

На правах рукописи

ЕЛИСТРАТОВ ЕВГЕНИЙ АНДРЕЕВИЧ

**ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ОБЪЕМНЫХ РАЗРЯДОВ В  
ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ  
ДЛЯ ЦЕЛЕЙ СТЕРИЛИЗАЦИИ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ**

Специальность 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2012

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ», Москва

Научный руководитель      доктор физико-математических наук,  
профессор  
Школьников Эдуард Яковлевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
начальник отделения научно-технического центра физики высоких плотностей энергии и направленных потоков излучения  
Карелин Владимир Иванович

кандидат физико-математических наук,  
НИЦ «Курчатовский институт»  
ведущий научный сотрудник института физики токамаков  
Черненко Андрей Сергеевич

Ведущая организация: ФГУП Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований

Защита состоится «19» декабря 2012 в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.01 при НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31, тел. +7 499 323-95-26, 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Просим Вас принять участие в обсуждении диссертации или прислать отзыв в 2-х экземплярах, заверенный печатью Вашей организации.

Автореферат разослан “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент



И.С. Щедрин

## **Общая характеристика работы**

В настоящее время все большую актуальность приобретают работы, посвященные исследованиям низкотемпературной неравновесной плазмы газовых разрядов, что объясняется высокой эффективностью использования подобных плазменных технологий во многих областях научной и практической деятельности человека. В зависимости от условий генерации плазмы возможно получение плазмы с широким диапазоном параметров, таких как химический состав, плазменные температуры, степень ионизации, характер взаимодействия с различными веществами и материалами.

Особого внимания заслуживают работы, направленные на исследование свойств разрядных процессов, определяющих возможности их применения для стерилизационной и обеззараживающей обработки в практической медицине. Это направление приобретает особое значение в последние годы, что связано с возрастающей потребностью человечества в новых, не требующих высоких температур технологиях стерилизации и обеззараживания с высокой производительностью, простотой эксплуатации, эффективностью и надежностью. Использование плазменных технологий стерилизации отвечает указанным требованиям

В качестве источников низкотемпературной плазмы атмосферного давления в настоящее время рассматриваются различные типы газовых разрядов, среди которых можно отметить скользящий, коронный, дуговой и барьерный разряды. Однако, каждому из этих типов разрядов присущи характерные особенности, ограничивающие возможности их практического применения.

Особое место занимают исследования неравновесной плазмы импульсных разрядов атмосферного давления, с объёмной пространственной структурой. Подобные разряды не требуют предварительной подготовки газовой смеси, могут обладать достаточно высокой активностью плазмохимических процессов в разрядной области, при этом разрядная область, однородно заполняемая плазмой, может иметь достаточно большие объёмы (более нескольких литров).

Несмотря на широкий круг работ, посвященных исследованиям различных характеристик данного типа разрядов, и доказанную высокую эффективность использования таких разрядов для медицинских целей, многие особенности их остаются мало исследованными, а использование газоразрядных установок в медицине и сопутствующих областях (защита окружающей среды, очистка загрязненных сред, обработка поверхностей материалов) весьма ограничено.

Целью настоящей работы исследование процессов генерации низкотемпературной плазмы электрических разрядов с объемной пространственной структурой в воздушной среде атмосферного давления под воздействием периодических высоковольтных импульсов напряжения наносекундной длительности для создания эффективной технологии стерилизации и обеззараживания.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Определены оптимальные режимы генерации объемного разряда для наиболее эффективной наработки основных активных продуктов плазмохимических реакций в воздушной среде атмосферного давления, включая озон, монооксид азота, гидроксильную группу, высшие оксиды азота с учетом влажности воздуха в разрядный и послеразрядный период. Показано, что концентрации основных продуктов плазмохимических реакций достигают своих максимальных значений и наиболее долго сохраняют их в послеразрядный период при определенных сочетаниях величин напряженности прикладываемого электрического поля и длительности импульсов. Основным критерием при этом является достижение в разрядной области концентрации электронов близкой к максимальной для объемной формы разряда и составляющей  $n_e = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .
2. Исследованы режимы работы комбинированной электродной системы коаксиальной конфигурации с реализацией в ней одновременного возбуждения двух разрядов различного типа (основного объемного и вспомогательного поверхностного) от одного импульса напряжения при длине основного межэлектродного промежутка 7,5 мм. Данная электродная система отличается от плоских конфигураций более равномерным распределением электрических полей между электродами и обладает рядом принципиальных преимуществ по эффективности работы установки, в том числе и по наработке активных продуктов плазмохимических реакций.
3. Проведено исследование оптических эмиссионных спектров и определение по ним плазменных температур для объемных импульсных атмосферных разрядов, при длительностях импульсов напряжения электропитания  $\sim 100$  нс. Исследовано влияние параметров генерации разрядов (частоты следования и амплитуды импульсов, длины межэлектродного промежутка) на вращательную температуру частиц плазмы, показано, что вращательная температура лежит в пределах от 300 до 700 К.
4. Экспериментально измерена электронная плотность плазмы объемных наносекундных импульсных разрядов в воздухе атмосферного давления в тече-

ние длительности импульса, с помощью специально разработанного многолучевого интерферометра Фабри-Перо. При выбранных условиях генерации разрядов максимальное значение электронной плотности составило  $(1,5 \pm 0,3) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , что сопоставимо с предельным значением для объемных разрядов.

5. Проведен анализ компонентного состава рабочего газа, прошедшего через разряд при различных условиях его генерации. Экспериментально измеренные значения концентрации озона на выходе из разрядной области достигают величин  $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , что соответствует максимальным значениям его концентрации, полученным при проведении численного моделирования в воздушной среде атмосферного давления.

Практическая ценность. Представленные результаты исследований режимов генерации и характеристик импульсно-периодических объемных разрядов, возбуждаемых в воздухе при атмосферных условиях, позволяют создать новые технологии стерилизации и обеззараживания, обладающие принципиальными преимуществами перед используемыми в настоящее время. Данные технологии отличаются высокой эффективностью и малым временем обработки объектов, обусловленной широким спектром агентов стерилизации. Низкотемпературный характер плазмы разряда позволяет стерилизовать термочувствительные материалы, которые широко используются в различных областях науки и техники. Стерилизационные плазменные установки на этой основе обладают высоким потенциалом для их внедрения в медицинских учреждениях, замкнутых биотехнических системах длительного функционирования и т.д.

#### На защиту выносятся

1. Результаты анализа динамики наработки активных продуктов плазмохимических реакций при различных условиях генерации наносекундных объемных атмосферных разрядов.
2. Результаты исследования режимов генерации, параметров и структуры объемных атмосферных наносекундных импульсных разрядов для электродных систем различных конфигураций: «лезвие-плоскость», «гребенка-плоскость», комбинированной коаксиальной электродной системе.
3. Результаты исследования оптического излучения разрядов в видимой области спектра для электродной системы «гребенка-плоскость» и «лезвие-плоскость».

4. Результаты исследования оптических эмиссионных спектров разрядов и определения плазменных температур спектральными методами.
5. Результаты измерения электронной плотности плазмы разряда в электродной системе «гребенка-плоскость» интерферометром Фабри-Перо.
6. Анализ компонентного состава рабочего газа, прошедшего через наносекундный объемный атмосферный разряд.

Достоверность научных результатов исследований, изложенных в работе, обеспечивается сравнением результатов теоретических расчетов и численного моделирования с экспериментально полученными данными, использованием апробированных методов и методик при решении практических задач, всесторонним анализом результатов использования предложенных экспериментальных методов при проведении исследований.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации были представлены на следующих конференциях: Научная сессия МИФИ 2009, 2010, 2011, 2012; Курчатовская молодежная научная школа 2009, 2010; VII российская конференция «Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля окружающей среды». 2010; XIV Международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «МОЛОДЕЖЬ И НАУКА». 2010.

Публикации. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 4 работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 99 источников. Общий объем диссертации – 129 страниц, включая 50 рисунков.

## Содержание работы

**Первая глава** посвящена моделированию плазмохимических процессов, протекающих под действием мощных импульсных электрических полей в азотно-кислородных смесях с добавлением паров (молекул) воды.

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, именно активные продукты плазмохимических реакций, такие как озон  $O_3$ ; атомарный и синглетный кислород  $O$ ; гидроксильные радикалы  $OH$ ; окислы азота  $NO$ ,  $NO_2$  и в ряде случаев отрицательный ион кислорода  $O_2^-$ , играют наиболее значимую роль в процессе инактивации микроорганизмов. В этой связи исследование влияния условий генерации разрядов на протекание плазмохимических процессов является весьма важной для практических целей задачей.

Предварительные исследования показали, что даже небольшие изменения начальных условий могут приводить к серьезным изменениям, как структуры генерируемых разрядов, так и концентраций нарабатываемых в них активных веществ. При этом проведение экспериментальных исследований, охватывающих весь диапазон изменения параметров, влияющих на разряд, представляется весьма трудоемкой и технически сложной задачей. В этой связи для предварительного определения диапазонов рабочих параметров предложено воспользоваться компьютерными моделями, описывающими динамику протекания плазмохимических процессов в азотно-кислородной среде.

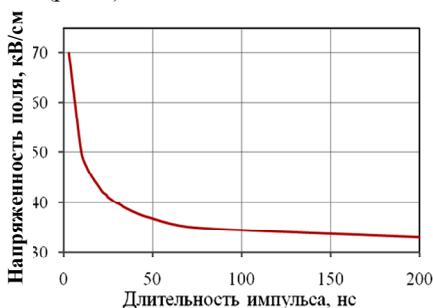
Модель построена на основе кинетической схемы, которая описывает широкий спектр реакций и позволяет определять химический и ионный состав холодного (до 500 К) газа в импульсно-периодическом разряде. Данный подход позволяет проследить динамику компонентного состава газоразрядной плазмы, как на стадии развития разряда, так и в последующий релаксационный период. Это позволяет получить зависимости наработки наиболее важных для медицинских применений химически активных соединений, а также электронной компоненты плазмы от конкретных режимов работы.

В качестве параметров для моделирования задается следующее начальное состояние газовой смеси: концентрация молекул азота  $n(N_2)=2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , кислорода  $n(O_2)=0,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , начальная степень ионизации газа (содержание ионов азота ( $N_2^+$ ) и кислорода ( $O_2^+$ )) считалась нулевой, начальная концентрация электронов составляла  $n(e)=10^6 \text{ см}^{-3}$ , начальная температура газовой смеси  $T=300\text{K}$ . Величина и длительность прямоугольного импульса электрического поля, под воздействием которого происходят плазмохимические ре-

акции и начальная концентрация молекул воды ( $n(\text{H}_2\text{O})$ ) варьировались при проведении моделирования.

При моделировании разрядов с объемной пространственной структурой в атмосферном воздухе важным параметром является концентрация в разрядной области свободных электронов. Проведенные исследования указывают на существование предельного значения этой величины, составляющего около  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ . При превышении этой величины создаются условия для контракции разряда. В тоже время уменьшение этой величины приводит к резкому снижению концентраций нарабатываемых активных веществ.

Как показали расчеты, при неизменном начальном состоянии рабочей газовой смеси каждому значению длительности импульса соответствует свое значение напряженности электрического поля в разрядном промежутке, при котором максимальное значение электронной концентрации достигает порогового уровня  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  (рис.1).



*Рис.1. Зависимость напряженности электрического поля от длительности импульса при наработке пороговой электронной концентрации.*

Исходя из представленной зависимости, можно сделать вывод, что оптимальными значениями параметров системы импульсного электропитания разряда являются следующие: длительность импульсов 30-50 нс, напряженность электрического поля в разрядном промежутке 35-45 кВ/см. В этих пределах не наблюдается резких изменений концентрации электронов при флуктуациях величины электрического поля и длительности импульсов, что дает возможность управления режимом горения диффузного разряда путем регулировки напряженности электрического поля в межэлектродном зазоре.

На рис.2 показана динамика наработки наиболее важных активных продуктов плазмохимических реакций во время протекания разряда и в течение 60 секунд после его завершения в условиях максимальной эффективности

разрядных процессов. Длительность импульса электрического поля составляла 30 нс, амплитуда напряженности электрического поля 40 кВ/см, содержание молекул воды  $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

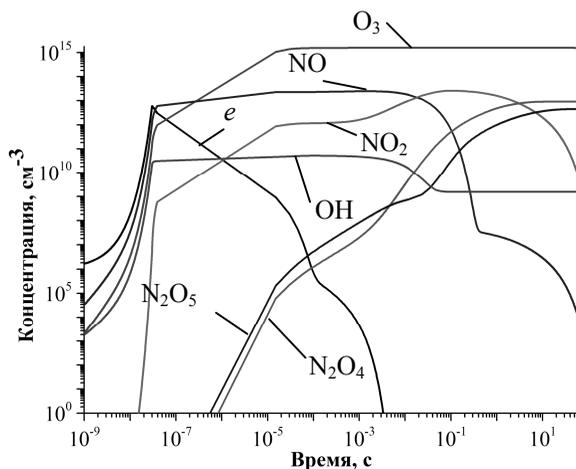


Рис. 2. Динамика наработки активных продуктов плазмохимических реакций в азотно-кислородной смеси под действием импульсного электрического поля время и концентрации изображены в логарифмическом масштабе.

Данные рис.2 показывают, что плазмохимические процессы протекают как в разрядный период, так и после завершения воздействия электрического поля. При этом характер зависимостей для различных компонент за весь промежуток времени сильно различается и изменение параметров импульсов высоковольтного электропитания разрядов и исходного состояния рабочей газовой смеси может приводить к сильным изменениям в динамике наработки различных компонент плазмохимических реакций.

На основе исследования графиков динамики концентраций активных компонент, при различных условиях, сделаны следующие выводы:

Концентрация озона достигает своего максимального значения ( $10^{15}$ - $10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) и наиболее долго сохраняется в послеразрядный период в случае максимальной концентрации электронов  $n(e)=10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Активная генерация монооксида азота ( $n(\text{NO}) > 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) при сохранении его концентрации на максимальном уровне в послеразрядный период происходит в высокоэнергетичных режимах при значительном превышении концентраций электронов предельной величины для объемного разряда

( $n(e) \geq 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), т.е. в случае перехода разряда в контрагированную форму. В объемном разряде монооксид азота практически не образуется.

Повышение величины напряженности электрического поля и длительности импульса приводит к росту нарабатываемых концентраций OH, NO<sub>2</sub> и высших оксидов азота (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

Повышение влажности приводит к росту концентрации гидроксильной группы OH. На динамике концентраций остальных компонент в разрядный период повышение влажности не сказывается, но приводит к их изменению после завершения действия электрического поля. при увеличении влажности скорость распада O<sub>3</sub> в послеразрядный период значительно увеличивается. Следовательно, для работы на атмосферном воздухе без его предварительной осушки и подготовки необходимо уменьшать время транспортировки продуктов плазмохимических реакций от разрядной области до реакционной камеры.

Был сделан вывод, что для увеличения эффективности работы разряда при условии сохранения им объемной формы необходимо придерживаться параметров, при которых концентрация электронов достигает значения  $n(e) = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . При этом для различных сочетаний напряженностей поля и длительностей импульсов, удовлетворяющих данному условию (представлены в виде графика рис.1) наблюдаются практически одинаковые динамики продуктов плазмохимических реакций. Это свидетельствует о том, что одним из определяющих параметров работы установки с точки зрения эффективности наработки активных веществ является энергозатрат в газовый объем.

Сделанные в результате моделирования выводы послужили основой для выбора параметров генерации разрядов при проведении экспериментальных исследований.

**Во второй главе** приводится описание установки, используемой для проведения экспериментальных исследований импульсно-периодических объемных разрядов, возбуждаемых в атмосферном воздухе. Экспериментальная установка состоит из высоковольтного генератора наносекундных импульсов, набора измерительного оборудования для и электродных систем. Приводятся результаты моделирования распределения электростатических полей в электродных системах различных конфигураций, на основе которых сделаны выводы об особенностях генерации в них разрядов.

Генератор импульсов разработан в соответствии с требованиями, выработанными в Гл.1. При этом учитывалось, что при увеличении скорости нарастания импульсного напряжения однородность возбуждаемого разряда улучшается, а для увеличения эффективности наработки агентов стерилизации выглядит перспективным повышение частоты следования импульсов до 1 кГц и выше. Импульсы имеют следующие параметры: передний фронт импульса порядка нескольких десятков наносекунд, длительность от 30 нс до 500 нс, амплитуда 25-60 кВ, частота следования импульсов до 1 кГц.

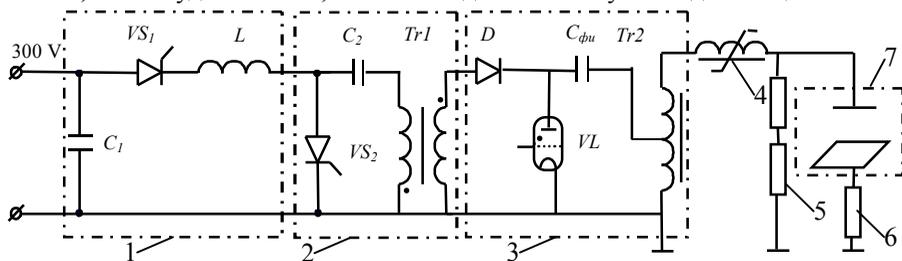


Рис.3. Схема импульсного электропитания установки: 1- сетевое зарядное устройство; 2-высоковольтное импульсное зарядное устройство; 3- формирователь наносекундных импульсов; 4 - магнитный ключ; 5 - делитель напряжения; 6 - токовый шунт; 7 - газоразрядная камера.

Упрощенная схема электропитания установки и расположения датчиков для измерения электрических параметров разряда представлена на рис.3.

Структура генератора включает в себя три каскада последовательной компрессии импульсов (1,2,3) с одновременным увеличением их амплитуды. Уровень зарядного напряжения от сети переменного тока регулируется в пределах 150–310 В, напряжение подается на выпрямительный диодный мост, после чего происходит зарядка фильтровой емкости  $C_1$  (1,5 мФ) до максимального напряжения 310 В. Срабатывание сетевого зарядного устройства приводит к передаче энергии из емкости  $C_1$  в емкостной накопитель  $C_2$  (3 мкФ), заряжая его до напряжения 560 В.. Срабатывание высоковольтного импульсного зарядного устройства происходит при отпирании тиристора  $VS_2$ , в результате чего энергия передается в конденсаторную сборку  $C_{\text{фи}}$  (2,2 нФ). Максимальное напряжение на вторичной обмотке  $Tr1$  достигает 20 кВ. Импульс напряжения на нагрузке формируется при срабатывании тиратрона  $VL$  в формирователе наносекундных импульсов. Амплитуда импульса напряжения на нагрузке достигает 60 кВ, длительность импульса -

30÷100 нс. Для дополнительного уменьшения длительности фронта импульса, на выходе формирователя устанавливается магнитный ключ (4), представляющий собой нелинейную индуктивность.

Работа генератора в значительной степени определяется нелинейной плазменной нагрузкой, в результате чего параметры импульса напряжения (форма, длительность, амплитуда) зависят от условий зажигания разряда.

Метрологическое обеспечение установки включает в себя высоковольтный делитель напряжения (5) и низкоиндуктивные токовые шунты (6). Разрядный узел располагается в герметичной экранированной камере (7).

Генерация разрядов производилась в электродных системах различной конфигурации (см. рис.4). Использовалась двухэлектродная система типа «лезвие-плоскость» (рис.4а) с обострением электрических полей вблизи высоковольтного электрода представляющего собой лезвие длиной 6 см, заземленный электрод имел специальную профилированную форму, для предотвращения обострения поля по краям электродной системы. Длина разрядного промежутка составляет 1-3 см.

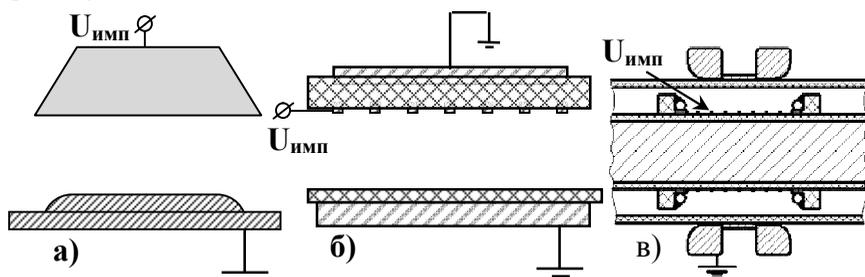


Рис. 4. Конструкции электродных систем: 1 – «лезвие-плоскость»; 2 – трехэлектродная система «гребенка-плоскость»; 3 – коаксиальная электродная система.

Для более эффективной и стабильной генерации разрядов были использованы трехэлектродные системы типа «гребенка-плоскость» (рис.4б) с одновременным возбуждением двух разрядов различного типа от одного импульса напряжения: барьерного разряда, развивающегося по поверхности диэлектрика, и объемного разряда в основном межэлектродном промежутке. Поверхностный разряд является вспомогательным и служит для увеличения эффективности разрядных процессов в основном объеме за счет УФ-излучения и плазменного слоя поверхностного разряда, выполняющего

функцию плазменного электрода для основного разряда. Высоковольтный электрод выполнен на одной из сторон диэлектрической пластины и представляет собой гребенчатую структуру из полосок фольги. На обратной стороне пластины расположен ответный плоский заземленный электрод. Объемный разряд формируется в воздушном промежутке между высоковольтным электродом и вторым заземленным электродом. Для повышения устойчивости разряда на поверхности заземленного электрода расположена диэлектрическая пластина.

Однако, такие электродные системы имеют ряд существенных недостатков, в связи с чем была предложена коаксиальная конфигурация электродной системы (рис.4в). Основу конструкции составляют две соосно расположенные трубки из кварцевого стекла. Внутри меньшей трубки расположен один из заземленных электродов. Второй заземленный электрод расположен на внешней поверхности большой трубки и имеет профилированную форму для выравнивания напряженностей полей вдоль оси электродной системы. Высоковольтный электрод расположен на внешней поверхности меньшей трубки и представляет собой спираль из проволоки толщиной 0,4 мм, шаг спирали 4 мм. На концах спирали расположены экранирующие кольца диаметром 3 мм, уложенные в пазы полиэтиленовых колец, что приводит к ослаблению краевых эффектов и способствует выравниванию полей вдоль оси электродной системы. Длина межэлектродного промежутка фиксирована и составляет  $d_{\text{МЭП}}=7,5$  мм.

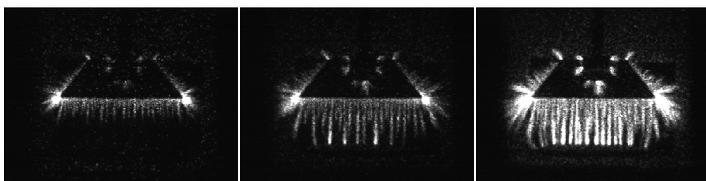
Проведенный численный расчет распределения электростатических полей для электродной системы «гребенка-плоскость» показал, что наибольшие значения электрического поля (до 800 кВ/см) наблюдаются вблизи высоковольтного электрода. При этом, вблизи каждой полоски фольги влияние на распределение поля соседних полосок мало. В межэлектродном промежутке вблизи высоковольтного электрода поле распределено вдоль поверхности электродов неравномерно, между полосами существуют области, в которых оно меняет свое направление на противоположное. По мере удаления от высоковольтного электрода распределение поля становится более равномерным, однако наблюдается спад его напряженности до величины 17 кВ/см.

В коаксиальной электродной системе величины электрических полей вблизи высоковольтного электрода составляет 300-600 кВ/см. Усиливается взаимное влияние полей соседних витков высоковольтного электрода, за счет

чего в межэлектродном промежутке поле более равномерно распределяется вдоль поверхности электродов и направлено практически перпендикулярно ей. Электрическое поле слабее меняется вдоль межэлектродного промежутка, и его величина не падает ниже 37 кВ/см, что хорошо соотносится с требованиями, выработанными в первой главе. На краях высоковольтного электрода величина компоненты электрического поля, направленной вдоль диэлектрика, значительно меньше чем в плоской, что препятствует развитию поверхностных разрядов за пределы разрядной области. Подавление этих разрядов способствует повышению энергоэффективности установки.

**В третьей главе** исследуются электрические характеристики и внешний вид разрядов. Проведенные эксперименты позволили выделить диапазоны рабочих параметров и геометрических характеристик электродных систем, в которых генерация объемных разрядов является наиболее эффективной и устойчивой.

Для исследования пространственной структуры генерируемого разряда с помощью высокоскоростной электронно-оптической камеры Bifo K008 была получена серия его фотографий с временем экспозиции 10 нс.



*Рис.5. Характерный вид разряда в электродной системе «лезвие-плоскость» в различных стадиях его развития.*

Пример фотографий представлен на рис.5. Фотографии сделаны при работе с электродной системой «лезвие-плоскость», длина межэлектродного промежутка составляла 2,5 см, амплитуда импульса напряжения 40 кВ. Фотографии показывают, что развитие разрядных процессов начинается с кромки высоковольтного электрода, одновременно в разряде развивается 10-15 оболоченных плазменных каналов равной интенсивности диаметром 1,3-2,0 мм.

На рис. 6 представлены осциллограммы импульса напряжения ( $U$ ) и тока ( $I$ ) разряда в электродной системе «лезвие-плоскость», регистрируемые при амплитуде импульса напряжения 50 кВ, длине межэлектродного промежутка 2,5 см, частоте 50 Гц, и расчетный график вложения энергии в разряд ( $W$ ) при диффузной форме горения разряда.

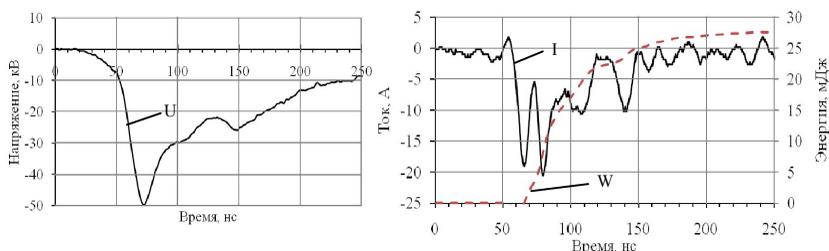


Рис. 6. Импульсы напряжения ( $U$ ), тока ( $I$ ) и динамика вложения энергии ( $W$ ) диффузного разряда ( $d_{МЭП}=2,5$  см;  $f=50$  Гц) для электродной системы «лезвие-плоскость».

Импульс напряжения имеет форму типичную для формирователей с резистивно-емкостными разрядными контурами: за коротким фронтом следует относительно длительный спад напряжения. Импульс тока имеет сложную форму. На переднем фронте импульса напряжения формируется короткий пик емкостного тока межэлектродного промежутка амплитудой 10-20 А, длительностью около 10 нс. В дальнейшем в разряде начинает преобладать активная составляющая тока. На этой стадии в разряде выделяется основная доля энергии. Энерговклад в разряд ( $W$ ), рассчитываемый исходя из осциллограмм напряжения и тока, составляет 20 – 30 мДж., максимальное значение его при диффузной форме горения не превышает 40 мДж.. При превышении этих параметров разряд может переходить в контрагированную форму. Использование дополнительного диэлектрического барьера на заземленном электроде приводит к уменьшению величины активного тока и энергосодержания одиночного импульса, в то же время частота следования импульсов может быть повышена до килогерцового уровня при сохранении разрядом объемной структуры.

На рис.7 представлены графики зависимости предельной частоты следования импульсов, при которой разряд сохраняет диффузную форму от амплитуды импульса напряжения (а) и величины пика активного тока (б), при различных длинах межэлектродного промежутка.

С увеличением амплитуды импульсов напряжения, значение частот, при которых происходит пробой, снижается. При этом при меньших значениях пороговой частоты, увеличивается активный ток, при котором происходит контракция разряда. Уменьшение длин зазоров также приводит к уменьше-

нию частот, при которых происходит контракция разряда, однако, значения величин пиков активного тока при этом остаются близки.

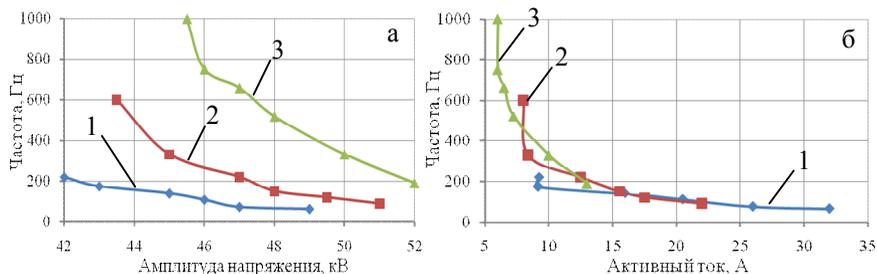
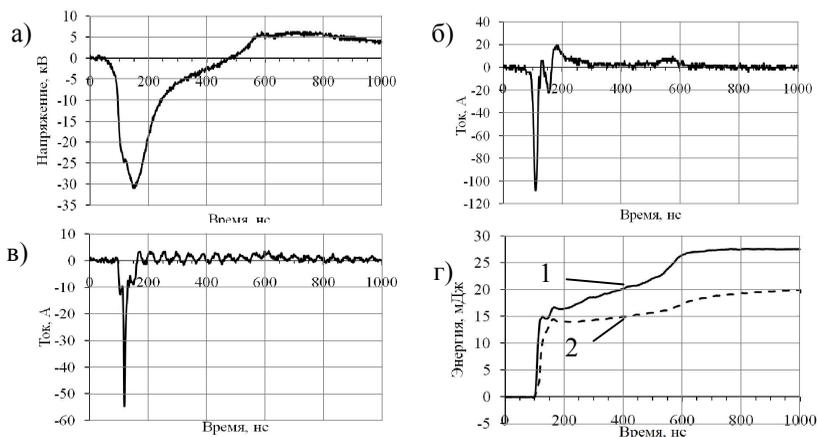


Рис. 7. Зависимость максимальной частоты следования импульсов от амплитуды напряжения (а) и максимума активного тока (б) при объемной структуре разряда: 1 –  $d_{МЭП}=21$  мм; 2 –  $d_{МЭП}=25$  мм; 3 –  $d_{МЭП}=29$  мм.

Характерный вид графиков напряжения, токов и расчетного энерговложения в разряды в электродной системе «гребенка-плоскость» представлен на рис.8. Длина межэлектродного промежутка составляет  $L_V=7,5$  мм, шаг полюсов фольги  $d_S=4$  мм. На заземленном электроде установлен барьер из оргстекла толщиной  $l_B=1$  мм.

Импульс напряжения (рис.8а), прикладываемый к высоковольтному электроду, в данном случае имеет амплитуду около 30 кВ при длительности фронта около 50 нс и длительности импульса на полувысоте  $\sim 110$  нс. Осциллограмма тока поверхностного разряда представлена на рис.8б. Амплитуда тока  $\sim 110$  А при длительности на полувысоте около 20 нс. Значение тока через разряд максимально вблизи фронта импульса напряжения, что свидетельствует о емкостном характере тока. Ток объемного разряда представлен на рис.8в. На переднем фронте импульса напряжения формируется пик емкостного тока, длительностью  $\sim 20$  нс и амплитудой 10-20 А. Тонкий пик тока большой амплитуды (20-100 А) длительностью около 10 нс связан с преобладанием активной составляющей тока, далее наблюдается длительное протекание тока обратной полярности амплитудой менее 10 А. Его возникновение обусловлено накоплением заряда на поверхности диэлектрического барьера, покрывающего заземленный электрод. Уровни энерговложения в разряды (рис.8г) составляют в данном случае около 20 мДж для объемного разряда и около 25 мДж для поверхностного. При этом в первые 100 нс развития разряда происходит быстрый рост энерговложения в оба разряда на величину око-

ло 15 мДж, после чего происходит медленный дальнейший рост энергии в течение около 500 нс. При изменении условий зажигания разрядов такое распределение может сильно изменяться.



*Рис.8. Импульсы напряжения (а), тока поверхностного разряда (б), тока объемного разряда (в) и динамика вложения энергии в разряды (г) в электродной системе «ребенка-плоскость». 1 – скользящий разряд; 2 – объемный разряд.*

Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали влияние конструкции электродной системы на формируемые разряды. Показано, что поверхностный разряд оказывает влияние на объемный, приводя к существенному увеличению его однородности. Максимально полное заполнение межэлектродного промежутка плазмой наблюдается при шаге полосок фольги около 4 мм. Параметры диэлектрика, располагаемого на поверхности заземленного электрода, также оказывают влияние на генерируемый разряд. Оптимальным оказалось использование оргстеклянного диэлектрика толщиной 1 мм, с эквивалентной электрической емкостью 60 пФ.

Существует влияние длины межэлектродного промежутка и частоты следования импульсов на энергетику и структуру разрядов. При длинах межэлектродных промежутков менее 7 мм и частотах следования импульсов более 150 Гц наблюдается образование в разряде выделенных токовых каналов и резкое увеличение энерговыклада в разряды. С другой стороны, значительное увеличение межэлектродных промежутков приводит к снижению интенсивности разряда и плазмохимических процессов в нем. В этой связи оптималь-

ной является работа при длинах зазоров 7-9 мм с поддержанием разряда в объемной форме за счет регулировки частоты.

**Четвертая глава** посвящена исследованиям свойств плазмы рассматриваемых разрядов. Приводятся результаты исследований ее оптического излучения в видимом диапазоне, результаты спектральных исследований и значения рассчитываемых по ним плазменных температур, измерения электронной плотности плазмы и анализ компонентного состава прошедшего через разрядную область рабочего газа.

Анализ импульсов интегрального по длинам волн оптического излучения разрядов, регистрируемых при помощи фотоэлектронного умножителя ФЭУ-58 в различных областях разряда, позволил сделать некоторые выводы. На всех осциллограммах начало импульса свечения совпадает по времени с пиком активного тока соответствующего разряда, длительность импульсов свечения в объеме совпадает по времени с длительностью токовых импульсов. В электродной системе «лезвие-плоскость» свечение во всех областях электродной системы начинается практически одновременно, а в электродной системе «гребенка-плоскость» свечение в межэлектродном объеме начинается значительно позже, чем на высоковольтном электроде, что может свидетельствовать о влиянии дополнительного поверхностного разряда на развитие разрядных процессов в объеме.

В случае неравновесной плазмы, в ней выделяют различные виды температур тяжелых частиц: поступательную ( $T_{tr}$ ), вращательную ( $T_{rot}$ ), колебательную ( $T_{vib}$ ), а также температуру электронов ( $T_e$ ), значения которых могут значительно различаться

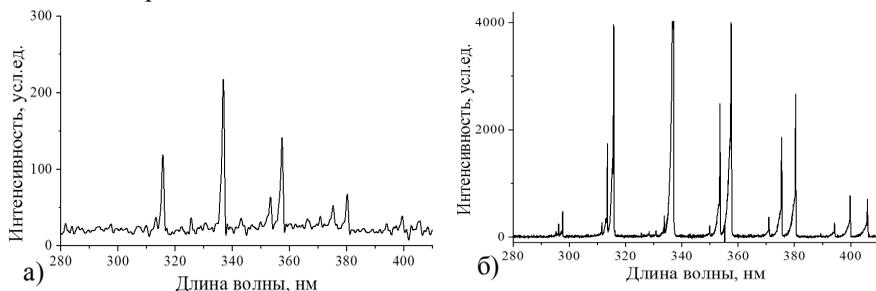


Рис.9. Спектры оптического излучения разрядов, генерируемых в электродных системах «лезвие-плоскость» (а) и «гребенка-плоскость» (б).

Плазменные температуры в данной работе исследовались с помощью анализа регистрируемых оптических эмиссионных спектров разряда (рис.9). Измерения проводились в электродных системах «лезвие-плоскость» (рис.9а) и «гребенка-плоскость» (рис.9б). Данные регистрировались в режиме накопления сигнала за время 20 секунд, что связано со световой чувствительностью прибора. Графики показывают, что оптическое излучение разряда сосредоточено в области 250-410 нм и формируется полосами молекулярного азота, соответствующими переходам второй положительной системы ( $C^3P_u \rightarrow B^3P_g$ ).

По форме контура неразрешенной вращательной структуры перехода второй положительной системы азота  $N_2(C^3P_u, v=0) \rightarrow N_2(B^3P_g, v=0)$  определялась вращательная температура плазмы. Было показано, что в условиях экспериментов значения вращательной и поступательной температур близки ( $T_{rot} \approx T_{tr}$ ).

На рис.10 представлены графики зависимости вращательной температуры плазмы от частоты повторения импульсов в электродной системе «лезвие-плоскость», при различных диэлектрических барьерах, располагаемых на заземленном электроде. Самая высокая температура (до 650К) достигается при отсутствии барьера, введение барьера приводит к снижению температуры. При этом наблюдается рост температуры с увеличением частоты.

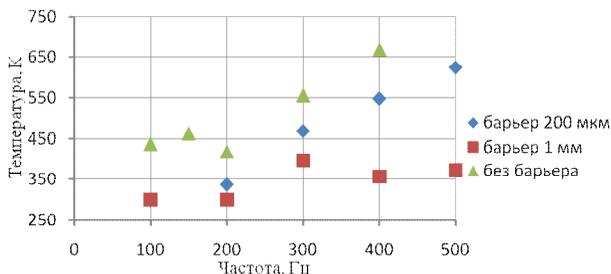


рис.10. Зависимость вращательной температуры плазмы от частоты следования импульсов при различных диэлектрических барьерах в электродной системе «лезвие-плоскость».

Обработка спектров разрядов в трехэлектродной системе осложняется тем, что в ней одновременно возбуждается два разряда, спектры которых накладываются друг на друга. Однако, эксперименты по регистрации спектров из различных разрядных областей показали, что вблизи высоковольтного

электрода температура достигает значений 800-1000 К, в центральной области – менее 650-750 К. Это показывает, что нагрев поверхностным разрядом значительно превышает нагрев в объеме. Было обнаружено, что при малых длинах зазоров и больших амплитудах напряжения наблюдается рост температуры с увеличением частоты, с увеличением амплитуды и уменьшением зазоров температура практически перестает зависеть от частоты, что может свидетельствовать об изменении режимов горения разряда. Измерение температуры электродной системы в процессе горения разряда при помощи термомпары показало, что ее перегрев в процессе работы не превышал 10 К, что свидетельствует о том, что высокие температуры плазмы достигаются в узких плазменных каналах и быстро уменьшаются после завершения разряда.

Определялась также колебательная плазменная температура. Расчет производился исходя из зависимости относительных интенсивностей спектральных полос, соответствующих сериям колебательных переходов (2<sup>+</sup>)-системы азота 0-1, 1-2, 2-3 и 0-2, 1-3, 2-4 от значения колебательной температуры. Зависимость для колебательной температуры имеет вид:

$$\frac{\ln(I_{\nu\nu'})}{\nu_{\nu\nu'}^4 q_{\nu\nu'}} = -\frac{G(\nu')}{0,6925 \cdot T_{vib}} + C,$$

где  $G(\nu)$  – значения колебательной энергии в см<sup>-1</sup>,  $I_{\nu\nu'}$  – интенсивность излучения с колебательного уровня  $\nu'$ ,  $q_{\nu\nu'}$  – коэффициент Франка-Кондона с данного перехода,  $\nu_{\nu\nu'}$  – частота излучения,  $C$  – постоянная.

Получено, что для трехэлектродной системы значения колебательных температур плазмы лежат в пределах 2500 – 3000 К, для электродной системы «лезвие-плоскость» – 5000 – 6000 К. Такие различия между колебательными и вращательными температурами характерны для неравновесной низкотемпературной плазмы.

Осуществлялось измерение электронной концентрации (плотности) плазмы при помощи многолучевого лазерного интерферометра Фабри-Перо.

Схема интерферометра представлена на рис.11. Интерферометр имеет жесткую конструкцию и изолирован от внешних механических воздействий. В качестве излучателя использовался гелий-неоновый лазер ЛГН-303 мощностью 1,3 мВт. Пассивный резонатор образован полусферическим зеркалом  $M_1$  и плоским зеркалом  $M_2$ . Согласование резонаторов линзой (1). Разрядная камера с плазменным объектом (4) размещается между зеркалами пассивного

резонатора. Регистрация световых импульсов осуществляется при помощи фотоэлектронных умножителей Hamamatsu R9880U.

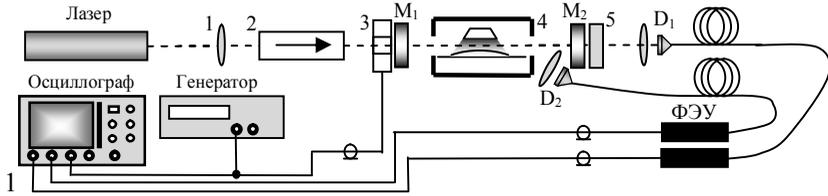


Рис.11. Схема интерферометра Фабри-Перо для диагностики плазмы.  $M_1$ ,  $M_2$  – зеркала пассивного резонатора, 1 – согласующая линза, 2 – оптический изолятор, 3 – пьезопривод, 4 – разрядная область, 5 – светофильтр,  $D_1$ ,  $D_2$  – волоконные коллиматоры.

Выражение для вычисления электронной плотности, регистрируемой данным интерферометром, имеет вид:

$$N_e l = \left( \frac{e^2}{2\pi m c^2} \right)^{-1} \frac{1}{2\lambda F} \frac{\Delta I}{I_{\max}} = 1,12 \cdot 10^{15} \frac{\Delta I}{\lambda F} \frac{1}{I_{\max}} [\text{м}^{-2}]$$

где  $N_e$  – искомая концентрация электронов,  $l$  – длина пути зондирующего излучения в возмущенной среде,  $F$  – резкость интерферометра, определяемая экспериментально,  $\frac{\Delta I}{I_{\max}}$  – регистрируемая относительная величина изменения интенсивности при возникновении плазмы,  $\lambda$  – длина волны зондирующего излучения

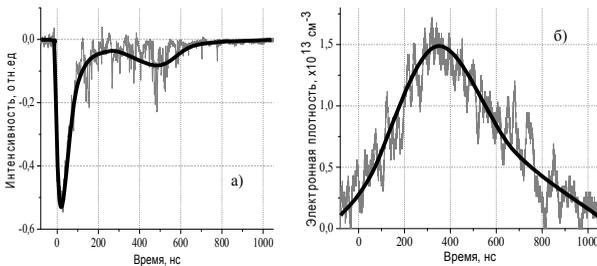


Рис.12. а) Осциллограмма свечения разряда, полученная при помощи ФЭУ 58; б) сигнал интерферометра на генерацию плазмы в разрядной области (2).

Сигнал интерферометра для электродной системы «гребенка-плоскость» во время протекания разряда показан на рис.12. Максимальная электронная плотность, составляет  $(1,5 \pm 0,3) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Это значение сопоставимо с крити-

ческой электронной плотностью для данного типа разряда ( $10^{13}$ - $10^{14}$  см<sup>-3</sup>), при превышении которой форма разряда меняется и он переходит к контрагированной форме.

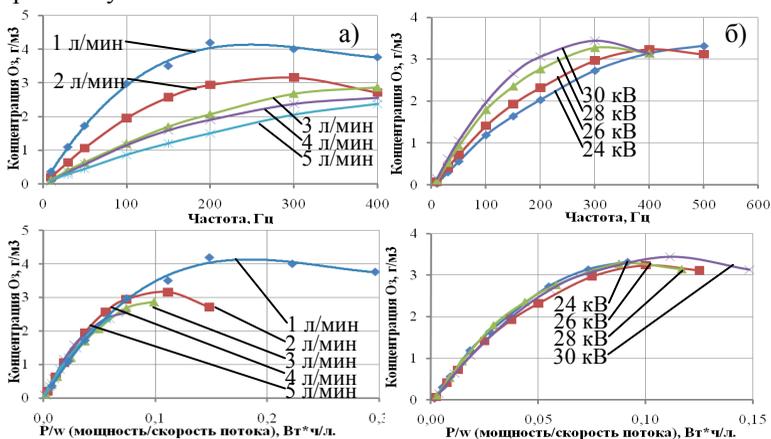
Анализ концентраций компонент газа, прошедшего через разряд производился в коаксиальной электродной системе. Исследования были проведены с использованием оптического газоанализатора озона ЦИКЛОН 5.31 и газового анализатора Каскад-Н 31.4 с электрохимическими датчиками газов NO, CO и NO<sub>2</sub>. В данной серии экспериментов производилась продувка через разрядную область атмосферного воздуха с регулируемой скоростью от 1 до 5,5 л/мин.

Исследование динамики наработки озона (O<sub>3</sub>) и монооксида углерода (CO) показало, что во всех режимах концентрация монооксида углерода быстро достигает величины 100-300 мг/м<sup>3</sup> и достаточно долго сохраняется на этом уровне. Концентрация озона также быстро достигает своего максимума, однако, после этого, в зависимости от режима генерации разрядов может наблюдаться ее значительное уменьшение. При объемной форме разрядов не было зафиксировано устойчивой генерации монооксида азота. Незначительные концентрации NO регистрировались в эксперименте в режимах наибольших частот и амплитуд импульсов напряжения.

Особое внимание уделялось исследованию зависимости концентрации озона от параметров генерации разрядов. На рис.13 представлены графики зависимости концентрации озона от частоты следования импульсов и от параметра  $P/w$  (количество энергии, вкладываемой в единицу объема воздуха), где  $P$  – мощность, вкладываемая в разряд,  $w$  – скорость газового потока, наблюдаемые при различных скоростях прокачки воздуха через разрядную область (а) и при различных амплитудах импульсов напряжения (б). В качестве рабочего газа используется атмосферный воздух с относительной влажностью 60%, каждая точка на графике соответствует отдельному включению установки.

Зависимости показывают, что при каждом значении скорости прокачки воздуха и амплитуды импульса напряжения существует значение частоты, при котором концентрация озона максимальна. При уменьшении или превышении этой частоты концентрация озона снижается. Максимальная концентрация озона составляет 4,2 г/м<sup>3</sup> ( $5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>).

При увеличении скорости прокачки воздуха максимальные значения концентрации снижаются, а при изменении амплитуды импульсов напряжения максимальные значения концентрации не изменяются, однако при меньших амплитудах требуется повышение частоты для достижения тех же значений концентрации озона. Графики зависимости концентрации от  $P/w$  показывают, что при уменьшении скорости прокачки воздуха увеличивается величина удельного энергозатрата, при котором достигается максимальная концентрация озона. Расчеты показывают, что производительность озона (г/ч) падает с увеличением скорости потока газа, хотя значения концентрации при этом увеличиваются. Т.е. условия, при которых возможно получение максимальной производительности по озону и условия, при которых возможно получение максимальной концентрации озона на выходе из разрядной области, различны. В первом случае необходимо повышение скорости газового потока, во втором его уменьшение.



*Рис.13. Графики зависимости концентрации озона от частоты следования импульсов и от параметра  $P/w$ : а - при различных скоростях прокачки воздуха через разрядную область, амплитуда импульса напряжения 30 кВ; б - при различных амплитудах импульсов напряжения, скорость прокачки воздуха 2 л/мин.*

При изменении амплитуды импульса напряжения графики зависимости концентрации озона (а также его производительности) от  $P/w$  не меняются, приблизительно одинаковые концентрации достигаются при близких значе-

ниях  $P/w$ , это свидетельствует о том, что наиболее важным параметром разряда, определяющим наработку озона, является энергозатрат.

Было рассмотрено влияние влажности рабочего воздуха на генерацию озона. Для этого было проведено несколько серий экспериментов в предварительно осушенном силикагелем воздухе с остаточной влажностью менее 1%. Эксперименты показали, удаление из рабочего газа водяных паров приводит к повышению получаемых концентраций озона практически в 2 раза, при этом экспериментальные результаты различных серий достаточно точно повторяют друг друга.

Основные результаты диссертации сводятся к следующему:

1. Проведено численное моделирование и сравнительный анализ динамики плазмохимических реакций протекающих под действием высоковольтных импульсных разрядов в азотно-кислородных газовых смесях с добавлением молекул воды в различных условиях.
2. Определены диапазоны рабочих параметров, при которых происходит эффективная наработка основных активных продуктов плазмохимических реакций.
3. Разработан экспериментальный стенд для генерации и исследования объемных импульсно-периодических разрядов в воздухе атмосферного давления при субсантиметровых длинах межэлектродных промежутков, включающий в себя генератор наносекундных импульсов высокого напряжения, разрядный узел специальной конфигурации и информационно-измерительную систему.
4. Проведено визуальное исследование структуры разрядов. Для этого получены интегральные и высокоскоростные фотографии разрядов для различных электродных систем. Проведенные исследования свидетельствуют о высокой пространственной однородности генерируемых разрядов при объемной форме горения.
5. Исследованы электрические и энергетические параметры генерируемых разрядов при различных условиях генерации. Определены границы диапазонов рабочих параметров, при которых разряд сохраняет объемную форму при наибольшей энергетической эффективности.
6. Проведены исследования и сравнительный анализ динамики оптического излучения разрядов в электродных системах «лезвие-плоскость» и

трехэлектродной системе «гребенка-плоскость». Результаты исследований демонстрируют различия в процессах генерации разрядов в этих системах.

7. Исследованы оптические эмиссионные спектры разрядов. На основе наблюдаемых спектров определены диапазоны значений плазменных температур.

8. Разработан многолучевой лазерный интерферометр типа Фабри-Перо для измерения концентрации электронов в плазме объемных разрядов в воздухе атмосферного давления. Проведены экспериментальные измерения концентрации электронов в плазме разрядов.

9. Проведены экспериментальные исследования влияния режимов генерации разрядов на наработку наиболее значимых для целей стерилизации и обеззараживания продуктов плазмохимических реакций.

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

1. Демин А.П., Елистратов Е.А., Морозов А.В., Масленников С.П., Нечаев Н.Н., Школьников Э.Я., Чеботарев А.В. Генерация вакуумных электрических разрядов в электродных системах с резко неоднородным распределением поля. Инженерная физика. № 6. 2010.- С.14-17.
2. Елистратов Е.А., Масленников С.П., Крастелев Е.Г., Чеботарев А.В., Школьников Э.Я. Генерация объемных газовых разрядов в воздушной среде атмосферного давления в электродных системах с резко неоднородным распределением поля. Ядерная физика и инжиниринг. 2010. Том 1. №4. 2010.- С.332-338.
3. Гаркуша О.В., Елистратов Е.А., Коротеев В.И., Масленников С.П., Нечаев Н.Н., Павловский В.А., Чеботарев А.В., Школьников Э.Я. Динамика наработки активных продуктов плазмохимических реакций в импульсно-периодическом объемном атмосферном разряде. Ядерная физика и инжиниринг. 2012. том 3. № 5.- С.1–6
4. Елистратов Е.А., Кузнецов А.П., Масленников С.П., Протасов А.А., Школьников Э.Я. Измерение параметров импульсного объемного разряда наносекундной длительности в воздухе атмосферного давления. Письма в ЖТФ. 2012. том 38. выпуск 17.- С.31-38.