гелия  $\text{He}$  –  $T_i < 300\text{K}$ , а именно:

$$T_i(\text{He}) = 50\text{K},$$

$$T_i(\text{H}_2) = 200\text{K}.$$

Например, для других газов имеем:

$$T_i(\text{O}_2) = 1063\text{K},$$

$$T_i(\text{CO}_2) = 2073\text{K}.$$

Можно построить зависимость  $\Delta T = \Delta T(T_1)$  из соотношения (3.12) при постоянном объеме  $V_1$ , которая изображена на рисунке 3.22.

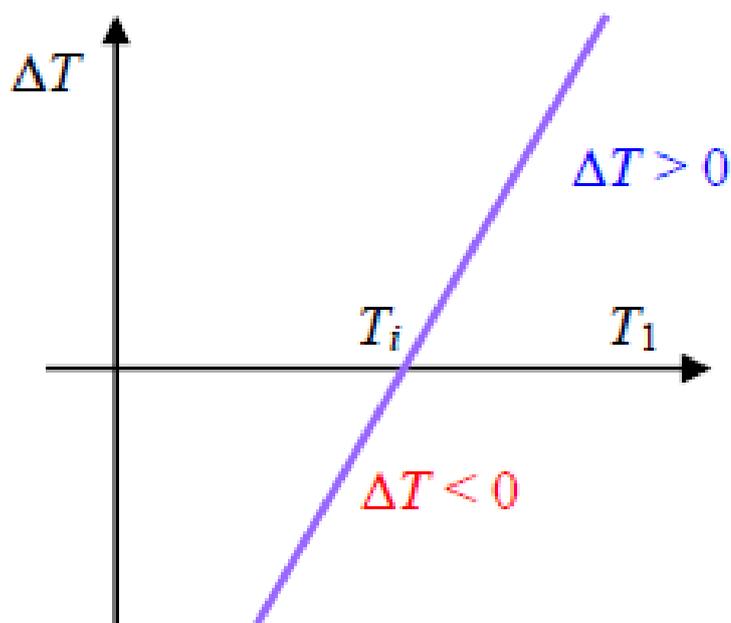


Рисунок 3.22 – Зависимость  $\Delta T = \Delta T(T_1)$  при постоянном объеме  $V_1$

Так как для группы экологически вредных газов температура инверсии лежит в области  $T_i > 1063$  °К, следовательно, эффект Джоуля-Томпсона будет работать на понижение температуры при  $\Delta T < 0$ .

Таким образом, математическая модель показывает, что применение дросселя в реакционной камере ведет к снижению температуры газов и, соответственно, к увеличению выработки радикалов и химически активных частиц таких как  $\text{O}_3$ .

### 3.4 Разработка физической модели реакционной камеры устройства очистки газовых сред

Для подтверждения математической модели, описанной в главе 3.3 нами была разработана, испытана и запатентована [98] конструкция реакционной камеры с дросселем.

Устройство очистки газовых сред (рисунок 3.23) состоит из источника высокого напряжения 1 (5-15 кВ), к которому подключены положительный 2 и отрицательный 3 электроды, размещенные в диэлектрической реакционной камере 4, с входным каналом 5 и выходным каналом 6. Отрицательный электрод 3 выполнен в виде иглы с возможностью регулирования по длине, а между положительным 2 и отрицательным 3 электродами расположен дроссель 7.

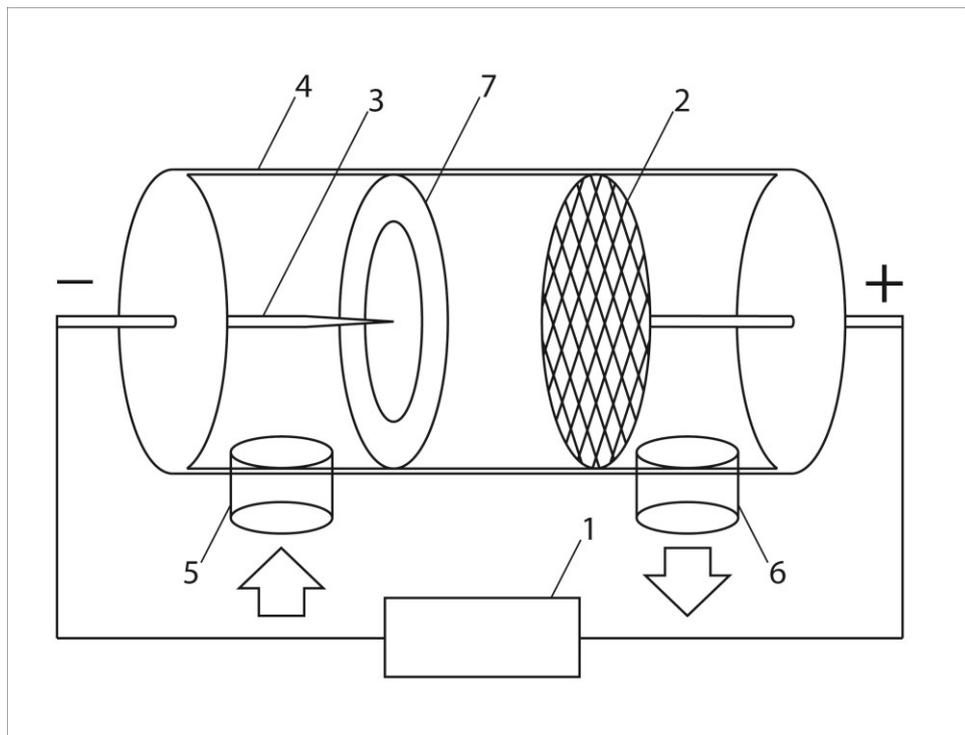


Рисунок 3.23 – Структурная схема устройства очистки газовых сред:

- 1 – источник высокого напряжения; 2 – положительный электрод;  
 3 – отрицательный электрод; 4 – диэлектрическая реакционная камера;  
 5 – входной канал; 6 – выходной канал; 7 – дроссель

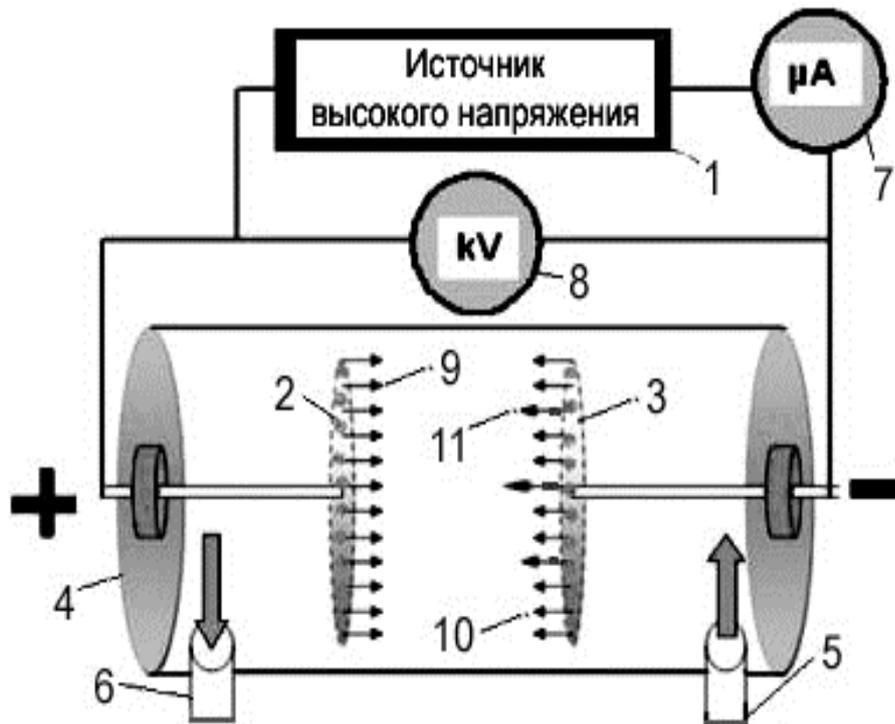


Рисунок 3.24 – Устройство очистки газовых сред: 1 – Источник высокого напряжения; 2 – Положительный электрод; 3 – Отрицательный электрод; 4 – Диэлектрическая реакционная камера; 5 – Входной канал; 6 – Выходной канал; 7 – Миллиамперметр; 8 – Киловольтметр; 9 – Электропроводящие иглы положительного электрода

Прототипом является устройство очистки газовых сред (патент RU 144782 от 27.08.2014). Технический результат прототипа достигается тем, что в устройстве очистки газовых сред (рисунок 3.24), содержащем источник высокого напряжения 1, к положительному и отрицательному полюсам которого подключены соответственно положительный 2 и отрицательный 3 электроды, помещённые в диэлектрическую реакционную камеру 4, имеющей входной канал подачи газовой среды 5, загрязненной вредными примесями, и выходной канал очищенной газовой среды 6, согласно разработанному устройству, положительный и отрицательный электроды выполнены в виде металлической сетки. При этом на обращенных друг к другу плоскостях положительного и отрицательного сеточных электродов перпендикулярно установлены электропроводящие иглы, причем на

отрицательном сеточном электроде (рисунок 3.25) дополнительно установлены электропроводящие иглы с возможностью регулирования по длине, а входной канал подачи газовой среды, загрязненной вредными примесями, выполнен со стороны размещения отрицательного сеточного электрода.

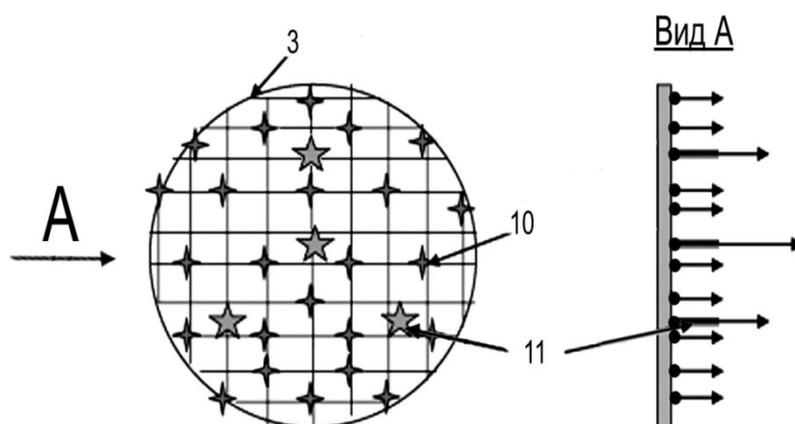


Рисунок 3.25 – Отрицательный электрод: 10 – Электропроводящие иглы отрицательного электрода; 11 – Электропроводящие иглы отрицательного электрода, регулируемые по длине

Положительный и отрицательный электроды расположены друг от друга на расстоянии 10-50 мм, радиус острия электропроводящих игл равен 30 мкм, а их длина равна 10-20 мм, при этом длина дополнительно установленных электропроводящих игл равна 10-40 мм.

Поток газовой среды поступает через входной канал 5 в диэлектрическую реакционную камеру 4 со стороны отрицательного сеточного электрода 3. За счет установленных игл 9, 10, 11 обеспечивается неоднородное электрическое поле со средней напряженностью 6 кВ/см.

Недостатком прототипа является сложность конструкции системы электродов и повышенная температура в диэлектрической реакционной камере под воздействием стримерного разряда и, следовательно, замедление процесса очистки газовых сред.

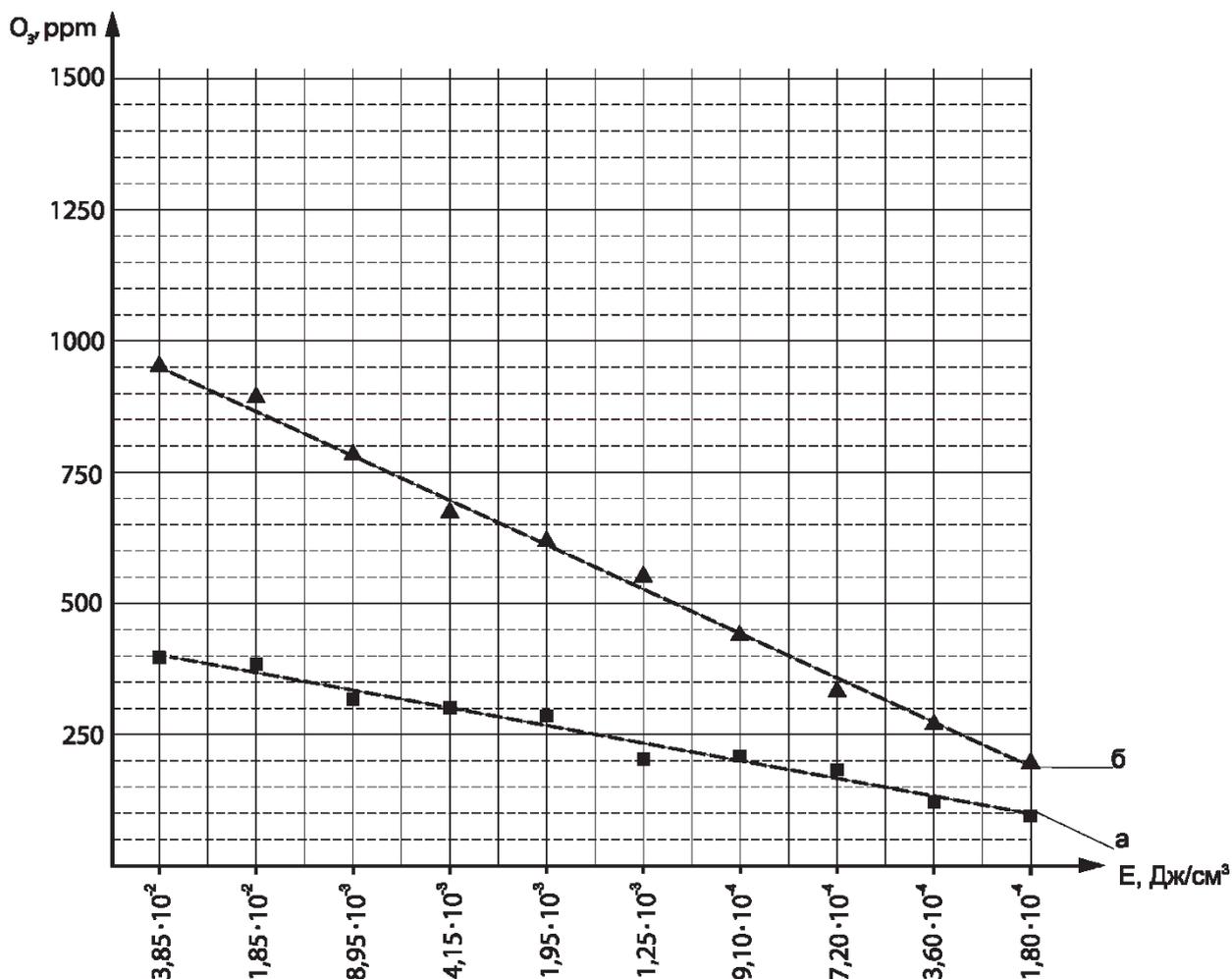


Рисунок 3.26 – а – зависимость концентрации  $O_3$  от энерговклада для прототипа; б – зависимость концентрации  $O_3$  от энерговклада для предлагаемого устройства

В результате проведенных испытаний было установлено повышение концентрации  $O_3$  при использовании предлагаемого устройства в сравнении с прототипом без дросселя при сохранении энерговклада (рисунок 3.26).

Опираясь на результаты полученные во второй главе при исследовании разрядных характеристик монокристаллических материалов, конструкция реакционной камеры была усовершенствованна следующим образом.

Устройство очистки газовых сред (рисунок 3.27) содержит источник высокого напряжения 1 (5-15 кВ), к положительному и отрицательному

полюсам которого подключены соответственно положительный 2 и отрицательный 3 электроды, помещённые в диэлектрическую реакционную камеру 4, имеющую входной канал 5 подачи газовой среды, загрязненной вредными примесями, выходной канал 6 очищенной газовой среды, между электродами 2 и 3 расположен дроссель 7.

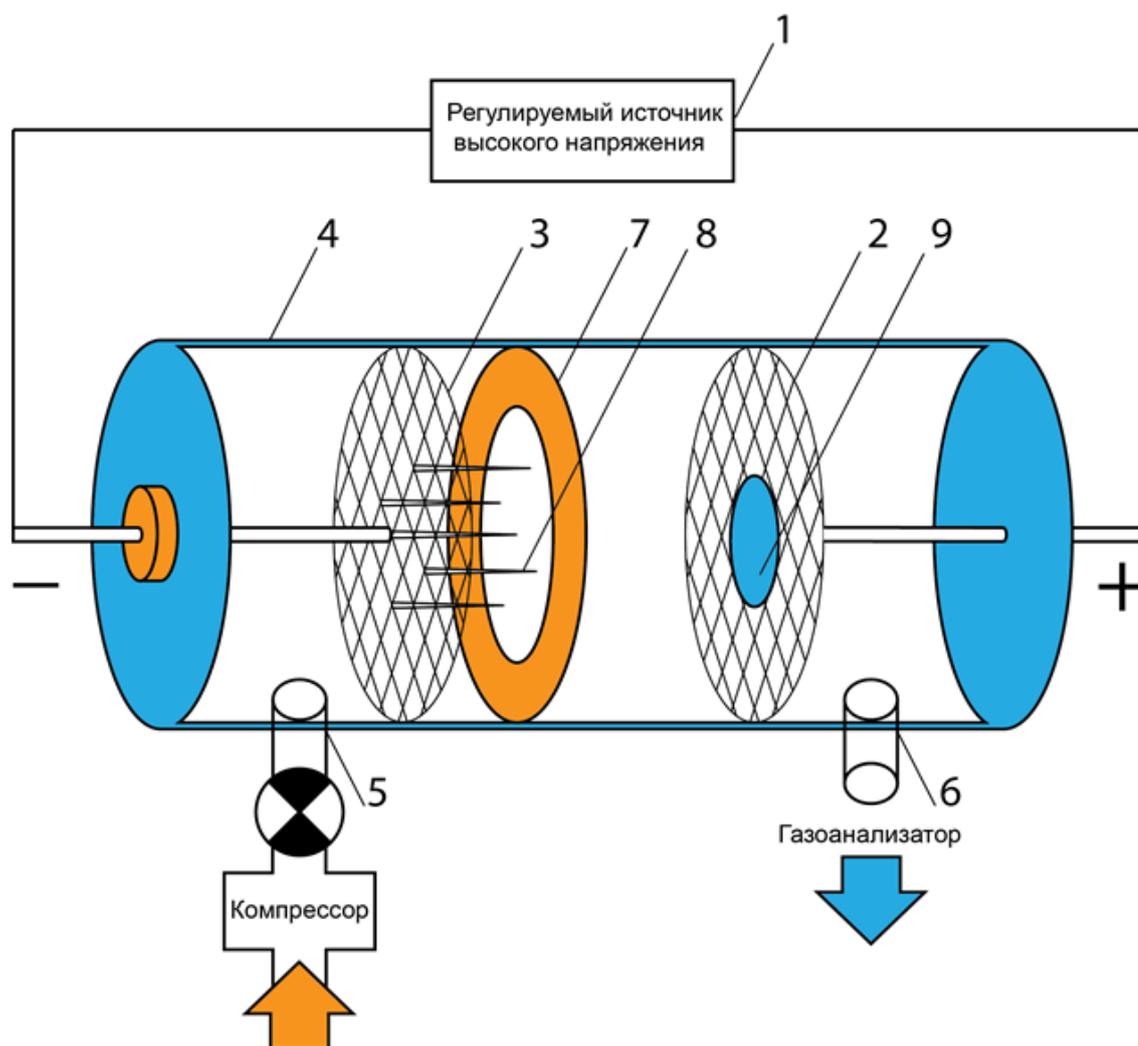


Рисунок 3.27 – Структурная схема устройства очистки газовых сред:  
 1 – источник высокого напряжения; 2 – положительный электрод;  
 3 – отрицательный электрод; 4 – диэлектрическая реакционная камера;  
 5 – входной канал; 6 – выходной канал; 7 – дроссель; 8 – телескопические иглы; 9 – пластины монокристалла никеля

Отличием предлагаемого устройства является то, что отрицательный электрод 3 выполнен в виде металлической сетки с перпендикулярно установленными электропроводящими иглами с возможностью

регулирования по длине (телескопические иглы 8), а положительный электрод 2 выполнен в виде пластин монокристалла никеля 9, окруженных металлической сеткой (рисунок 3.28).

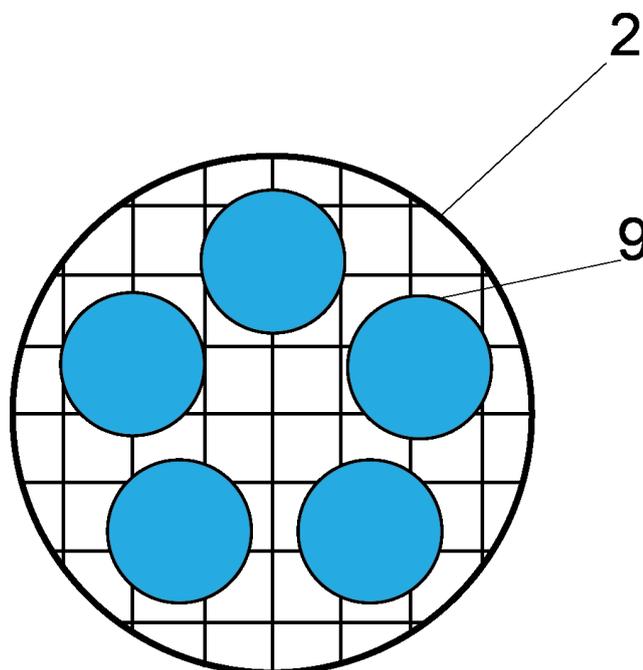


Рисунок 3.28 – Положительный электрод:  
2 – сетка; 9 – монокристаллы никеля

Количество пластин монокристалла никеля может варьироваться в зависимости от диаметра реакционной камеры, расстояния между электродами, а также от количества регулируемых игл, установленных на отрицательном электроде.

За счет системы электродов металлическая сетка положительного электрода 2 с пластиной монокристалла никеля 9 и металлическая сетка с перпендикулярно установленными электропроводящими иглами 8 отрицательного электрода 3 обеспечивает неоднородное электрическое поле со средней напряженностью 12кВ/см с равномерным распределением стримерных каналов по объему ионизируемой области, что позволяет уменьшить энергетические затраты на процесс очистки газовых сред.

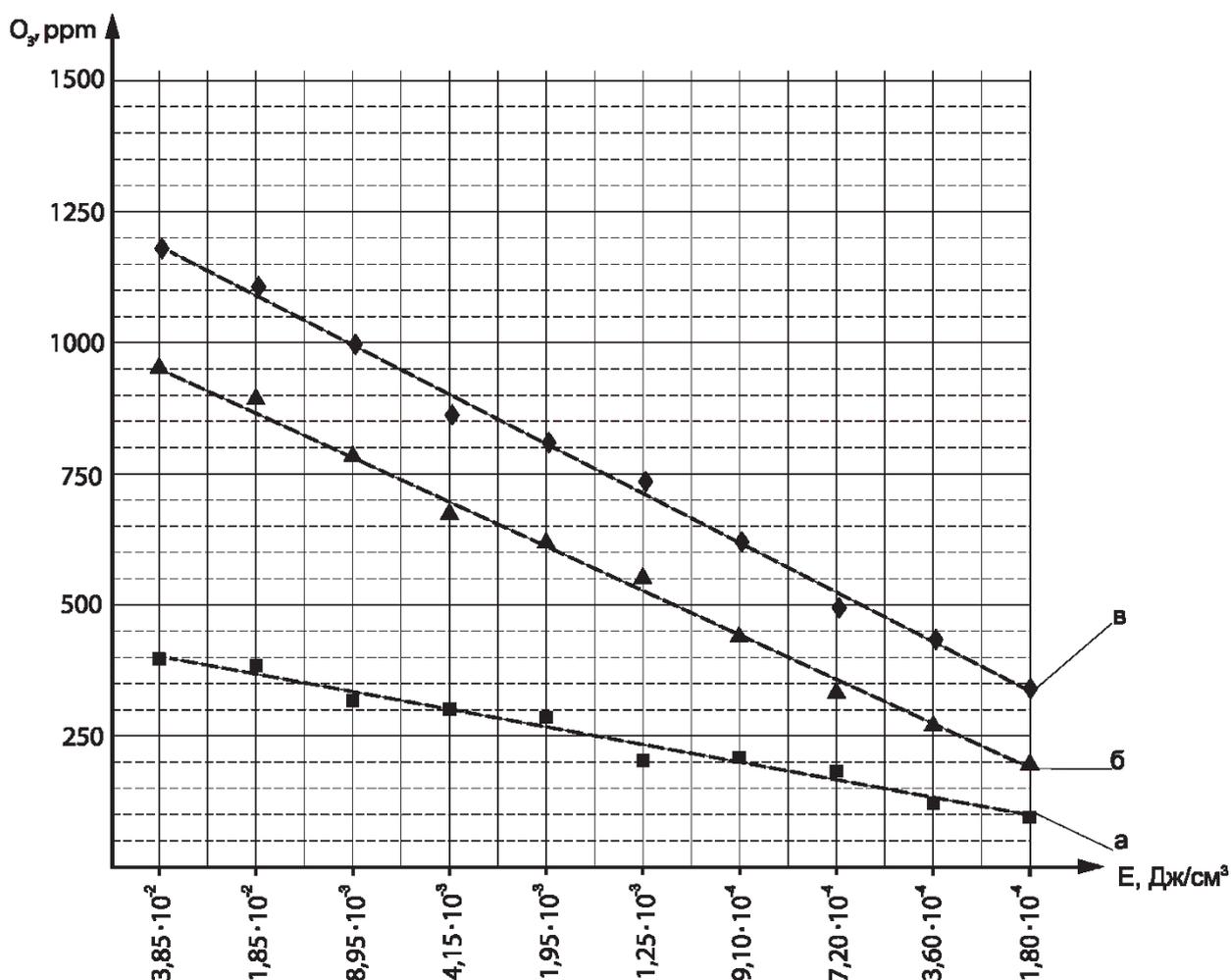


Рисунок 3.29 – а – зависимость концентрации  $O_3$  от энерговклада для прототипа; б – зависимость концентрации  $O_3$  от энерговклада для запатентованного устройства с дросселем; в – зависимость концентрации  $O_3$  от энерговклада для предлагаемого устройства с дросселем и монокристаллами никеля

В результате проведенных экспериментальных испытаний было установлено повышение концентрации  $O_3$  при использовании предлагаемого устройства в сравнении с запатентованным устройством при сохранении энерговклада (рисунок 3.29).

Посредством вышеописанного устройства было зафиксировано равномерное распределение стримерных каналов по объему ионизируемой области.

Таким образом, достоинством предлагаемого устройства является уменьшение энергетических затрат на процесс наработки химически активных частиц за счет равномерного распределения стримерных каналов

по объему ионизируемой области при использовании в качестве одного из электродов монокристаллов никеля.

### 3.5 Выводы к главе 3

1. Разработан высоковольтный источник периодических импульсов, позволяющий регулировать электрические параметры в широком диапазоне для образования стримерного разряда в реакционной камере.

2. Определены режимные параметры импульсного источника высокого напряжения для эффективной выработки активных химических частиц при наименьшем потреблении энергии от импульсного источника, а именно: регулируемая частота – 5-500 кГц; большой диапазон регулируемой напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве; регулирование конверсии частотой импульсов (задержка между двумя микрозарядами  $< 0,06$  мкс, что меньше времени распада радикалов (10-100 мкс)); диапазон амплитуд импульсных напряжений ( $U^+$ ,  $U^-$ ) – 5-12 кВ; отношение длительностей положительного и отрицательного импульса  $\tau^+/\tau^- \sim 2-4$ .

3. В результате измерений и расчетов было установлено, что применение дросселя в процессе очистки газовых выбросов ведет к снижению температуры газов и, соответственно, к увеличению количества нарабатываемых в реакционной камере химически активных частиц, что, в свою очередь, значительно повышает эффективность процесса очистки.

4. Разработана физическая модель реакционной камеры с системой регулируемых электродов и использованием монокристаллических материалов, позволяющая интенсифицировать процесс очистки воздуха от примесей в замкнутых помещениях.

5. Установлено, что применение дросселя в процессе очистки атмосферного воздуха от примесей ведет к снижению температуры газов и, соответственно, к увеличению количества нарабатываемых в реакционной

камере химически активных частиц, что, в свою очередь, значительно повышает эффективность процесса очистки.

## ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ИМПУЛЬСНЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ УСТРОЙСТВАХ ДЛЯ КОНВЕРСИИ CO<sub>2</sub> В ЗАМКНУТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

### 4.1 Разработка лабораторной установки конверсии газовых сред

Исследования влияния электрофизических и разрядных характеристик на газовую смесь в данной работе выполнены на разработанной в высоковольтной лаборатории КГЭУ экспериментальной установке (рисунок 4.1), включающую в себя реакционную камеру, импульсный источник питания, делитель напряжения и комплекс измерительной аппаратуры.

В реакционную камеру газ подавался в соответствии с рисунком 4.2. Компрессор нагнетал в реакционную камеру воздух взятый из помещения. Состав воздуха в процентном соотношении в помещении: кислород – 20,03%, углекислый газ – 0,94%, азот – 78,93%. Для подсчета скорости потока воздуха из компрессора был взят объем помещения лаборатории 30 м<sup>3</sup> (3 на 4 на 2,5 м). Кратность воздухообмена равная одному для данного помещения получилась при скорости воздуха равной 500 л/мин.

В качестве делителя напряжения был применен линейный резистивный делитель напряжения, собранный из последовательно включённых 50 резисторов с величиной сопротивления 1,1 МОм. Для увеличения предела измерений было использовано добавочное сопротивление 4,7 кОм.

Для измерения различных компонентов в газовых смесях в работе применена газоаналитическая система GMS800, включающая в себя аналитические модули, использующие метод недисперсионной спектrophотометрии в инфракрасной области (NDIR). Точность измерения удовлетворяет требованиям ГОСТ Р ИСО 11042-1-2001. Требования к

основным характеристикам газоанализатора при измерении концентрации  $\text{CO}_2$  приведены в приложении 1.

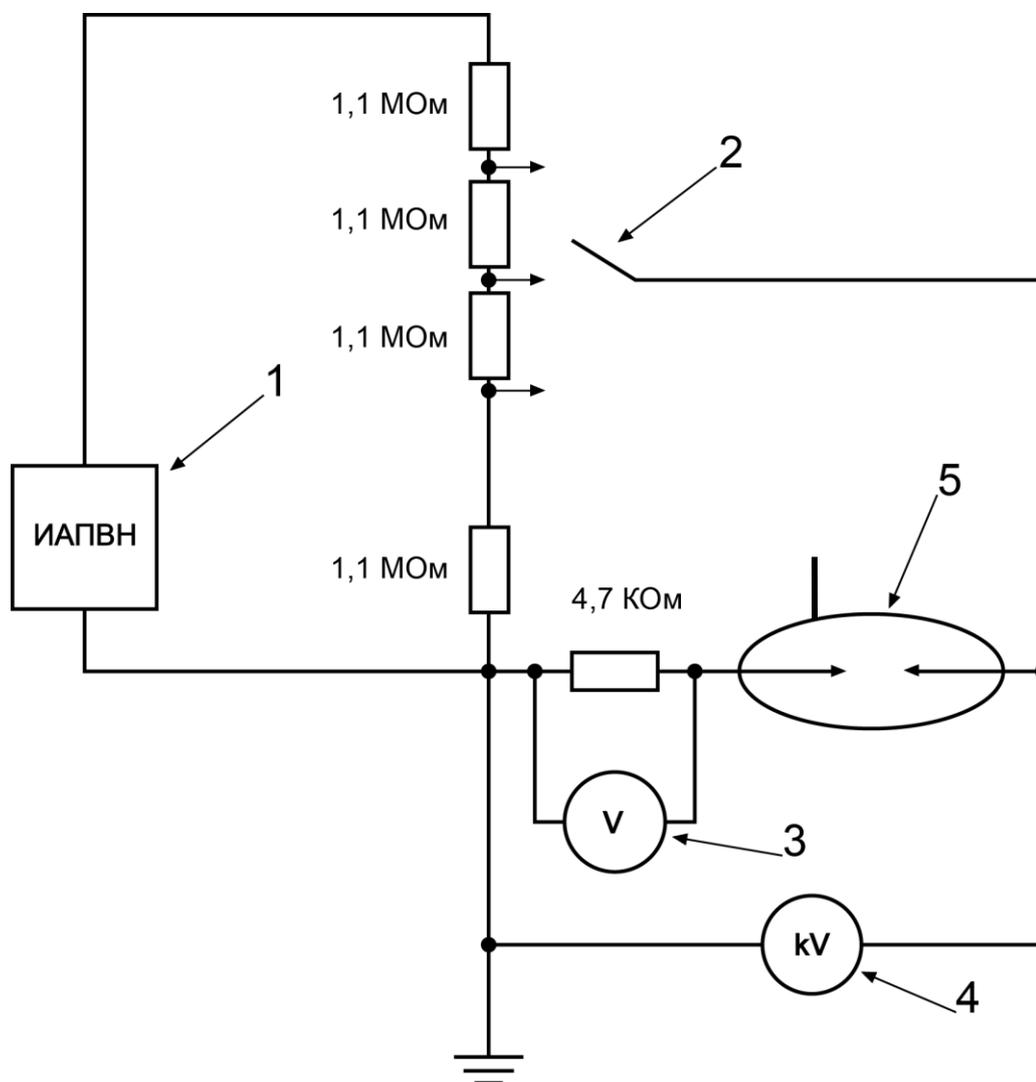


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема экспериментальной очистительной установки: 1 – источник асимметричного периодического высокого напряжения; 2 – делитель напряжения; 3 – осциллограф; 4 – киловольтметр; 5 – реакционная камера

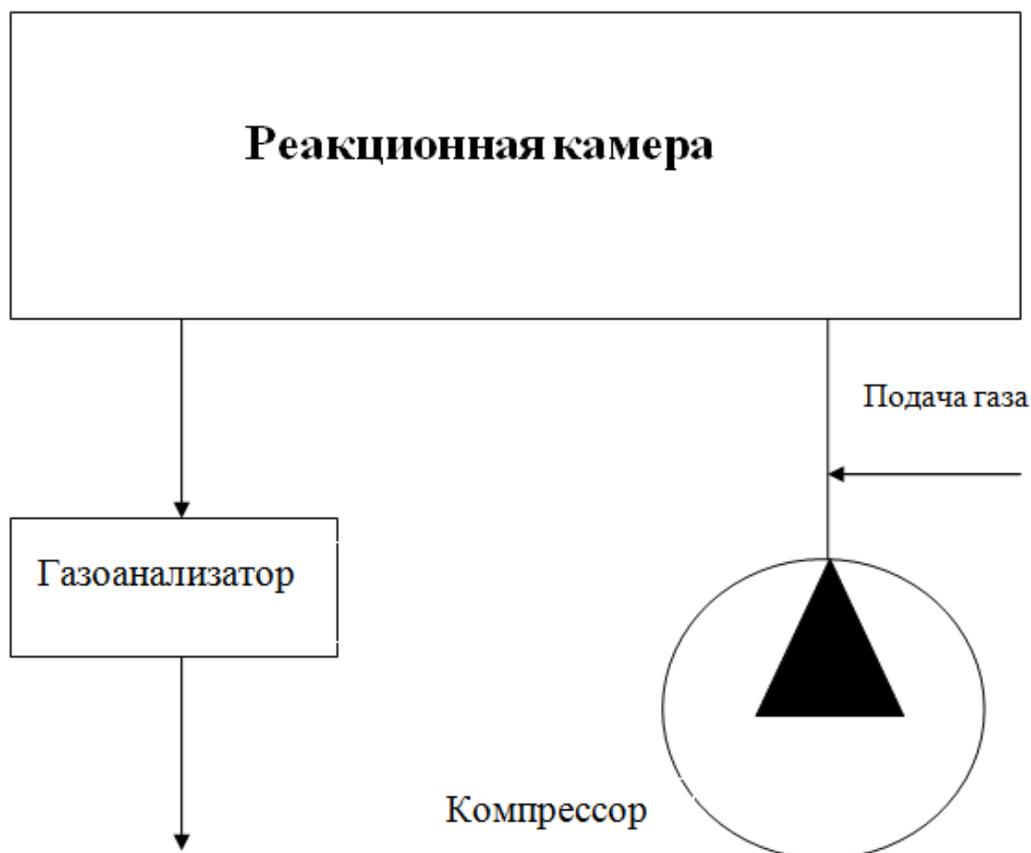


Рисунок 4.2 – Схема подачи газа в реакционную камеру и анализа выходного газа из камеры

Исследования разрядных характеристик проводились с помощью комплекса реакционных камер и открытых систем электродов (рисунки 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7). Для проведения экспериментального исследования по оптимизации энергетических характеристик в импульсных газоразрядных устройствах для конверсии  $\text{CO}_2$  в замкнутых помещениях была использована разработанная и запатентованная реакционная камера, описанная в 3 главе.



Рисунок 4.3 – Комплекс реакционных камер и открытых систем электродов

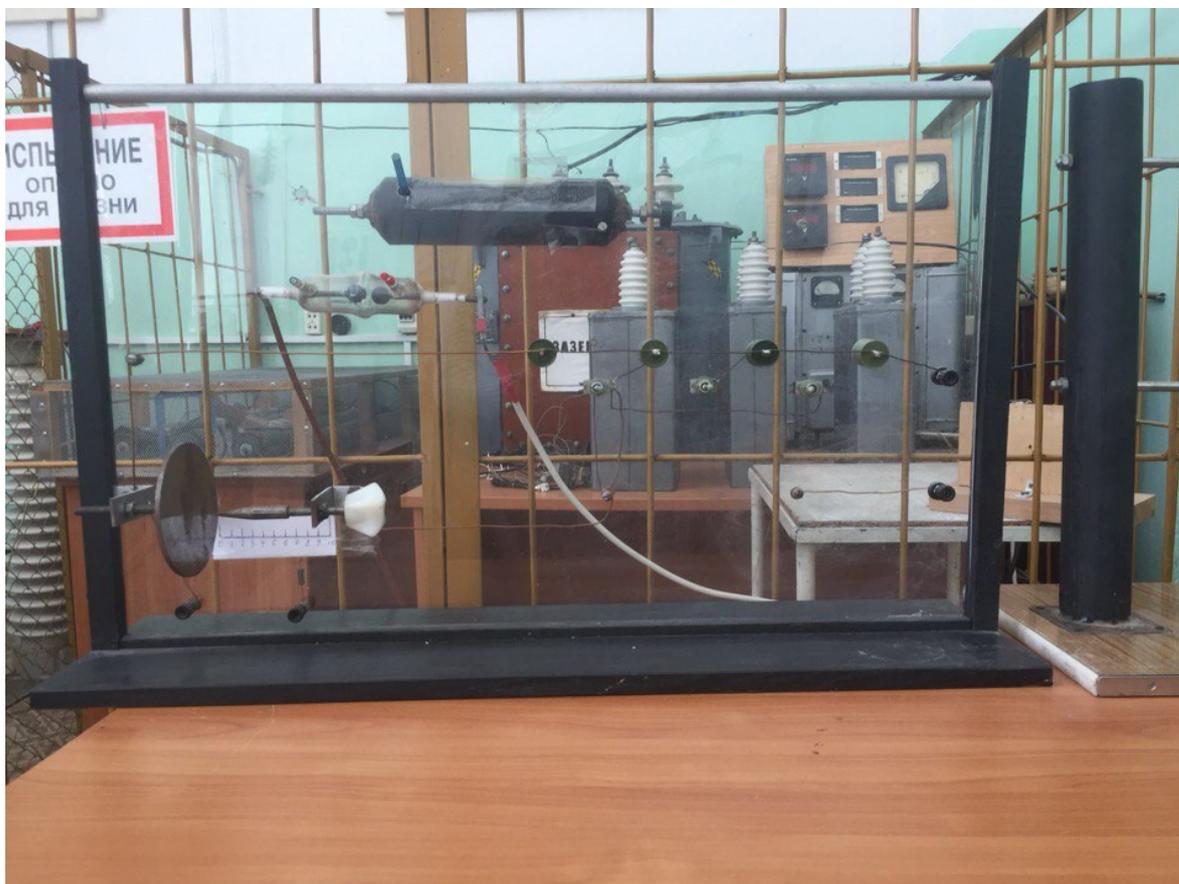


Рисунок 4.4 – Комплекс реакционных камер и открытых систем электродов

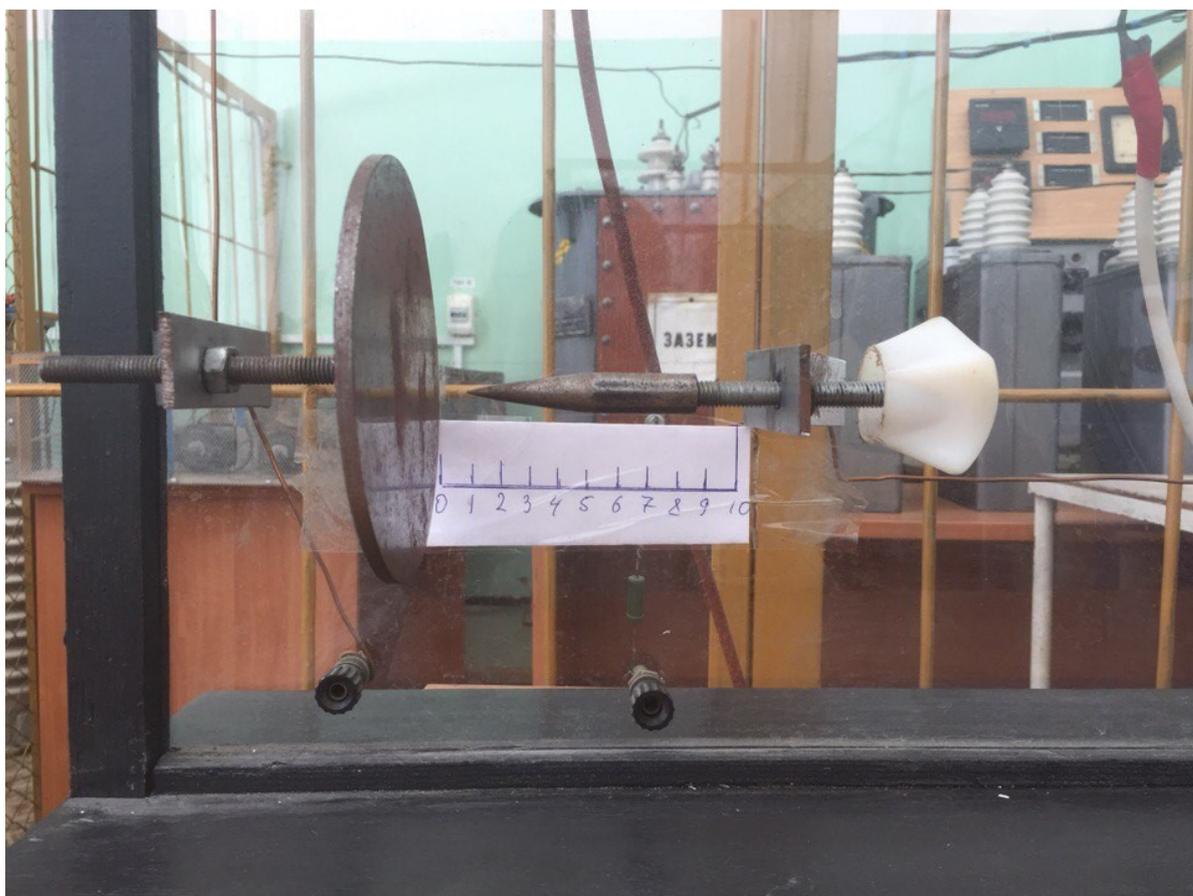


Рисунок 4.5 – Открытая система электродов

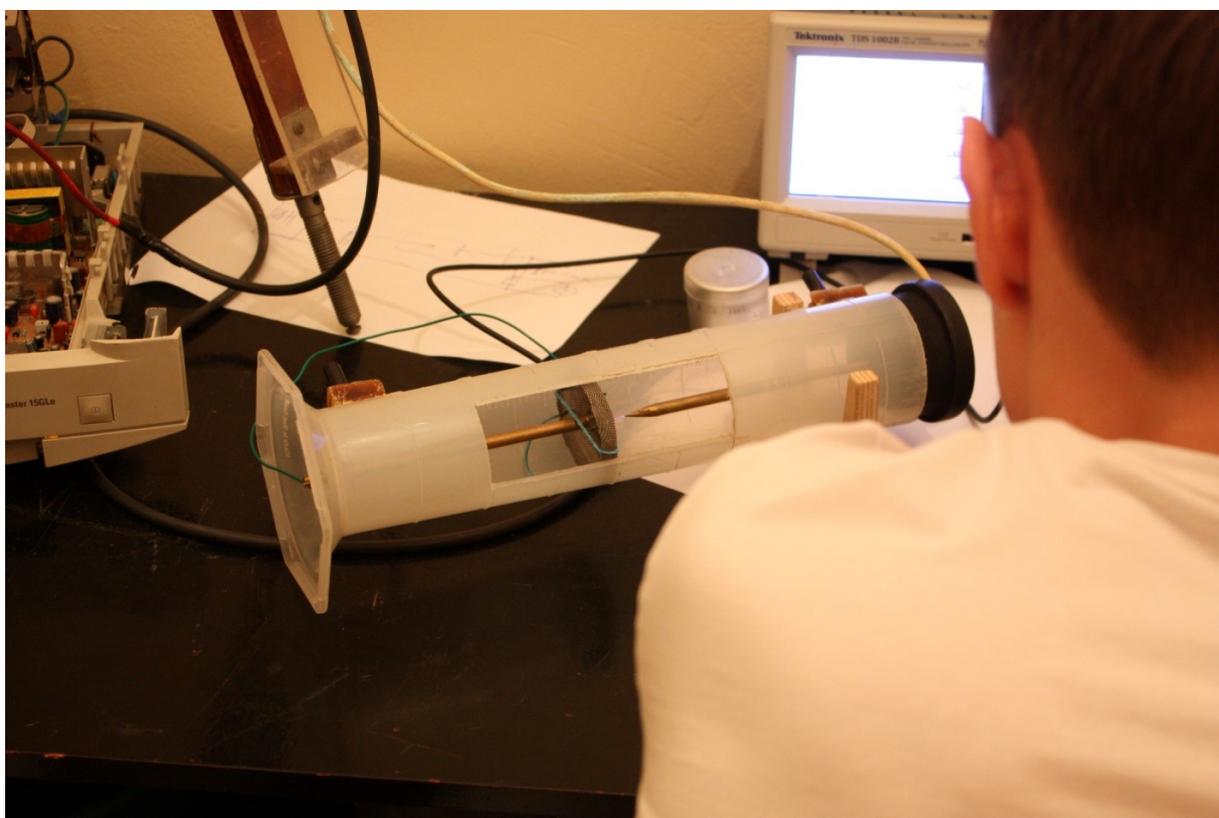


Рисунок 4.6 – Открытая система электродов типа «игла – сетка с монокристаллом»



Рисунок 4.7 – Реакционная камера вертикального типа

Коаксиальная реакционная камера выполнена из диэлектрического материала с дросселем, также выполненным из диэлектрического материала.

Отрицательный электрод, находящийся со стороны подачи газовой смеси, выполнен в виде металлической сетки с перпендикулярно установленными электропроводящими иглами с возможностью регулирования по длине (телескопические иглы), а положительный электрод выполнен в виде пластин монокристалла никеля с плоскостью среза (111) и площадью  $1,5 \text{ см}^2$ , окруженных металлической сеткой.

В качестве измерительной аппаратуры электрофизических параметров использовались осциллографы, киловольтметры, вольтметры и амперметры с классом точности 0,5-1.

Для проведения экспериментального исследования по оптимизации энергетических характеристик в импульсных газоразрядных устройствах для конверсии  $\text{CO}_2$  в замкнутых помещениях был использован разработанный экспериментальный источник асимметричного периодического высокого напряжения описанный в 3 главе (рисунок 4.8).

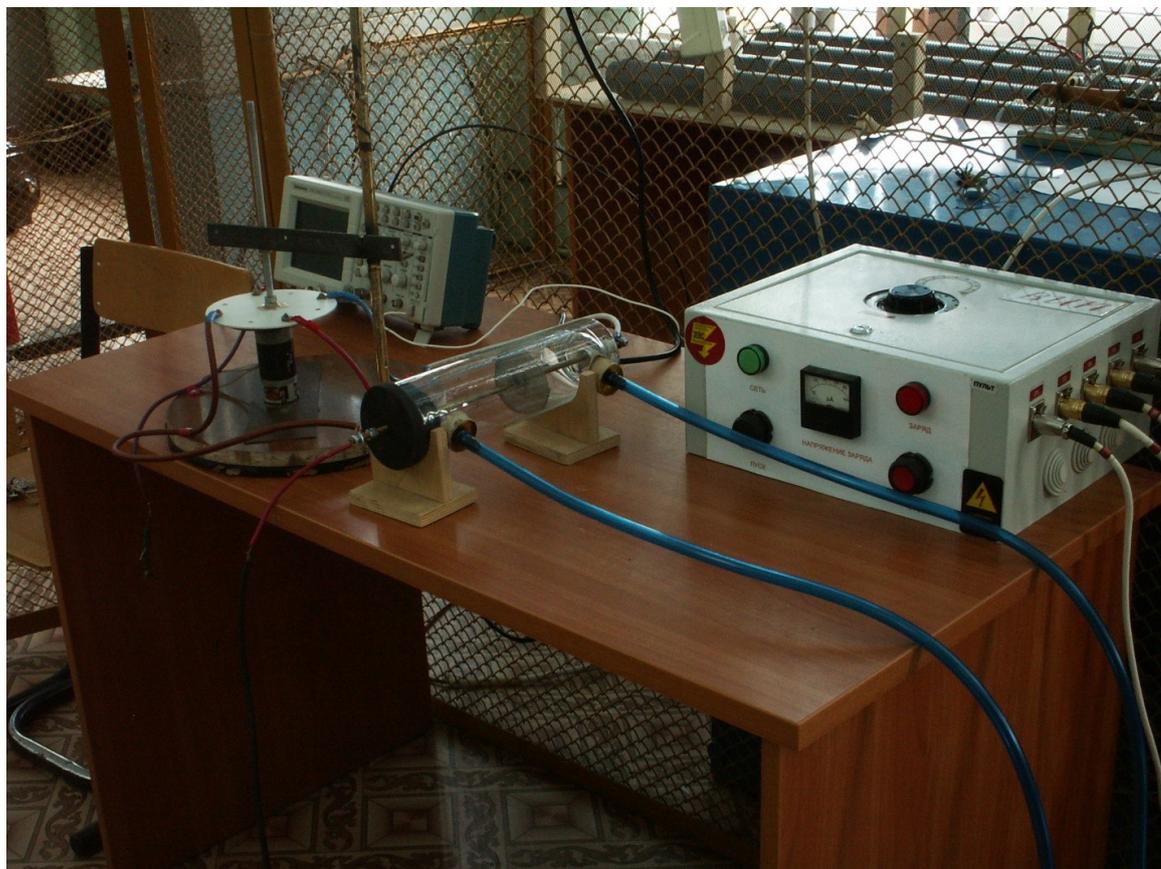


Рисунок 4.8 – Экспериментальный источник асимметричного периодического высокого напряжения с реакционной камерой и ВИП

Импульсный источник высокого напряжения создавал условия для эффективной выработки активных химических частиц при наименьшем потреблении энергии от импульсного источника, а именно:

- регулируемая частота – 5-500 кГц;
- большой диапазон регулируемой напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве;
- регулирование конверсии частотой импульсов (задержка между двумя микроразрядами  $< 0,06$  мкс, что меньше времени распада радикалов (10-100 мкс));
- Диапазон амплитуд импульсных напряжений ( $U^+$ ,  $U^-$ ) – 5-12 кВ;
- Отношение длительностей положительного и отрицательного импульса  $\tau^+/\tau^- \sim 2-4$ .

4.2 Экспериментальное исследование по оптимизации энергетических характеристик в импульсных газоразрядных устройствах для конверсии  $CO_2$  в поле стримерной короны

С помощью экспериментальной установки, разработанной в высоковольтной лаборатории КГЭУ, описанной выше, для исследования влияния электрофизических и разрядных характеристик на газовую смесь был проведен ряд экспериментов по оптимизации энергетических характеристик в импульсных газоразрядных устройствах для конверсии  $CO_2$  в поле стримерной короны.

Для выбора различных кратностей воздухообмена был взят объем помещения лаборатории  $30 \text{ м}^3$  (3 на 4 на 2.5 м). Кратность воздухообмена равная одному для данного помещения получилась при скорости воздуха равной  $0,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ , двум –  $1 \text{ м}^3/\text{мин}$ , трем –  $1,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ , пяти –  $2,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ , соответственно.

Посредством данной установки были измерены вольт-амперные характеристики импульсной стримерной короны для различных скоростей воздушного потока, приведенного к кратностям воздухообмена в помещениях. Экспериментальные данные приведены в приложении 2, а также сведены и зафиксированы в общем графике (рисунок 4.9).

Так как в экспериментальной установке величина напряжения регулируется делителем напряжения, мы имеем ступенчатую систему регулирования вольт-амперной характеристики (рисунок 4.9) и, как следствие, величины энерговклада.

Из полученных результатов вольт-амперной характеристики, в ходе эксперимента были выделены следующие ступени энерговклада:  $1,8 \cdot 10^{-4}$ ,  $3,6 \cdot 10^{-4}$ ,  $7,2 \cdot 10^{-4}$ ,  $9,1 \cdot 10^{-4}$ ,  $1,25 \cdot 10^{-3}$ ,  $1,95 \cdot 10^{-3}$ ,  $4,15 \cdot 10^{-3}$ ,  $8,95 \cdot 10^{-3}$ ,  $1,85 \cdot 10^{-2}$ ,  $3,85 \cdot 10^{-2}$  Дж/см<sup>3</sup>.

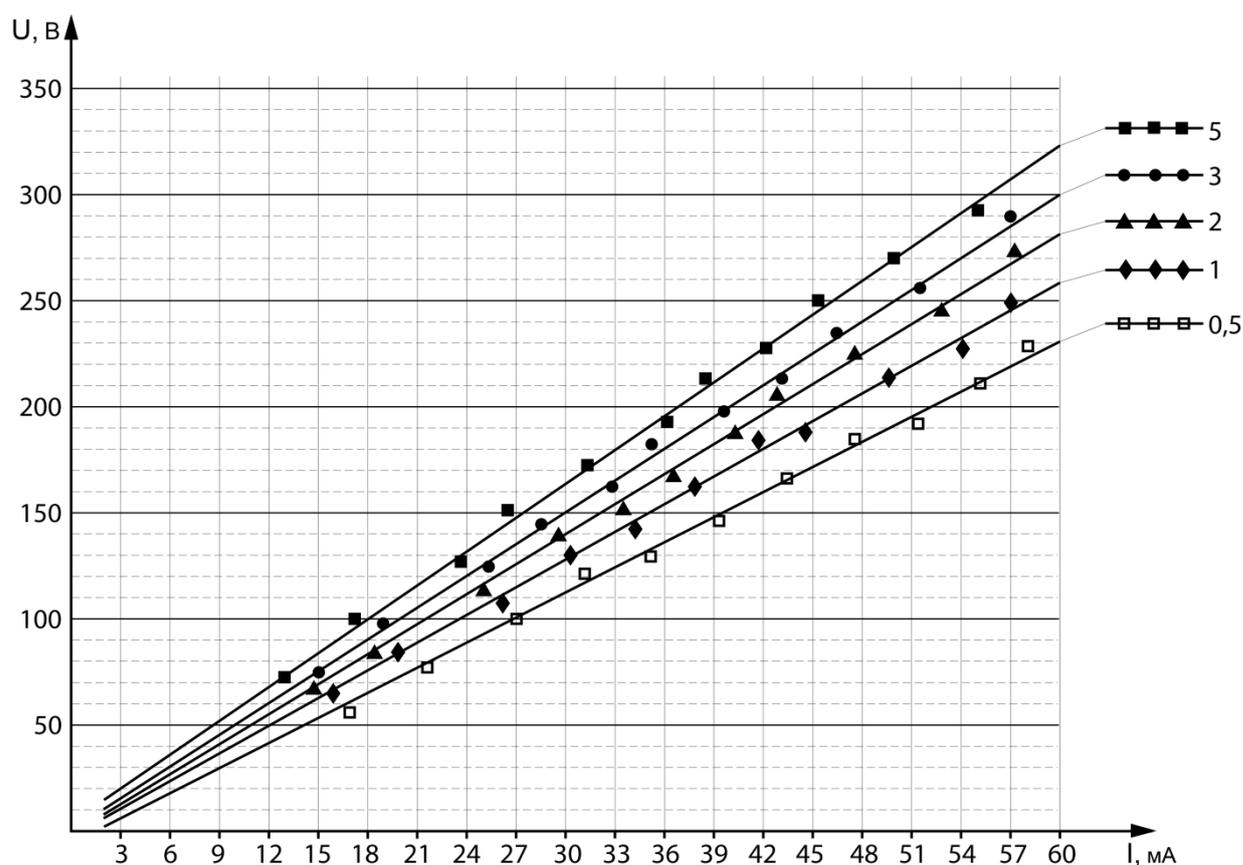


Рисунок 4.9 – Вольт-амперные характеристики для различных кратностей воздухообмена

Из полученной в главе 1 зависимости концентрации  $\text{CO}_2$  от удельного объема помещения для различных кратностей воздухообмена (рисунок 1.1) были выбраны концентрации, свойственные соответствующей кратности воздухообмена при наличии различного количества источников загрязнения воздуха в помещении лаборатории  $30 \text{ м}^3$ .

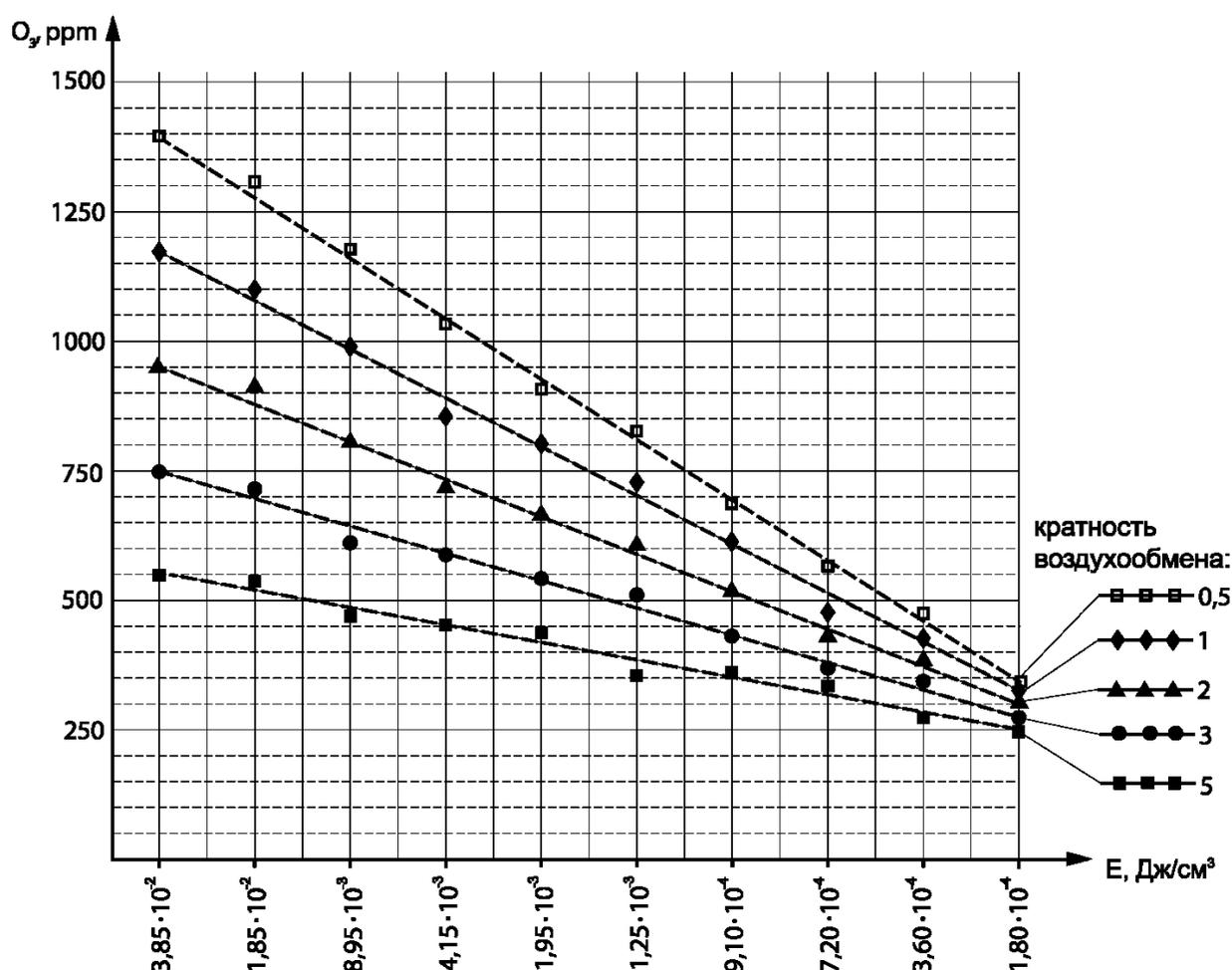


Рисунок 4.10 – Зависимость концентрации  $\text{O}_3$  от энерговклада для различных кратностей воздухообмена

Экспериментальным путем были получены зависимости концентрации  $\text{O}_3$  от энерговклада для различных кратностей воздухообмена при пропускании через реакционную камеру воздуха, взятого из помещения лаборатории (рисунок 4.10), а также зависимости концентрации  $\text{CO}_2$  от

энерговклада для различных кратностей воздухообмена при пропуске через реакционную камеру воздуха, взятого из помещения лаборатории, смешанного с  $\text{CO}_2$  в необходимом количестве, учитывающем фоновый уровень  $\text{CO}_2$  в воздухе (рисунок 4.11).

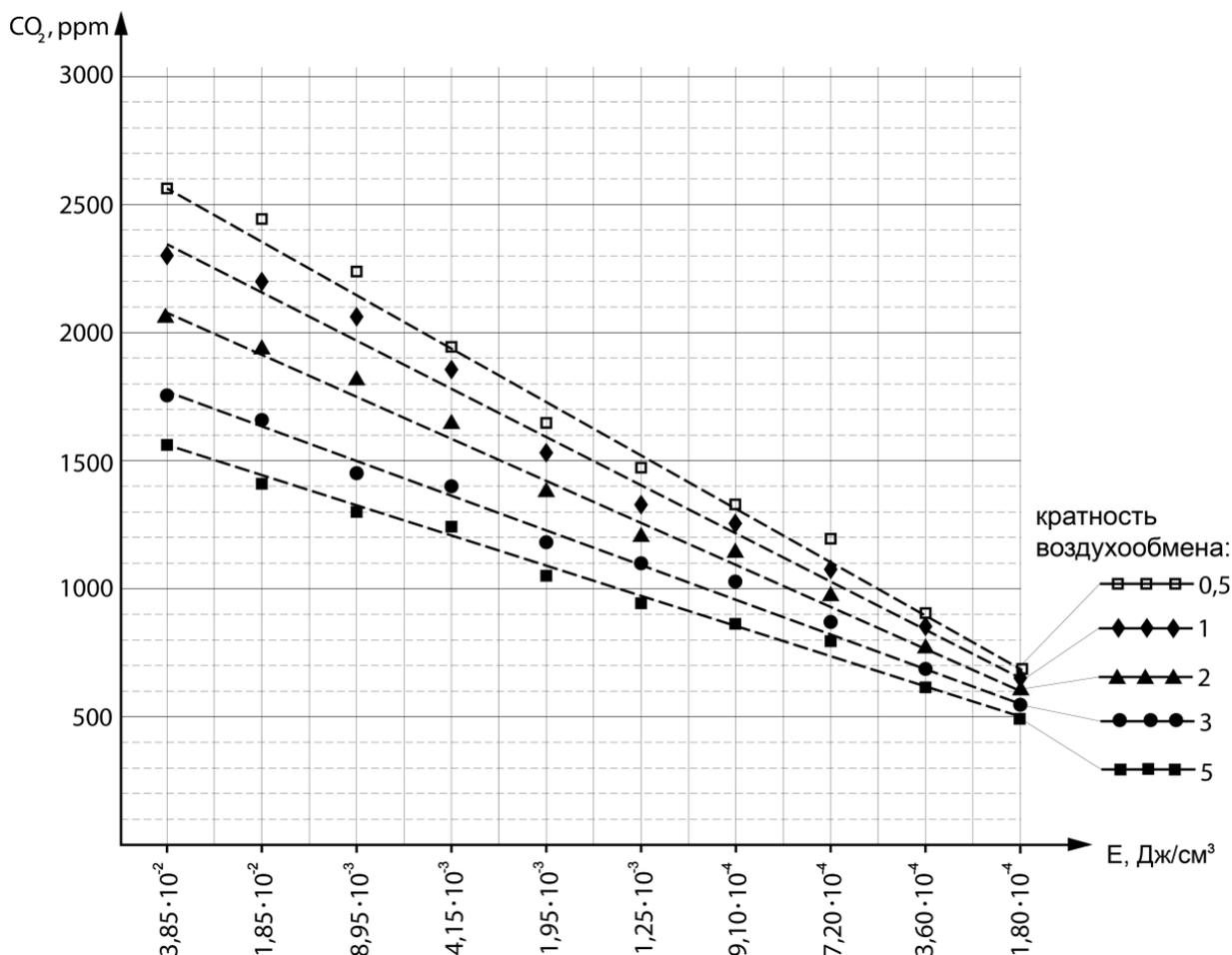


Рисунок 4.11 – Зависимость концентрации  $\text{CO}_2$  от энерговклада для различных кратностей воздухообмена

Совместив экспериментальный и теоретический графики зависимостей концентрации  $\text{CO}_2$  от энерговклада и удельного объема помещения, соответственно, для различных кратностей воздухообмена, мы можем построить номограмму (рисунок 4.12) с погрешностью в 5%, показывающую необходимое количество энергии для очистки воздуха для различных

кратностей воздухообмена при изменении удельного объема помещения на человека.

Опираясь на данную номограмму, появляется возможность регулировать энергозатраты установки очистки газовых сред при изменении концентрации  $\text{CO}_2$  в помещении.

Регулируемый энерговклад позволяет получить ощутимый экономический эффект при сохранении высокого качества воздуха в помещении, а именно, сокращения энергозатрат в 2-20 раз в зависимости от количества находящихся в помещении источников загрязнения и времени их пребывания в нем.

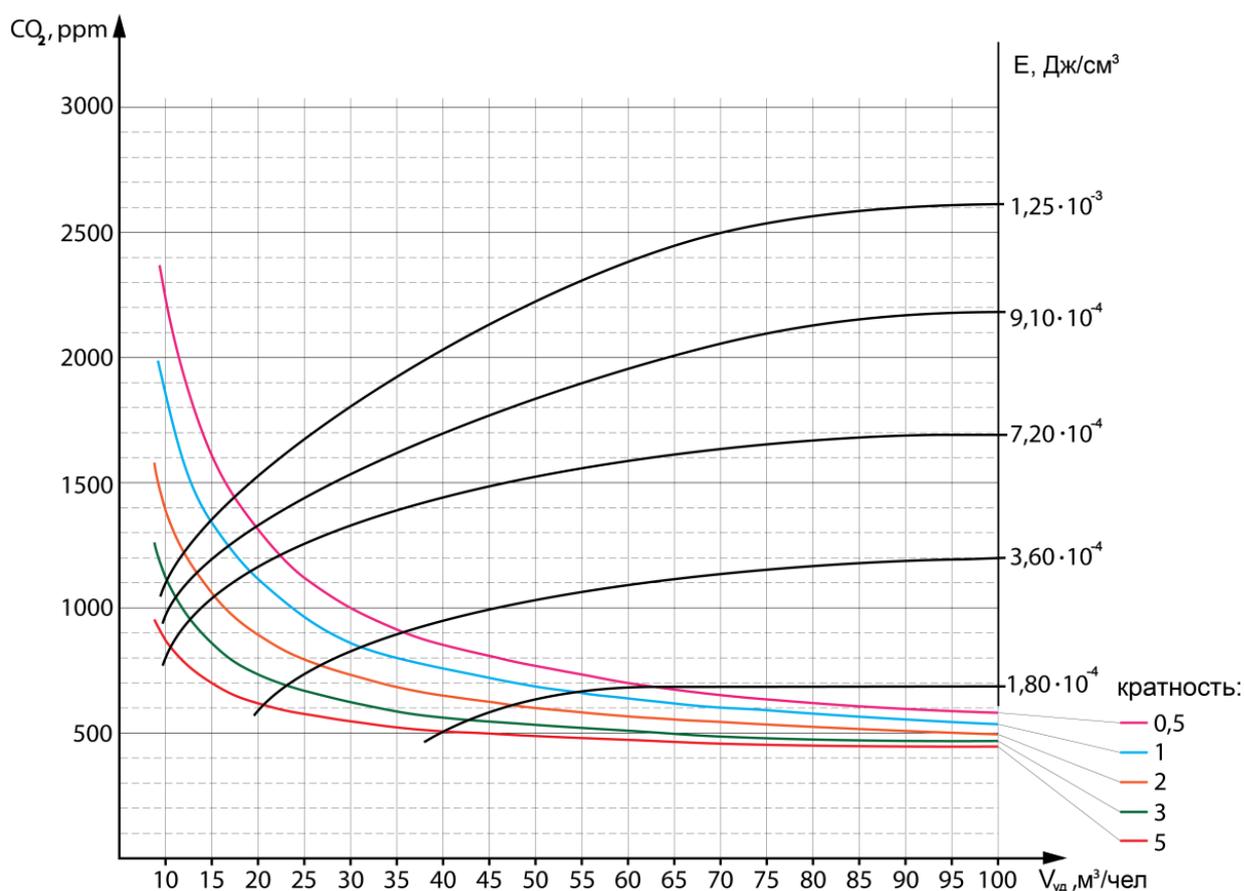


Рисунок 4.12 – Номограмма зависимостей концентрации  $\text{CO}_2$  от энерговклада и удельного объема помещения для различных кратностей воздухообмена

Учитывая данные теоретические и экспериментальные исследования, можно сформулировать рекомендации для проектирования установки очистки атмосферного воздуха от примесей замкнутых помещений:

1. Необходимо построить график зависимости концентрации  $\text{CO}_2$  в зависимости от удельного объема и кратности воздухообмена данного помещения.

2. Необходимо поставить датчик контроля  $\text{CO}_2$  в помещении, так как концентрация  $\text{CO}_2$  изменяется в зависимости от количества в помещении источников загрязнения и времени нахождения в нем.

3. Сигнал с датчика должен поступать на регулирующий энерговыход от источника тока контроллер, учитывающий данные, полученные в номограмме (рисунок 4.12).

4. Импульсный источник высокого напряжения должен обладать следующими энергетическими характеристиками: регулируемая частота – 5-500 кГц; задержка между двумя микроразрядами  $< 0,06$  мкс, что меньше времени распада радикалов (10-100 мкс); диапазон амплитуд импульсных напряжений ( $U^+$ ,  $U^-$ ) – 5-12 кВ; отношение длительностей положительного и отрицательного импульса  $\tau^+/\tau^- \sim 2-5$ . при этом источник должен быть малогабаритным.

5. Необходимо использовать разработанную модель реакционной камеры с системой регулируемых электродов, использованием монокристаллических материалов и дросселем.

#### 4.3 Выводы к главе 4

1. Показана возможность регулировать энергозатраты установки очистки газовых сред при изменении концентрации  $\text{CO}_2$  в помещении.

2. Регулируемый энерговыход позволяет сократить энергозатраты на процесс наработки химически активных частиц и очистки от  $\text{CO}_2$  в 2-20 раз в

зависимости от количества находящихся в помещении источников загрязнения и времени их пребывания в нем.

3. Разработаны рекомендации для проектирования установки очистки атмосферного воздуха в зависимости от объема помещения и плотности размещения в нем людей, с определением оптимальных параметров высоковольтного импульсного генератора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены и обоснованы методы повышения эффективности технологического процесса конверсии вредных оксидов режимами импульсно-периодического стримерного разряда.

2. Разработан высоковольтный источник периодических импульсов, позволяющий регулировать электрические параметры в широком диапазоне для образования стримерного разряда в реакционной камере.

3. Определены параметры импульсного источника высокого напряжения для эффективной выработки активных химических частиц при наименьшем потреблении энергии от импульсного источника, а именно: регулируемая частота – 5-500 кГц; большой диапазон регулируемой напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве; регулирование конверсии частотой импульсов (задержка между двумя микрозарядами  $< 0,06$  мкс, что меньше времени распада радикалов (10-100 мкс)); диапазон амплитуд импульсных напряжений ( $U^+$ ,  $U^-$ ) – 5-12 кВ; отношение длительностей положительного и отрицательного импульса  $\tau^+/\tau^- \sim 2-5$ .

4. Разработана физическая модель реакционной камеры с системой регулируемых электродов и использованием монокристаллических материалов, позволяющая интенсифицировать процесс очистки воздуха от примесей в замкнутых помещениях.

5. Экспериментально установлено, что, использование монокристалла никеля в качестве электрода «плоскость» влияет на равномерное распределение стримерных каналов по объему ионизируемой области и увеличивает на 20-25% количество вырабатываемых в рабочей зоне установки радикалов и химически активных частиц таких как  $O_3$ .

6. Установлено, что применение дросселя в процессе очистки атмосферного воздуха от примесей ведет к снижению температуры газов и, соответственно, к увеличению количества нарабатываемых в реакционной

камере химически активных частиц, что, в свою очередь, значительно повышает эффективность процесса очистки.

7. Регулируемый энергозатрат позволяет сократить энергозатраты на процесс наработки химически активных частиц и очистки от  $\text{CO}_2$  в 2-20 раз в зависимости от количества находящихся в помещении источников загрязнения и времени их пребывания в нем.

8. Разработаны рекомендации для проектирования установки очистки атмосферного воздуха в зависимости от объема помещения и количества источников загрязнения в нем, с определением оптимальных параметров высоковольтного импульсного генератора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clements, J.S. Combined removal of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> and fly ash from simulated flue gas using pulsed streamer corona / J.S. Clements, A. Mazino // IEEE Trans. Industry Applic. – 1989. – No. 25. – PP. 62-69.
2. Masuda, S. Control of NO<sub>x</sub> by positive and negative pulsed corona discharges / S. Masuda, H. Nakao // IEEE Trans. Industry Applic., 1990. – V. 26. – PP. 374-383.
3. Masuda, S. Control of NO<sub>x</sub> by Positive and Negative Pulsed Corona Discharges / S. Masuda, H. Nakao // Rec. IEEE/IAS Ann. Conf, 1986. – PP. 1173-1182.
4. Dinelly, G. Industrial Experiments on Pulse Corona Simultaneous Removal of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> from Flue Gas / G. Dinelly, L. Civitano, M. Rea // IEEE Transactions on Industry Applications, 1990. – V. 26. – No. 3. – PP. 533-539.
5. Познизовский, А.З. Оптимизация параметров электрофизических установок для очистки воздуха от экологически вредных газообразных примесей / Познизовский А.З [и др.] // Электротехника. – 1993. – № 3. – С. 59-67.
6. Surika, P. Positiv Pulsed Corona Discharge in Coaxial Geometry / P. Surika, V. Babicky // Intern. Symp. on High Pressure Low Temperature plasma chemistry «Наконе V». – Milovy, 1996. – PP. 305-309.
7. Железняк, М.Б. Моделирование газофазного химического реактора на основе импульсного стримерного разряда для удаления токсичных примесей / М.Б. Железняк, Е.А. Филимонова // ТВТ. – 1998. – Т. 36. – № 3. – С. 374-379.
8. Железняк, М.Б. Использование импульсного стримерного разряда для удаления оксидов азота из продуктов сгорания углеводородных топлив / М.Б. Железняк, Е.А. Филимонова // Физика низкотемпературной плазмы, Петрозаводск, 1995. – С. 395-400.
9. Dutton, J. A Survey of Electron Swarm Data / J. Dutton // J. Phys. Chem.Ref. Data. – 1975. – V. 4. – No. 3. – PP. 577-878.

10. Зайцев, А.С. Структура поля концентраций окиси углерода в городе. Атмосферная диффузия и загрязнение атмосферы / А.С. Зайцев // Труды Главной геофизической обсерватории. JL, 1973. – Вып. 293. – С. 47.
11. Акишев, Ю.С. Эффективность генерации химически активных частиц в самостоятельном тлеющем разряде / Ю.С. Акишев, А.А. Дерюгин, И.В. Кочетов // Физика плазмы. – 1994. – Т. 20. – № 6. – С. 585-592.
12. Creyghton, Y.L.M. Pulsed positive corona discharges (Fundamentalstudy and application to flue gas treatment) / Y.L.M. Creyghton // Ph.D. thesis -Eindhoven: University of Technology. – The Netherlands, 1994. – PP. 135-136.
13. Соколова, М.В. Простой метод расчета коэффициента ионизации топочных газов / М.В. Соколова, С.В. Жуков // Физика газового разряда. – Рязань, 1996. – С. 61-63.
14. Александров, Н.Л. Моделирование длинных стримеров в газе атмосферного давления / Н.Л. Александров [и др.] // Физика плазмы. – 1995. – Т. 21. – № 1. – С. 60-80.
15. Gordiets, B.F. Kinetic model of low pressure N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> flowing glow discharge / B.F. Gordiets, C.M. Ferreira // IEEE Trans, on Plasma Science, 1995. – V. 23. – No. 4. – PP. 750-768.
16. Gallimberti, I. Flue gas simultaneous DeNO<sub>x</sub>/DeSO<sub>x</sub> by impulse corona energization / I. Gallimberti, M. Rea // Non thermal plasma techniques for pollution control, Part A. – NATO ASI series, 1987. – Vol. 10. – PP. 55-84.
17. Kulikovsky, A.A. Production of chemical active species by positive streamer in air / A.A. Kulikovsky // XXIIIICPIG. – 1997. – V. 1. – P. 258.
18. Sigmond, R.S. Basic corona phenomena: the poles of space chargesaturation and secondary streamers in breakdown / R.S. Sigmond // XVI ICPIG. – 1990. – PP. 174-186.
19. Babaeva, N.Yu. Two dimensional simulation of positiveand negative streamer in air / N.Yu. Babaeva, G.V. Naidis // International Symposium on High

Pressure. – Low Temperature Plasma Chemistry, Czech Republic. – 1996. – PP. 128-132.

20. Кузнецов, Д.Л. Удаление окислов серы из дымовых газов под действием импульсных пучков электронов / Д.Л. Кузнецов, Г.А. Месяц, Ю.Н. Новоселов // Теплофизика высоких температур – 1996. – Т. 34. – № 6. – С. 845-852.

21. Физика плазмы / З.Г.Ахвледиани [и др.]. – 1996. – Т. 22. – № 5. – С. 470-477.

22. Brandenburg, R. Axial and radial development of microdischarges of barrier discharges in N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mixtures at atmospheric pressure / R. Brandenburg, H. Wagner, A. Morozov // J. Physique. D: Appl. Phys, 2005. – Vol. 38. – PP. 21-25.

23. Swart, P.H. Low maintenance Robust Pulse Power for Pulsed Corona NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> control / P.H. Swart, R Strydom // ICESP 8 Conf, Birmingham Alabama, 2001. – PP. 134-137.

24. Swart, P.H. A New High-Power Inversion Pulser topology employing reduced semiconductor Ratings / P.H. Swart // Special Issue of the Transactions of the South African Institute of Electrical Engineers, 1999. – Vol. 90. – No. 3. – PP. 107-112.

25. Dinelli, G Industrial Experiments on Pulse Corona Simultaneous Removal of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> from Flue Gas / G Dinelli, L Civitano, M Rea // IEEE Trans. Ind. Appl, 1990. – Vol. 26. – No. 3. – PP. 535-541.

26. Penetrante, B.M. Pollution control applications of Pulsed Power Technology / B.M. Penetrante // Proc. 19th IEEE Pulsed Power Conf. – Albuquerque NM, 1993. – PP. 35-37.

27. Swart, P.H. Mobile facility for on-line flue gas characterization / P.H. Swart, R. Strydom, J.M. van Dyk. – 2004. – PP. 98-101.

28. Железняк, М.Б. Моделирование газофазного химического реактора на основе импульсного стримерного разряда для удаления токсичных примесей / М.Б. Железняк, Е.А. Филимонова // Теплофизика высоких температур, 1998. – Т. 36. – № 4. – С. 557-564.

29. Penetrante, B.M. Plasma chemistry and power consumption in nonthermal DeNO<sub>x</sub>, Non thermal plasma techniques for pollution control / B.M. Penetrante // Part A. NATO ASI series, 1993. – Vol. 34. – PP. 65-89.
30. Dhali, S.K. Numerical simulation of streamer propagation in nitrogen at atmospheric pressure / S.K. Dhali, P.F. Williams // Phys. Rev A, 1985. – V. 31. – PP. 1219.
31. Naidis, G.V. On streamer interaction in a pulsed positive corona discharge / G.V. Naidis // J. Phys. D: Appl. Phys., 1996. – V.29. – PP. 779-783.
32. Wang, M.C. Streamer dynamics / M.C. Wang, E.E. Kunhardt // Phys. Rev. A, 1990. – Vol. 42. – PP. 2366-2371.
33. Kulikovsky, A.A. Two-dimensional simulation of the positive streamer in N<sub>2</sub> between parallel-plate electrodes / A.A. Kulikovsky // J. Phys. D: Appl. Phys., 1995. – V. 28. – PP. 2483.
34. Сергеев, Ю.Г. Учет фотоионизации при математическом моделировании газового разряда / Ю.Г. Сергеев // Под ред. И.П. Верещагина. – М.: МЭИ, 1996. – С. 50.
35. Базелян, А.Э., Базелян Э.М. Параметры плазмы катодонаправленного стримера в воздухе: влияние на ток и скорость распространения / А.Э. Базелян, Э.М. Базелян // Теплофизика высоких температур, 1994. – Т. 32. – № 3. – С. 354-362.
36. Косый, И.А. Плазмохимические процессы в неравновесной азотно-кислородной смеси / И.А. Косый, А.Ю. Костинский, А.А. Матвеев // Труды ИОФАН, 1994. – Т. 47. – С. 37-57.
37. Сандаков, В.Д. Повышение производительности установок очистки при воздействии на газовую среду ультрафиолетовым излучением / В.Д.Сандаков, А.Н.Подрезов, И.М. Валеев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 3-4. – С. 96-100.
38. Guberman, S.L. The production of O(1D) from dissociative recombination of O<sub>2</sub><sup>+</sup> / S.L. Guberman // Planet. Space Sci. – 1988. – V. 36. – No. 1. – P. 47.

39. Cox, R. Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry / R. Cox // *J. Phys. Chem. Ref. Data.* – 1980. – No. 9 (2). – P. 295.
40. Niles, F.E. Air like discharges with CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O as impurities / F.E. Niles // *J. Chem. Phys.* – 1969. – V. 52. – No. 1. – P. 408.
41. Shul, R.J. Ion-molecule reactions involving H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> and OH<sup>+</sup> at thermal energy / R.J. Shul // *J. Phys. Chem.* – 1988. – V. 92. – No. 17. – P. 4947.
42. Davies, D.K. Measurements of Swarm Parameters in Dry and Humid Air / D.K. Davies // *Proc. of the 18th Int. Conf. on Phenomena In Ionized Gases.* – Swansea, UK, 1987. – PP. 2-3.
43. Verhaart, H.F.A. The Influence of Water Vapor on Avalanches in Air / H.F.A. Verhaart, P.C.T. van der Laan // *J. Appl. Phys.*, 1984. – Vol. 55. – PP. 3286-3292.
44. Fehsenfeld, F.G. Ion-molecule reactions in NO<sup>+</sup>-H<sub>2</sub>O system / F.G. Fehsenfeld // *J. Chem. Phys.* – 1971. – V. 55. – No. 5. – P. 2120.
45. Zhukov, S.V. Positive streamer development in a short gap in air and oxygen / S.V. Zhukov, A.A. Beloglovsky, M.V. Sokolova // *ISH 99, London, 1999.* – PP. 113-115.
46. Guberman, S.L. The production of O(1D) from dissociative recombination of O<sub>2</sub><sup>+</sup> / S.L. Guberman // *Planet. Space Sci.* – 1988. – V. 36. – No. 1. – P. 47.
47. Fehsenfeld, F.G. Ion-molecule reactions in O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system / F.G. Fehsenfeld // *J. Chem. Phys.* – 1971. – V. 55. – No. 5. – P. 2115.
48. Shofield, K. Critically evaluated rate constants for gaseous reactions of several electronically excited species / K. Shofield // *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 18 (3). – 1979. – P. 723.
49. Cox, R. Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry / R. Cox // *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 9 (2). – 1980. – P. 295.
50. Hampson, R.F. Chemical kinetic and photochemical data for modeling atmospheric chemistry / R.F. Hampson // *NBS technical*, 1975. – 113 p.

51. Сандаков, В.Д. К вопросу очистки газов переменным электрическим полем / В.Д. Сандаков, А.Н. Подрезов, И.М. Валеев // Энергетика Татарстана. – 2014. – № 3-4. – С. 81-83.
52. Сандаков, В.Д. Повышение эффективности устройств очистки газовых сред от  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_2$  / В.Д. Сандаков [и др.] // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 10. – С. 100-101.
53. Сандаков, В.Д. Особенности очистки газовых выбросов с использованием монокристаллических электродов / В.Д. Сандаков [и др.] // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 20. – С. 269-271.
54. Laufer, A.H. Deuterium isotope effect in vacuum ultraviolet absorption coefficients of water and methane / A.H. Laufer // Can. J. Chem. – 1965. – V. 43. – P. 3487.
55. Shul, R.J. Ion-molecule reactions involving  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}^+$  and OH at thermal energy / R.J. Shul // J. Phys. Chem. – 1988. – V. 92. – No. 17. – P. 4947.
56. Hudson, R.D. Critical review of ultraviolet photoabsorption cross-section for molecules of astrophysical and aeronomic interest / R.D. Hudson // Rev. Geophys. Space. Phys. – 1971. – V. 9. – No. 2. – P. 4195.
57. Dahlquist, J.A. Drift velocities of ions in nitrogen / J.A. Dahlquist // J.Chem. Phys. – 1963. – V. 39. – P. 1203.
58. Lowke, J.J. The drift velocities of free and attached electrons in water vapor / J.J. Lowke, J.A. Rees // Australian J. Phys. – 1963. – V. 16. – P. 447.
59. Marode, E. The mechanism of spark breakdown in air at atmospheric pressure between a positive point and plate. / E. Marode // I. Experimental: Nature of the streamer track. J. Appl. Phys. – 1975. – V. 45. – No. 5. – P. 2005.
60. Gallimberti, I. The mechanism of the long spark formation / I. Gallimberti // Journal de physique: Colloque C7. – 1979. – No. 7. – Vol. 40. – PP. 193-250.

61. Kulikovsky, A.A. Positive streamer between parallel plate electrodes in atmospheric pressure air / A.A. Kulikovsky // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1997. – V. 30. – PP. 441-450.
62. Филиппов, Ю.В. Электросинтез озона / Ю.В. Филиппов, В.А. Вобликова, В.И. Пантелеев. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 236 с.
63. Лунин, В.В. Физическая химия озона / В.В. Лунин, М.П. Попович, С.Н. Ткаченко. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 480 с.
64. Самойлович, В.Т. Физическая химия барьерного разряда / В.Т. Самойлович, В.И. Гибалов, К.В. Козлов. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – С. 176.
65. Результаты исследования структуры барьерного разряда / В.В. Андреев [и др.] // Нелинейный мир. – 2009. – Т. 7. – № 11. – С. 811.
66. Сандаков, В.Д. Способы очистки газовых выбросов в энергетике / В.Д. Сандаков // VIII Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения»: сб. мат. докл. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. – Т. 1. – С. 66-67.
67. Сандаков, В.Д. Разработка научных основ технологии и рекомендаций по совершенствованию оборудования для очистки дымовых газов электростанций от оксидов азота и серы / В.Д. Сандаков // X Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения»: сб. мат. докл. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. – Т. 1. – С. 127.
68. Сандаков, В.Д. Применение новых методов очистки газовых сред от диоксидов азота и серы / В.Д. Сандаков, А.Н. Подрезов // XIII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы экологии»: сб. мат. докл. – Тула: Изд-во «Инновационные технологии», 2015. – С. 5-7.
69. Исследование структуры барьерного разряда вблизи электрода с цилиндрическим поперечным сечением / В.В. Андреев [и др.] // Прикладная физика. – 2011. – № 1. – С. 52.
70. Marode, E. A model streamer induced spark formation based on neutral dynamics / E. Marode, F. Bastien // J. Appl. Phys. – 1979. – Vol. 7. – PP. 140-146.

71. Пичугин, Ю.П. Актуальность и эффективность многобарьерных озонаторов / В сб.: Наука и технологии. Материалы 25-го Всероссийского семинара. – М.: Изд-во «Университет и школа», 2003. – С. 36-47.

72. Долгинов, А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. – М.: Энергия, 1968. – 464 с.

73. Трухан, С.Н. Компьютерное моделирование процессов и явлений физической химии / Трухан С.Н., Деревщиков В.С. // Учебно-методический комплекс. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет. – 2012. – 75 с.

74. Finlayson, B.A. Introduction to Chemical Engineering Computing. 2nd Edition. – Wiley, 2012. – 392 p.

75. Силкин, Е. М. Совершенствование промышленной технологии электросинтеза озона // Тезисы докл. Межд. симпозиума, посвящ. чистой воде. – Екатеринбург, 2001. – С. 42-43.

76. Силкин, Е. М. Комбинированные электротехнологии в водоподготовке и водоочистке // Тезисы докл. Межд. симпозиума, посвящ. чистой воде. – Екатеринбург, 2003. – С. 52-53.

77. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука. – 1987. – 592 с.

78. Сандаков, В.Д. Повышение эффективности очистки газовых сред / В.Д. Сандаков, А.Н. Подрезов // XIII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы экологии»: сб. мат. докл. – Тула: Изд-во «Инновационные технологии», 2015. – С. 3-5.

79. Сандаков, В.Д. Особенности применения анизотропных электродов в реакционных камерах очистки вредных газов / В.Д.Сандаков, А.Н. Подрезов // XI Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения»: сб. мат. докл. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – Т. 1. – С. 122-123.

80. Сандаков, В.Д. Особенности применения изотропных электродов для очистки газов в поле стримерной короны / В.Д. Сандаков // VII

Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи – 2016»: сб. мат. докл. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – Т. 3. – С. 285-286.

81. Сандаков, В.Д. Применение монокристаллов для повышения эффективности очистки газовых сред / В.Д. Сандаков, А.Н. Подрезов // XI Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия – 2016»: сб. мат. докл. – Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2016. – Т. 3. – С. 185-187.

82. Dinell, G J. of Electrostatics / G Dinell G, M Rea. – 1990. – Vol. 25. – PP. 23-40.

83. Swart, P.H. All solid state Pulser Design for a Pulsed Corona Flue Gas Pollution Mitigation System / P.H. Swart, R Uys // Proc. ICESP 9 Conf – Kruger Gate, South Africa. – 2004. – PP. 301-304.

84. Melville, W.S. The use of saturable reactors as discharge Devices for Pulse Generators // Proc. Institute for Electrical Engineers (IEE London). – 1951. – Vol. 98. – P. 3.

85. Masuda, S. Control of NO<sub>x</sub> by Positive and Negative Pulsed Corona Discharges / S. Masuda, H. Nakao // Rec. IEEE/IAS. – 1986. – Ann. Conf. – PP. 1173-1182.

86. Аппельт, Г. Введение в методы микроскопического исследования. – М., 1959. – 425 с.

87. Валеев, И.М. Электротехнологические процессы и аппараты / И.М. Валеев, Е.В. Михайлова – учеб. пособие. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2012. – С. 52-57.

88. Deepak k Gupta Design and construction of double-Blumlein HV pulse power supply / Deepak k Gupta, P. I. John // Sadhana. – 2000. – V. 26. – PP. 475-484.

89. Sunka, P. Positive Pulsed Corona Discharge in Coaxial Geometry / P. Sunka, V. Babicky, Glupic, Simek // Intern. Symp. on High Pressure Low Temperature plasma chemistry «Hakone V». Milovy, 1996. – PP. 305-309.

90. Kuzhekin, I.P. Investigation of Streamer Corona Discharge Induced by Rectangular Impulse Voltage / I.P. Kuzhekin, K.I. Kudiakov, A.V. Dudarin // Intern. Symp. on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry «Hakone V». – Milovy, 1996. – PP. 263-267.

91. Смирнов, С.М., Терентьев П.В. Генераторы импульсов высокого напряжения / С.М. Смирнов, П.В. Терентьев. – М.: Энергия, 1964. – 239 с.

92. Авруцкий, В.А. Испытательные и электрофизические установки. Техника эксперимента / В.А. Авруцкий, И.П. Кужекин, Е.Н. Чернов. – М.: МЭИ, 1983. – 264 с.

93. Альбертинский, Б.И. Каскадные генераторы / Б.И. Альбертинский, М.П. Свиньин. – М.: Атомиздат, 1980. – 93 с.

94. Богатенков, И.П. Генератор импульсных напряжений. – С-Пб., АНО, 1999. – 262 с.

95. Кужекина, И.П.. Испытательные и электрофизические установки, техника эксперимента. – М.: МЭИ. – 1983. – 263 с.

96. Месяц, Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.

97. Пичугина, М.Т. Мощная импульсная энергетика. – Томск: Издательство ТПУ, 2005. – 98 с.

98. Пат. 170188 Российская Федерация, МПК ВОЗС 3/09. Устройство очистки газовых сред / Сандаков В.Д., Валеев И.М.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет». – № 2017100314; заявл. 09.01.2017; опуб. 18.04.2017, Бюл. № 11. – 1 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Требования к основным характеристикам газоанализатора CO<sub>2</sub>

Характеристика	Требование
Диапазон измерений	Регулируемый в пределах объемной доли от 0% до 20%
Разрешение	Менее 0,5 % диапазона измерений или менее 100 млн <sup>-1</sup>
Сходимость	Менее ±1% диапазона измерений или менее ±100 млн <sup>-1</sup>
Стабильность	За двухчасовой период: менее ±1% диапазона измерений или менее ±100 млн <sup>-1</sup>
Дрейф нуля	За двухчасовой период: менее ±1% диапазона измерений или менее ±100 млн <sup>-1</sup>
Случайная составляющая основной погрешности	0,5 Гц и более: менее ±1% диапазона измерений или менее ±100 млн <sup>-1</sup>
Влияние неизмеряемых компонентов	Изменение показаний, обусловленное наличием паров воды, должно быть менее 20 млн <sup>-1</sup> на 1% объемной доли паров воды (анализ «влажной» пробы)
Время установления показаний	Не более 10 с с момента поступления пробы в газоанализатор до получения показаний, составляющих 90% окончательного значения
Линейность	Линейность показаний проверяют в каждом диапазоне при объемных долях 30, 60 и 90% диапазона измерений с использованием либо отдельных газовых смесей, либо делителя газа. Отклонение показаний от прямой линии по методу наименьших квадратов должно быть не менее ±2% диапазона измерений

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Вольт-амперные характеристики импульсной стримерной короны для  
различных скоростей воздушного потока

№	U, кВ	$\delta U$ , В	I, мА	
1	0,8	0	0	09.02.2016 г. Кратность воздухообмена 0,5 (250 л/мин)
2	1,4	0,6	0	
3	2	1	0	
4	2,4	1	1,06	
5	3,2	1,3	1,27	
6	3,8	2,5	1,7	
7	4,2	5	2,1	
8	4,8	13	5,2	
9	5,1	57	17	появление короны
10	5,9	76	22,1	
11	6,4	100	27,1	
12	7,2	127	31,3	
13	8,1	131	35,2	яркое свечение
14	9	149	40,1	
15	9,8	163	43,5	
16	10,2	186	47,1	
17	10,7	192	51,2	
18	11,4	210	55,6	
19	12,1	227	58	

№	U, кВ	$\delta U$ , В	I, мА	
1	0,8	0	0	10.02.2016г. Кратность воздухообмена 1 (500 л/мин)
2	1,4	0,6	0	
3	2	1	0,98	
4	2,4	1,3	1,17	
5	3,2	2,1	1,7	
6	3,8	3	2,1	
7	4,2	7	3,2	
8	4,8	17	6,1	
9	5,1	65	16,2	появление короны
10	5,9	84	21	
11	6,4	109	26,1	
12	7,2	128	31	яркое свечение
13	8,1	141	34,2	
14	9	163	38,4	
15	9,8	180	41,8	
16	10,2	188	45,1	
17	10,7	212	49,7	
18	11,4	225	54	
19	12,1	249	56,9	

№	U, кВ	$\delta U$ , В	I, мА	
1	0,8	0	0	10.02.2016г. Кратность воздухообмена 2 (1000 л/мин)
2	1,4	0,5	0	
3	2	1	0,86	
4	2,4	1,2	1,01	
5	3,2	1,9	1,5	
6	3,8	3	2,2	
7	4,2	8	3,7	
8	4,8	16	5,9	
9	5,1	67	15	появление короны
10	5,9	85	18,3	
11	6,4	112	25,1	
12	7,2	140	29	
13	8,1	151	34,1	яркое свечение
14	9	170	36,8	
15	9,8	187	40,9	
16	10,2	205	42,7	
17	10,7	222	47,9	
18	11,4	247	52,3	
19	12,1	273	57,1	

№	U, кВ	$\delta U$ , В	I, мА	
1	0,8	0	0	10.02.2016г. Кратность воздухообмена 3 (1500 л/мин)
2	1,4	0,7	0,1	
3	2	1	0,89	
4	2,4	1	1	
5	3,2	1,9	1,3	
6	3,8	3	2,1	
7	4,2	7	3,9	
8	4,8	18	4,2	
9	5,1	75	15,2	появление короны
10	5,9	99	19	
11	6,4	124	25,2	
12	7,2	145	28,1	яркое свечение
13	8,1	161	32,9	
14	9	180	35,1	
15	9,8	199	40,2	
16	10,2	212	43,1	
17	10,7	231	46,4	
18	11,4	258	51,7	
19	12,1	289	57	

№	U, кВ	$\delta U$ , В	I, мА	
1	0,8	0	0	11.02.2016г. Кратность воздухообмена 0,5 (2500 л/мин) другой компрессор
2	1,4	0	0	
3	2	0,3	0,001	
4	2,4	1	0,7	
5	3,2	1,6	1,01	
6	3,8	4	2,1	
7	4,2	8	2,9	
8	4,8	17	3,9	
9	5,1	72	13,1	появление короны
10	5,9	100	17,2	
11	6,4	123	23,8	
12	7,2	151	26,1	
13	8,1	172	31,4	яркое свечение
14	9	190	36	
15	9,8	215	38,2	
16	10,2	229	42	
17	10,7	249	45,1	
18	11,4	271	49,2	
19	12,1	290	55	

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

## Акты внедрения результатов диссертационной работы

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

**КГЭУ**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУК РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)  
Красносельская ул., д. 51, Казань, 420066  
тел./факс: 8 (843) 662-43-30, 662-43-25  
www.kgeu.ru e-mail: kgeu@knn.ru

**УТВЕРЖДАЮ**  
Проректор по УР КГЭУ  
А.В. Леонтьев  
2018 г.

**АКТ**  
внедрения результатов диссертационной работы  
«Совершенствование и интенсификация процесса очистки воздуха от примесей в замкнутых помещениях импульсной стримерной короной»  
Сандакова Виталия Дмитриевича

Результаты диссертационной работы «Совершенствование и интенсификация процесса очистки воздуха от примесей в замкнутых помещениях импульсной стримерной короной» внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» при реализации основной образовательной программы магистратуры «Техника высоких напряжений» по направлению подготовки: 13.04.02-«Электроэнергетика и электротехника».

В соответствии с программой подготовки по «Технике высоких напряжений» результаты исследований диссертационной работы входят в содержания разделов изучаемых дисциплин «Электротехнологические процессы и аппараты», «Техника высоких напряжений» кафедры «Электрические станции» им.В.К.Шибанова. Обновлено и внесены изменения в их рабочие программы. По результатам исследований Сандакова В.Д. разработаны и созданы установки для лабораторных занятий по изучению вопросов «Газовые электрические разряды», «Электротехнологические процессы и устройства очистки атмосферного воздуха от вредных оксидов в замкнутых помещениях».

Директор института электроэнергетики  
ФГБОУ ВО «КГЭУ», д.т.н., проф.

Зав. каф. «Электрические станции»  
Им.В.К.Шибанова  
ФГБОУ ВО «КГЭУ», к.т.н., проф.

**И.В.Ившин**  
**С.М.Маргулис**



ООО «КАМАВТОЦЕНТР»  
Официальный дилер ПАО «КАМАЗ»

ул. Столичная, д. 30 г. Зеленодольск  
Республика Татарстан, Россия,  
422545

тел (84371) 3-77-70  
e-mail: zaekamaz@mail.ru  
ОГРН 1161690131261  
ИНН 1648043711 КПП 164801001

«12» марта 2018г

### АКТ

внедрения результатов работы Сандакова Виталия Дмитриевича  
«Совершенствование и интенсификация процесса очистки воздуха от примесей  
в замкнутых помещениях импульсной стримерной короной».

Результаты диссертационного исследования Сандакова В.Д. на тему:  
«Совершенствование и интенсификация процесса очистки воздуха от примесей  
в замкнутых помещениях импульсной стримерной короной» обладают  
актуальностью, представляют практический интерес и были использованы при  
разработке системы очистки воздушной среды ремонтного цеха от  
отработанных газов автомобилей с дизельными двигателями.

При создании системы очистки был применен разработанный  
профессором Валеевым И.М. периодический источник высокого напряжения с  
использованием рекомендуемых диссертантом электрических параметров.

Двухточечная очистка воздуха позволила обеспечить снижение вредных  
примесей до нормативов ПДК при приемлемом уровне затрат.

Выражаем диссертанту Сандакову В.Д. признательность за  
предоставленную возможность практического применения результатов его  
диссертационного исследования и надеемся на активное продолжение нашего  
сотрудничества.

Генеральный директор  
ООО «КАМАВТОЦЕНТР»



Силантьев А.В.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Патент на полезную модель устройства очистки газовых сред

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 170188

**УСТРОЙСТВО ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ СРЕД**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский государственный энергетический университет"* (RU)

Авторы: *Сандаков Виталий Дмитриевич (RU),  
Валеев Ильгиз Миргалимович (RU)*

Заявка № 2017100314

Приоритет полезной модели 09 января 2017 г.

Дата государственной регистрации в  
Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 18 апреля 2017 г.Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает 09 января 2027 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ильев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** <sup>(11)</sup> **170 188** <sup>(13)</sup> **U1**(51) МПК  
B03C 309 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(12) **ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

(21)(22) Заявка: 2017100314, 09.01.2017  
 (24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
 09.01.2017  
 Приоритет(ы):  
 (22) Дата подачи заявки: 09.01.2017  
 (45) Опубликовано: 18.04.2017 Бюл. № 11  
 Адрес для переписки:  
 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51,  
 Казанский государственный энергетический  
 университет (ОИМС)

(72) Автор(ы):  
 Сандаков Виталий Дмитриевич (RU),  
 Валеев Ильгиз Миргалимович (RU)  
 (73) Патентообладатель(и):  
 Федеральное государственное бюджетное  
 образовательное учреждение высшего  
 образования "Казанский государственный  
 энергетический университет" (RU)  
 (56) Список документов, цитированных в отчете  
 о поиске: RU 144782 U1, 27.08.2014. SU  
 988341 A1, 15.01.1983. SU 980776 A1,  
 15.12.1982. RU 2265485 C2, 10.12.2005. RU  
 70800 U1, 20.02.2008. CN 204564343 U,  
 19.08.2015.

(54) **УСТРОЙСТВО ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ СРЕД**(57) **Формула полезной модели**

1. Устройство очистки газовых сред, содержащее импульсный источник высокого напряжения, к положительному и отрицательному полюсам которого подключены соответственно положительный и отрицательный электроды, расположенные друг от друга на расстоянии  $10 \div 50$  мкм, помещенные в диэлектрическую реакционную камеру, имеющую входной канал подачи газовой среды, загрязненной вредными примесями, размещенный со стороны отрицательного электрода, и выходной канал очищенной газовой среды, при этом положительный электрод выполнен в виде металлической сетки, отличающееся тем, что между положительным и отрицательным электродами расположен дроссель, а отрицательный электрод выполнен в виде иглы с возможностью регулирования по длине.

2. Устройство очистки газовых сред по п. 1, отличающееся тем, что дроссель расположен на границе отрицательного электрода.

RU 170188 U1

RU 170188 U1