

*На правах рукописи*



**АЛИ РАФИД АББАС АЛИ**

**НЕЛОКАЛЬНЫЕ ИОНИЗАЦИОННЫЕ И ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДАХ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ**

*Специальность: 01.04.04. – физическая электроника*

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

*Научный руководитель:*  
д. ф.-м.н., проф. Курбанисмаилов В.С.

*Научный консультант:*  
к.ф.-м.н., доцент Рагимханов Г.Б.

**МАХАЧКАЛА 2017**

Работа выполнена на кафедре физической электроники ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Курбанисмаилов Вали Сулейманович

Научный консультант: кандидат физико-математических наук, доцент Рагимханов Гаджимирза Балагланович

Официальные оппоненты: Майоров Сергей Алексеевич, д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН», г. Москва

Попов Олег Алексеевич, д-р тех. наук, доцент ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет» (МЭИ), г. Москва.

Ведущая организация: ФГБУН «Объединенный институт высоких температур РАН», г. Москва

Защита состоится «6» октября 2017 года в 14-00 на заседании объединенного диссертационного совета Д999.134.02 на базе ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет», Министерства образования и науки РФ и ФГБУН «Институт физики им. Х.И. Амирханова» ДНЦ РАН по адресу: 367000, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Дзержинского, 12, ауд. 2-38.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ДГУ и на сайте по адресу: <http://science.dgu.ru/dissertation.aspx?candid=68>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук



Алиев А.Р.

### **Актуальность темы диссертации.**

Объемные разряды при высоких давлениях газа нашли широкое применение в различных технических приложениях (например, газовые лазеры, плазменные реакторы и др.) Использование интенсивных электронных пучков и источников УФ излучения с последующим наложением электрического поля позволило осуществить объемное протекание тока через газовый зазор при давлениях газа вплоть до десятков атмосфер. Такой разряд при высоких давлениях газа является неустойчивым, быстро контрагируется в искровой канал. При этом в активной среде газового лазера происходит срыв генерации когерентного излучения. Поэтому переход объемного разряда (ОР) в канальную стадию является главным физическим препятствием для наращивания энергии излучения лазеров и является предметом интенсивных исследований.

На сегодняшний день достаточно подробно изучен механизм формирования однородного плазменного столба и определены границы ее формирования, а также механизмы, нарушающие режим однородного горения. Однако, существует ряд проблем. Это, прежде всего, физические процессы на стадии формирования плазменного столба, в том числе, определение роли прикатодных процессов, протекающих в области прикатодного падения потенциала в формировании и поддержании однородного плазменного столба.

С другой стороны, как известно процесс импульсного пробоя газа сопровождается взрывными процессами в приэлектродных областях ОР. Эти процессы существенно меняют динамику развития разряда, влияют на кинетику процессов как непосредственно в приэлектродных областях, так и в объеме промежутка (формирование диффузных каналов, привязанных к катодным пятнам и т.д.). Поэтому важное значение имеет исследование роли взрывных процессов в формировании пробоя при напряжениях близких к статическим пробойным. Этот вид разряда широко распространен в технике высоких напряжений (пробой контактов, конденсаторостроение и т.д.).

В канале искры за очень короткое время давление возрастает до высоких значений, и этот процесс представляет собой явление взрывного характера (скорость энерговыделения в локальной области разряда становится намного больше скорости отвода тепла) и вызывает рождение ударных волн. Исследования ударных волн в плазме, интенсивно проводимые в последние годы, является актуальной задачей, представляющей общефизический интерес.

Таким образом, физика процессов в таких разрядах достаточно сложна и к настоящему времени недостаточно исследована. Все это требует количественных данных о процессе формирования разряда, прежде всего данных о динамике электрического поля и распределения концентраций заряженных частиц в разрядном промежутке, их относительном энергокладе, о токе разряда и напряжении на промежутке.

Так как инертные газы (*He*, *Ar*) высокого давления широко используются в качестве буферного газа во многих лазерных смесях, то представляет научный интерес как исследование влияния начальных условий на электрические, оптические и спектральные характеристики импульсных разрядов, так и изучение механизмов контрагирования объемных разрядов и их развитие в режиме сильноточной стадии протекания тока, а также исследование формирования ударных волн в этих газах.

**Цель исследования.** Данная диссертация посвящена изучению различными методами (электрическими, оптическими, спектральными и численным расчетом) нелокальных физических процессов в рабочих средах инертных газов (*He*, *Ar*) при образовании и развитии пространственных структур и определению энергетических, спектральных и временных характеристик пробоя в коротких перенапряженных промежутках, а с другой стороны - экспериментальному исследованию и теоретическому обоснованию механизмов формирования и распространения ударных волн, развивающихся из области расширяющегося катодного пятна и искрового канала по слабоионизованной плазме в газах высокого давления.

**В этой связи задачи исследования настоящей работы заключались в следующем:**

1. По электрическим, пространственно-временным картинам развития тела свечения и на основе двумерной осесимметричной диффузионно-дрейфовой модели в предварительно ионизованной газовой среде выполнить исследование влияния условий формирования разряда на особенности формирования и развития на начальных стадиях катодонаправленной волны ионизации в инертных газах (*He*, *Ar*) высокого давления при возбуждении высоковольтными импульсами и определить факторы, влияющие на устойчивость ОР.

2. Анализ процессов, протекающих на электродах и в прикатодных областях разряда, и их роли в поддержании и развитии неустойчивостей объемного разряда на основе экспериментального исследования спектральных, временных и энергетических характеристик излучения плазмы диффузных разрядов в инертных газах до давлений  $\sim 5$  атм при возбуждении высоковольтными импульсами с высокой напряженностью электрического поля.

3. Исследование роли нелокальных процессов ионизации газа на основе двумерной гибридной модели с учетом нелокальной зависимости скорости ионизации от напряженности электрического поля.

4. Исследование роли распыления материала электродов в кинетике и режимах формирования оптических свойств импульсных разрядах в гелии и аргоне, формируемых импульсным генератором на основе емкостных накопителей энергии при различных условиях возбуждения.

5. Разработка и развитие методов как для численного моделирования формирования и развития на начальных стадиях ионизационных фронтов в инертных газах в предварительно ионизированной газовой среде, так и для

комплексного экспериментального и теоретического исследования механизмов формирования необычной формы разряда с объемным протеканием тока – сильноточный диффузный режим (СДР), а также распространения ударных волн при импульсных разрядах высокого давления.

**Объектами исследования** являются свободно расширяющиеся самостоятельные импульсные разряды в межэлектродных промежутках (1-3 см) в инертных газах (*He, Ar*) в диапазоне давлений 1-5 атм и прикладываемых полей 3-25 кВ/см.

**Методы исследования.** Для определения различных характеристик разряда использовались стандартные методики измерения, оценок ошибок эксперимента, регистрации осциллограмм импульсов тока разряда, напряжения на плазме объемного самостоятельного разряда с применением цифровых осциллографов типа Актакон и Tektronix.

Фотографирование пространственно-временных картин свечения промежутка осуществлялось с применением фотоэлектронного регистратора (ФЭР-2), спектр оптического излучения разряда регистрировался с помощью автоматизированного комплекса монохроматор-спектрограф (MS-3504i). Спектр излучения прикатодной плазмы регистрировался монохроматором с дифракционной решеткой (МДПС-3) с дисперсией 0,2-0,3 нм/мм.

Исследование роли нелокальных процессов ионизации газа на начальных стадиях импульсного пробоя выполнялось на основе разработанной двумерной гибридной модели, которая учитывала нелокальную зависимость скорости ионизации от напряженности электрического поля.

**Метод решения поставленных задач** заключался в: регистрации осциллограмм тока и напряжения на пробойных (высоковольтных) и сильноточных стадиях импульсов в разрядном промежутке; наблюдении однородности горения объемного самостоятельного разряда (ОСР) путем фотографирования разрядной зоны; управлении характером поведения самостоятельного разряда путем изменения в широких пределах таких параметров, как напряжение на емкостном накопителе энергии, (напряжение на разрядном промежутке), энергия, вводимая в разряд, давление газа; анализе полученных экспериментальных данных и их сопоставлении с результатами численных расчетов.

**Информационную базу исследования** составили научные источники в виде данных и сведений журнальных статей, материалов научных конференций, семинаров, монографий.

**Достоверность научных результатов и обоснованность научных положений** базируется на использовании для выполнения измерений современных средств диагностики с высоким временным и пространственным разрешением, на фундаментальных физических законах, согласованности полученных результатов с имеющимися данными других авторов, систематичности экспериментальных и теоретических исследований

в широком диапазоне начальных условий для различных газовых сред, согласием полученных экспериментальных данных с результатами численного моделирования исследуемых явлений.

**Научная новизна исследования.** Большинство полученных в работе результатов исследований являются оригинальными и получены впервые. Основные новые научные результаты работы состоят в следующем:

1. Выполнено моделирование импульсного разряда на основе двумерной осесимметричной модели с учетом нелокальности ионизационных и дрейфовых характеристик электронов. Получены количественные данные о динамике изменения напряжения и тока разряда, концентрации электронов и ионов, распределения потенциала, фотоэлектронной и ион-электронной составляющих тока вторичной эмиссии с катода, и энергии, вводимой в промежуток.

2. Установлено, что формирование объемного разряда происходит в процессе развития одной катодонаправленной волны ионизации, а наличие микронеоднородностей на поверхности катода могут быть причиной формирования СДР. Показано, что учет нелокальности приводит к росту напряженности электрического поля на фронте волны ионизации и ее скорости.

3. Впервые выполнен качественный анализ кинетики формирования оптического излучения прикатодной плазмы самостоятельных разрядов в инертных газах (*He*, *Ar*), позволяющий определить механизм контракции объемных разрядов в искровой канал и СДР. Показано, что в процессе перехода объемного разряда в искровой канал и в сильноточный диффузный режим, в спектре прикатодной плазмы зажигаются новые линии материала вещества электродов.

4. Проведено комплексное экспериментальное исследование формирования ударных волн в газах высокого давления с наносекундным временным разрешением. Экспериментально и расчетами показано, что разлет плазмы катодного пятна носит адиабатический характер.

**Научная и практическая ценность** работы определяется актуальностью темы и научной новизной полученных в работе результатов. Результаты выполненных комплексных экспериментальных и расчетных исследований будут способствовать дальнейшему развитию физических представлений об импульсных разрядах, развивающихся в газах высокого давления (порядка атмосферного), в частности, объяснению наблюдаемых больших скоростей распространения фронтов свечения в плотных газах, распространения ионизации в сторону катода при атмосферных давлениях.

Полученные в работе новые результаты о характере формирования объемного разряда, режиму однородного горения диффузного разряда и перехода объемного разряда в искровой канал или в СДР могут быть использованы для устранения неоднородности плазмы и улучшения характеристик газовых лазеров и систем их инициирования. С практической точки зрения, результаты проведенного исследования и полученные новые

закономерности интересны в том отношении, что позволяют выявить новые возможности изучения и исследования ударных волн, а также могут быть использованы при исследовании движения тел со сверхзвуковыми скоростями в ионизированной газовой среде, для повышения эффективности плазмохимических устройств и оптимизации параметров быстропротекающих газовых лазеров.

**На защиту выносятся следующие основные положения:**

1. Результаты комплексного исследования (экспериментально и на основе двумерной осесимметричной диффузионно-дрейфовой модели) влияния условий формирования разряда на особенности формирования и развития на начальных стадиях катодонаправленной волны ионизации в инертных газах (*He, Ar*) высокого давления при возбуждении высоковольтными импульсами и определения факторов, влияющих на устойчивость ОР, что важно для обобщения физических представлений о механизме пробоя газов высокого давления на начальных стадиях и улучшения характеристик различных устройств, работа которых связана с использованием пробоя газовых промежутков.

2. Двумерная осесимметричная диффузионно-дрейфовая модель формирования импульсного объемного разряда в инертных газах (*He, Ar*) высокого атмосферного давления в сантиметровом межэлектродном промежутке, учитывающая нелокальную зависимость скорости ионизации от напряженности электрического поля и позволяющая корректно описать основные параметры разряда на стадии формирования. Результаты численного моделирования особенностей формирования волны ионизации на стадии формирования импульсного объемного разряда в инертных газах (*He, Ar*) атмосферного давления.

3. Экспериментальные результаты детальных исследований влияния внешних условий на кинетические процессы и оптическое излучение плазмы самостоятельного импульсного разряда в инертных газах атмосферного давления для различных режимов формирования и горения разряда, а именно: однородный объемный разряд, объемный разряд с катодными пятнами, контрагированный разряд, сильноточный диффузный режим.

4. Результаты влияния перенапряжения на интенсивность спектра излучения прикатодной плазмы в условиях распыления материала электрода.

5. Результаты влияния микронеоднородностей на поверхности катода на процесс формирования и устойчивости однородного объемного разряда и адиабатический характер процессов расширения катодного пятна с характерным начальным размером взрывоэмиссионного центра ( $\sim 10^{-6}$  м.) и временем охлаждения плазмы катодного пятна ( $\sim 10^{-8}$  с).

**Апробация результатов исследования и публикации.** Материалы, содержащиеся в настоящей диссертационной работе, докладывались на ежегодных научных конференциях физического факультета ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет», на Всероссийской конференции «Современные проблемы физики плазмы» (Махачкала, 2013),

на VI Всероссийской научно - практической конференции "Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов" (Томск, 2013), на Всероссийской конференции "Физика низкотемпературной плазмы" (Казань, 2014), на VIII, IX Всероссийских конференциях по физической электронике, (Махачкала, 2014, 2016), на XLII, XLIII Международных конференциях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород, 2015, 2016), на II Всероссийской конференции «Современные проблемы физики плазмы и физической электроники» (Махачкала, 2015), на Российской научно-практической конференции с международным участием «Фундаментальные проблемы и прикладные аспекты химической науки и образования» (Махачкала, 2016).

**Публикации.** Основные материалы диссертационной работы отражены в 16 печатных работах, в том числе 6 статей в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 10 докладах и тезисах докладов на Региональных, Всероссийских и Международных конференциях.

**Личный вклад автора.** Основные результаты экспериментов и расчетов, представленные в диссертации, получены непосредственно автором или при его определяющем личном участии. Анализ всего цикла работ, выводы диссертации и основные положения, выносимые на защиту, выполнены автором совместно с научным руководителем и консультантом.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения; содержит 159 страниц, включая 43 рисунка и 12 таблиц. Список цитируемой литературы насчитывает 169 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы основные задачи и цели исследования, а также основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна полученных результатов. Приводится краткое содержание диссертации.

**В первой главе,** состоящей из 4 параграфов приводятся экспериментальные и теоретические результаты, описывающие формирование таунсендовского, стримерного и объемного разрядов в газах высокого давления. Особое внимание уделяется как моделям, описывающим начальные стадии пробоя на основе развития ионизационных фронтов, так и современным представлениям о формировании стримерных разрядов. Описаны условия, определяющие режим формирования и стационарного горения ОР. Показано, что наличие предыонизации газа является одним из необходимых условий зажигания объемного разряда, длительность и устойчивость которого ограничивается неустойчивостями, возникающими в приэлектродных областях. Изучены роль приэлектродных процессов в формировании искрового канала, амплитудно-временные, спектральные, излучательные и поглощательные характеристики самостоятельных импульсных разрядов.



**Во второй главе** диссертации приводится описание экспериментальной установки и методов измерений параметров плазмы импульсных разрядов в инертных газах атмосферного давления. Диагностический стенд включает в себя вакуумную систему ( $\approx 10^{-5}$  Торр), монохроматор (МДПС-3), автоматизированный комплекс монохроматор-спектрограф (MS-3504i), генератор импульсов напряжения (амплитудой до 30 кВ) и фронтом нарастания  $\approx 10$  нс), фотоумножители (ФЭУ-30, ФЭУ-77, ФЭУ-79, ФЭУ-87), разрядная камера из нержавеющей стали с кварцевыми окнами, скоростные запоминающие и цифровые осциллографы (С8-14, АСК-2150 и Tektronix), систему синхронизации (ГЗИ-6, ГИ-1) и предыонизации (создаваемая плотность электронов  $n_0 \approx 10^7 - 10^8$  см $^{-3}$ ). Обосновываются также основные методики измерений и анализируются их погрешности.

**В третьей главе** диссертации рассматриваются результаты исследования пространственно - временной динамики формирования и развития импульсного разряда в инертных газах (*He, Ar*) высокого давления.

В § 3.1 изучены механизмы формирования ОР в гелии в условиях многоэлектронного инициирования и изучены эти критерии для различных начальных условий. Показано, что в газе - *He* при атмосферном давлении при малых внешних полях ( $E_0 < E_{кр} = 6$  кВ/см) горит однородный ОР (рис.1, фото 1), а развитие незавершенных анодонаправленных каналов, привязанных к катодным пятнам с высокой проводимостью (плазменных каналов) начиналось при плотности тока  $\sim 40$  А/см $^2$  (рис.1, фото 3). В межэлектродном пространстве сохранялась хорошая однородность плазмы разряда. Увеличение плотности тока до 60 А/см $^2$  (рис.1, фото 4,5) ведет к дальнейшему продвижению незавершенных анодонаправленных каналов. При плотности тока более 100 А/см $^2$  происходит перекрытие разрядного промежутка плазменным каналом (рис.1, фото 6). Результаты исследований формирования импульсного ОР показывают, что однородность и устойчивость ОР напрямую определяется условиями формирования разряда.

Приведены характерные зависимости концентрации электронов предыонизации  $n_0$ , требуемые для получения предельно - однородного ОР от давления газа, для трех значений поля. Показано, что с увеличением давления газа необходимое значение концентрации электронов предыонизации для зажигания ОР уменьшается.

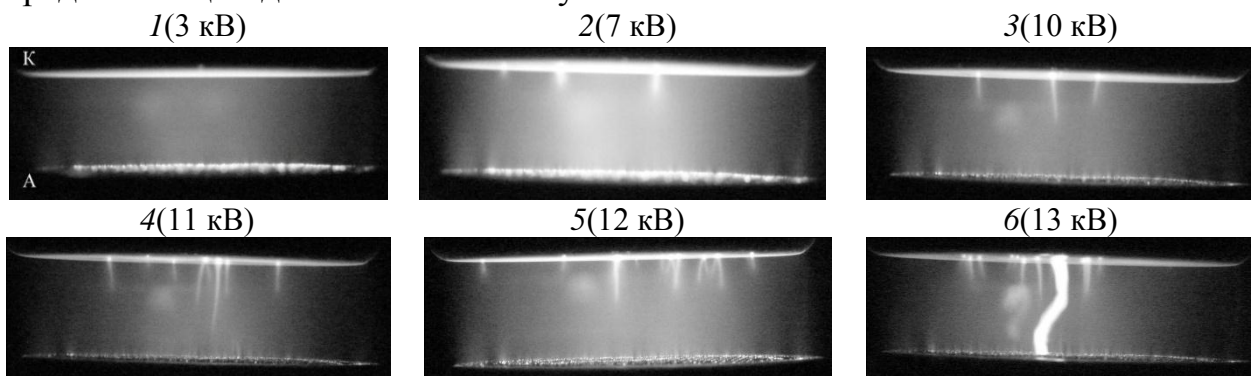


Рис. 1. Интегральные картины пробоя в гелии:  $d=1$  см,  $p=760$  Торр.

Показано, что варьируя параметры  $E$ ,  $p$  и  $n_0$  можно регулировать длительностью горения однородного ОР. В частности, с увеличением величины  $E$  увеличивается граничное значение  $n_0$ , при котором возможно формирование однородного плазменного столба. Для выяснения влияния давления газа на однородность и устойчивость объемного разряда были выполнены исследования при более высоких давлениях.

На рис.2 показаны фотографии интегрального свечения разряда в  $He$  при давлении  $p = 3$  атм. При увеличении давления газа в промежутке (уменьшение отношения  $E/p$ ) разряд расконтрагируется и горит однородно при полях до  $E_0/p \leq E_{кр}/p = 7,5$  кВ/см атм. При полях  $E_0/p > E_{кр}/p$  наблюдается большая плотность катодных пятен, из которых начинается формирование незавершенных каналов, а столб разряда имеет высокую степень однородности.

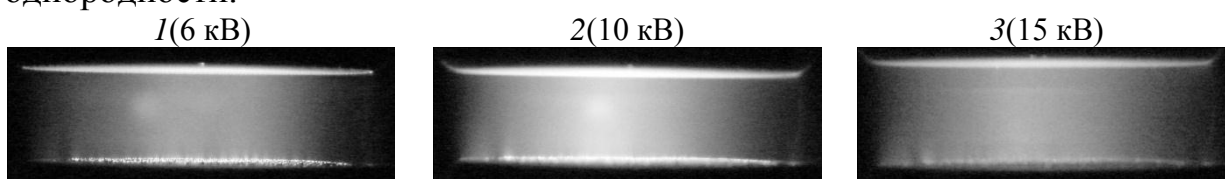


Рис.2. Пространственные картины свечения промежутка в гелии ( $d=1$  см,  $p = 3$  атм). Электроды с межэлектродным расстоянием 1 см из нержавеющей стали (верхний электрод катод – сплошной, нижний электрод - сетчатый).

В § 3.2 приведены результаты экспериментальных исследований с применением фотоэлектронного регистратора (ФЭР-2) пространственно-временной динамики развития оптической картины в  $He$  в коротких промежутках ( $d = 1$  см) при напряжениях от статистического пробойного (напряжение статистического пробоя в гелии при  $p=1$  атм,  $d=1$  см составляет  $U_{ст}=3$  кВ) до сотни % перенапряжений при наличии предыонизации газа.

Анализ картин формирования разряда показывает, что при концентрации электронов предыонизации  $n_0=10^8$  см<sup>-3</sup> и полях  $3$  кВ  $< U_0 < 6$  кВ в промежутке формируется объемный разряд с высокой однородностью свечения (см. рис.3 б, фото 1) и длительностью горения. При напряжениях  $U_0 > 6$  кВ формируются диффузные каналы, привязанные к катодным пятнам (рис.3 б, фото 2,3). Причем число диффузных каналов тем больше, чем выше и однороднее поле.

На рис.4 приведены покадровые картины формирования и прорастания искрового канала для величин  $U_0 = 9$  кВ,  $p = 3$  атм. Из этого рисунка видно, что на фоне слабого диффузного свечения на катоде возникает очаг повышенной плотности (фото 1). Фото 1 снят за 50 нс до второго спада напряжения, или через 400 нс после приложения напряжения к промежутку. Из катодной плазмы прорастает искровой канал, который перекрывает разрядный промежуток за 280 - 300 нс со скоростью  $\approx 3 \cdot 10^6$  см/с для рассматриваемых условий эксперимента.

Время существования ОР можно определить, проводя синхронизацию электрических характеристик с пространственно-временными картинами свечения промежутка, снятых ЭОПом (ФЭР-2) в режиме щелевой развертки.

Синхронизация картин свечения разряда с током или напряжением с точностью 2 - 3 нс осуществлялась подачей импульса тока (или напряжения) на отклоняющие пластины ЭОП (УМИ- 92) синхронно с разверткой свечения разряда. При этом учитывался сдвиг по времени между световым и электрическим сигналами.

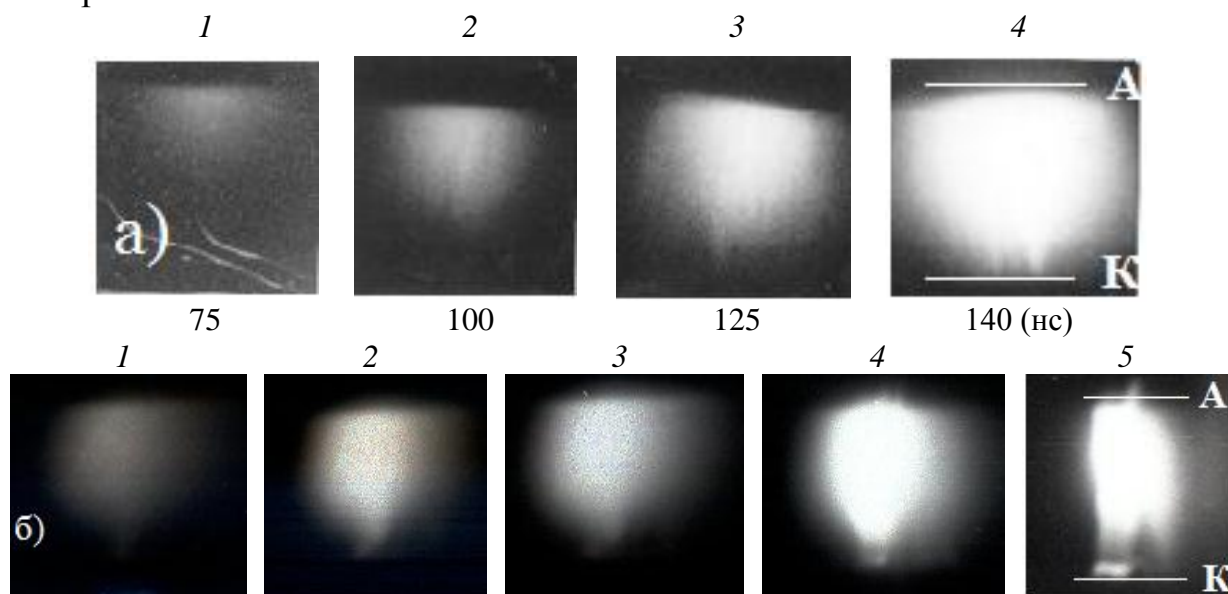


Рис.3. Покадровые картины формирования ОР в He ( $d = 1$  см,  $p = 1$  атм) для  $U_0 = 15$  кВ (а) и для  $U_0 = 18$  кВ (б). Электроды плоские, верхний электрод – анод, нижний – катод.

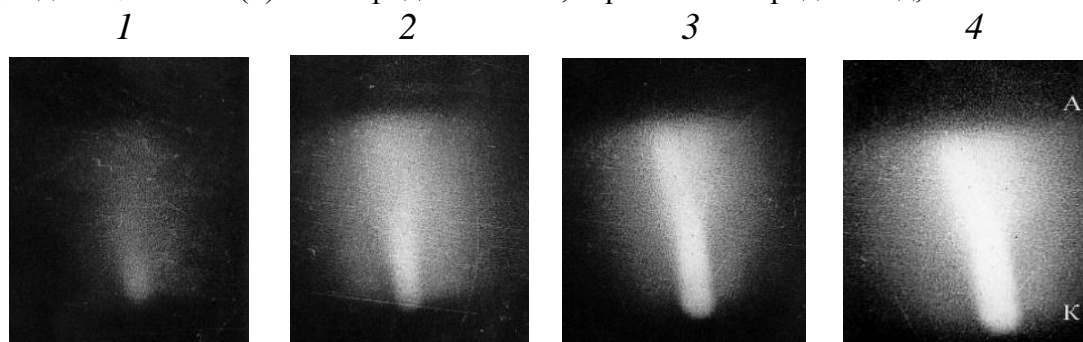


Рис. 4. Картины формирования и прорастания искрового канала для  $U_0 = 9$  кВ,  $p = 3$  атм.

На рис.5 представлены фотографии щелевой развертки как совместно с импульсом напряжения (а), так и без него (б,в). Масштаб развертки – 1 мм = 4,3 нс (длина экрана ЭОП – 70 мм). В момент времени  $t_3$  начинается процесс прорастания искрового канала (начало контракции).

Как видно из рис. 5 б,в к моменту времени  $t_3$  на катоде зажигается катодное пятно, которое на пространственно-временных картинах разворачивается в виде яркой дорожки. Катодное пятно отделено от столба разряда некоторым темным пространством.

И бурный рост концентрации электронов приводит к росту проводимости и спаду напряжения до дугового значения (см. рис.5 а, время  $t_3$ ), после чего разряд переходит в рекомбинационный режим и гаснет.

С ростом давления газа в промежутке длительность однородного горения ОР уменьшается. Увеличение давления газа приводит к увеличению напряжения на столбе разряда (напряжение горения ОР). Это в свою очередь

приводит к росту ионизационных процессов как за счет ударной ионизации, что обусловлено сильной зависимостью коэффициента  $\alpha$  от  $E_0$ , так и за счет ступенчатой ионизации. Так, на рис. 6 приведены картины распределения интенсивности излучения в промежутке как вдоль поля, так и поперек электродов. Из него явно следует, что процесс контракции определяется приэлектродными явлениями.

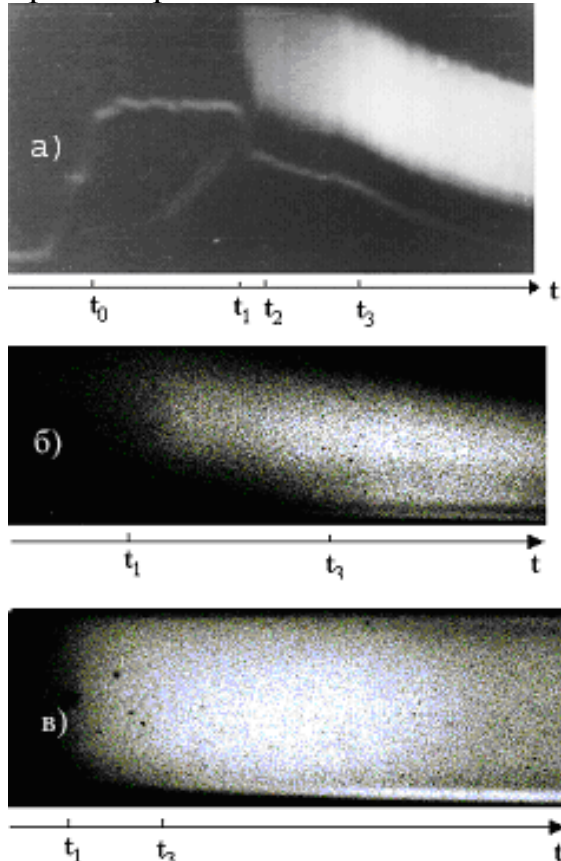


Рис.5.

**Рис.5.** Фотография щелевой развертки в разряде He с импульсом напряжения при  $U_0=10$  кВ (а), б -  $U_0=6$  кВ; в -  $U_0 = 10$  кВ; ( $d=1$  см,  $p=1$  атм,  $l$  мм = 4,3 нс, катод - снизу). Здесь, интервалы времени соответствуют:  $t_1-t_0 = \tau_{\phi}$  - время формирования пробоя;  $t_2-t_1$  - время коммутации (время формирования) объемного разряда;  $t_3-t_2$  - время однородного горения разряда (длительность ОР).

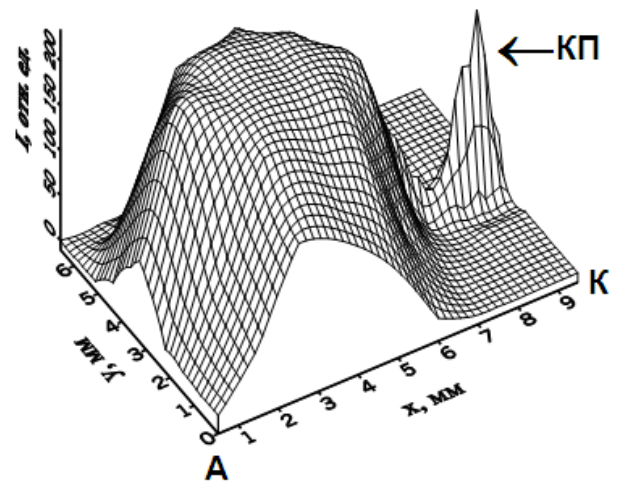


Рис.6.

Рис. 6. Картины распределения интенсивности излучения (в отн. ед.) в промежутке как вдоль поля, так и поперек электродов. Здесь,  $x$  - координата, меняющаяся вдоль электродов,  $y$  - поперек электродов, КП - катодное пятно,  $p = 1$  атм,  $d = 1$  см.

В § 3.3 представлены экспериментальные результаты по формированию искрового канала в Ar в условиях предварительной ионизации газа. Ионизация газа в промежутке осуществлялась от источника УФ - излучения, который располагался в том же газе на расстоянии (5-7) см от оси основного промежутка. Расстояние  $d$  между алюминиевыми электродами равно 1 см, а диаметр электродов - 4 см. Использовались два типа электродов - сферические с радиусом кривизны  $R \approx 30$  см и плоские.

Напряжение пробоя менялось от статического пробойного значения  $U_{ст}=6,8$  кВ (при  $d=1$  см,  $p=1$  атм) до 20 кВ. Длительность светового импульса подсветки составляла 600 нс (см. рис.7). Межэлектродное расстояние подсвечивающего промежутка и разрядника устанавливались таким образом, чтобы пробойный импульс подавался на исследуемый промежуток через 100 - 150 нс после подсветки.

Исследования показывают, что однородный слаботочный разряд формирует ионизационный фронт, распространяющийся с анода. Диаметр диффузного канала на этой стадии составляет 4 мм. Через 20-25 нс (в аргоне) после перекрытия промежутка ионизационным фронтом появляется яркое катодное пятно, и разряд принимает форму конуса с вершиной у катода (фото 4, рис. 8 а).

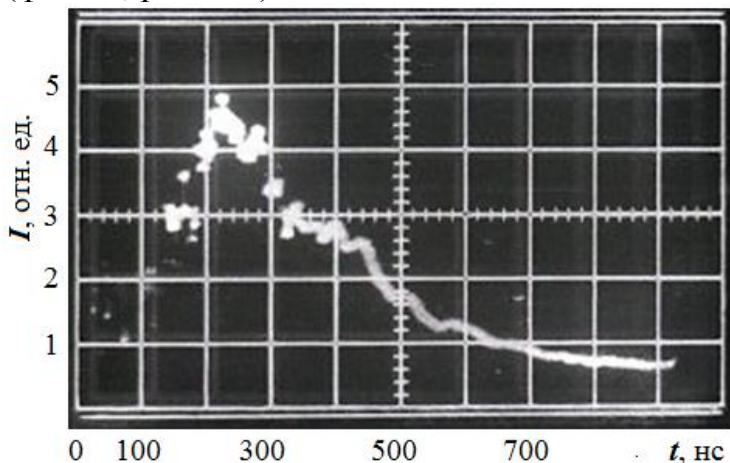


Рис. 7. Характерная временная зависимость интенсивности (в отн. ед) светового импульса источника УФ излучения. Развертка – 100 нс/дел ( $p=1\text{ атм}$ ,  $d=1\text{ см}$ ,  $Ar$ ).

В аргоне, когда ионизационный фронт подходит к катоду интенсивность свечения столба резко возрастает и катодная часть замыкается узким ( $d=0,2\text{ мм}$ ) нитевидным свечением (рис.8 б). Яркость катодного пятна значительно выше яркости столба и катодная часть имеет ярко очерченные границы ( $d=0,2-0,3\text{ мм}$ ) и диаметр столба свечения сужается (у анода 2-3 мм).

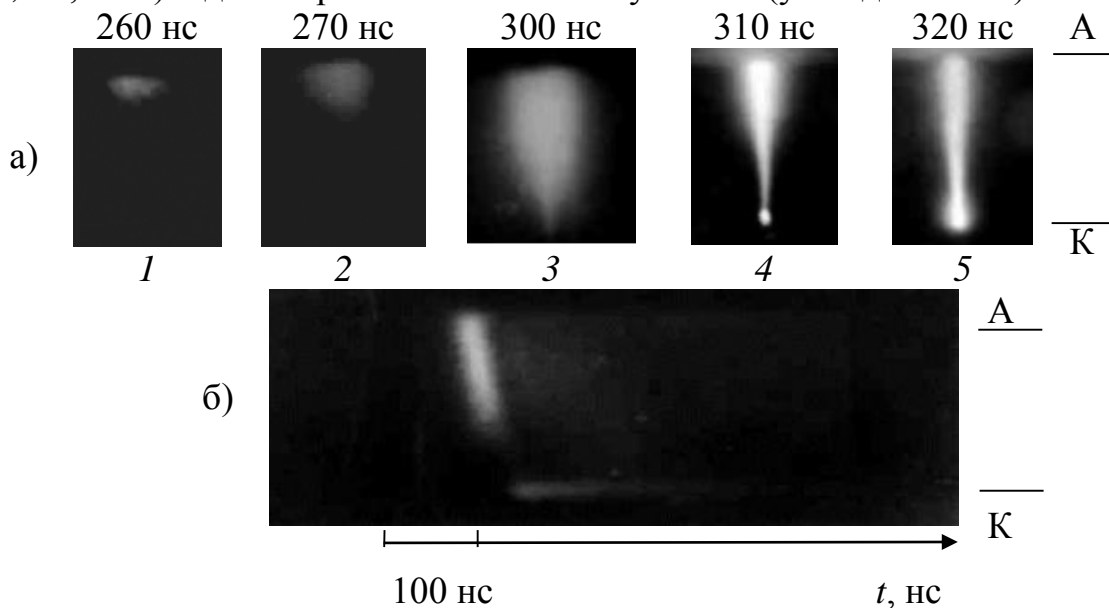


Рис.8 Фотографии свечения в промежутке в различные моменты времени (а) и непрерывной щелевой развертки (б) ( $p = 1\text{ атм}$ ,  $d = 1\text{ см}$ ,  $Ar$ ,  $E/p = 10,53\text{ В/см}\cdot\text{Торр}$ ).

По времени образование катодного пятна совпадает с началом резкого роста тока и спада напряжения на промежутке. На начальных стадиях развития катодное пятно имеет полусферическую форму и скорость его расширения составляет  $2,5 \cdot 10^6\text{ см/с}$ . Для рис.8 время на ЭОПограммах отсчитывается с момента приложения импульса напряжения к промежутку.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований в аргоне показывает, что в предварительно ионизированной среде ( $n_0 \approx 10^7 \text{ см}^{-3}$ ) при незначительных перенапряжениях  $W=10-100 \%$  возможна объемная форма протекания разряда. Формирование плазменного столба происходит в процессе распространения к катоду волны ионизации со скоростью  $\approx 2-5 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ . По мере продвижения фронта свечения к катоду электронная концентрация в нем возрастает и достигает значений  $\approx 10^{13}-10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

В § 3.4 получены результаты двумерного моделирования формирования волн ионизации в инертных газах ( $He, Ar$ ) в предварительно ионизированной газовой среде.

Разработана двумерная осесимметричная модель для анализа поведения пространственного распределения параметров импульсного разряда в гелии и аргоне высокого давления в ходе его формирования в условиях предварительной ионизации газа с радиусом электродов 2 см и расстоянием между ними 1 см. Модель позволяет описать начальные стадии эволюции низкотемпературной плазмы газового разряда, включая формирование структуры катодного и анодного слоев:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{\Gamma}_e = k_{i\_nl} n_e N - \beta n_e n_i$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{\Gamma}_i = k_{i\_nl} n_e N - \beta n_e n_i$$

$$k_{i\_nl} = k_i \left( 1 + \frac{\vec{E} D_e \nabla n_e}{\mu_e n_e E^2} \right)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_+ - n_e)$$

$$\rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \eta (\vec{j} \cdot \vec{E})$$

где потоки электронов и ионов выражаются как  $\vec{\Gamma}_e = -n_e \mu_e \vec{E} - D_e \nabla n_e$ ,  $\vec{\Gamma}_+ = n_+ \mu_+ \vec{E} - D_+ \nabla n_+$ ,  $\vec{j}$  - плотность электрического тока;  $n_e, n_+$  концентрации электронов и ионов,  $k_i$  - локальный коэффициент ионизации,  $k_{i\_nl}$  - нелокальными коэффициентами ионизации,  $\beta$  - коэффициент рекомбинации,  $\mu_e, \mu_+$  подвижности электронов и ионов,  $D_e, D_+$  - коэффициенты диффузии электронов и ионов,  $\varepsilon_0$  - электрическая постоянная;  $e$  - заряд электрона,  $\vec{E}$  - напряженность электрического поля,  $\varphi$  - потенциал,  $\rho, C_v, \lambda, T$  - плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности и температура нейтрального газа. Коэффициент  $\eta$  рассчитывался с помощью программы BOLSIG+ как функция приведенного электрического поля  $E/N$ .

В расчете ось Y направлена в перпендикулярном направлении к электродам от анода к катоду. Ось X направлена по радиусу.

В радиальном направлении (вдоль оси X) ставилось условие отсутствие полного потока заряженных частиц:  $\partial n_+ / \partial x = 0$ ,  $\partial n_e / \partial x = 0$ ,  $\partial \varphi / \partial x = 0$ .

На поверхности катода граничные условия задавались следующим образом:  $n_e = \gamma_+ (\mu_+ / \mu_e) \partial n_+ / \partial y = 0$ ,  $\varphi_k = 0$ , где  $\gamma = 0,1$  – коэффициент вторичной эмиссии, на аноде  $\partial n_+ / \partial y = 0$ ,  $n_+ = 0$ ,  $\varphi_k = U(t)$ ,  $\partial \varphi / \partial y = 0$ . Концентрации электронов и ионов в начальный момент времени по всей расчетной области считались неизменными и равными:  $n_e(x, y, 0) = n_+(x, y, 0) = n_0$ .

В начальный момент времени температура газа считали равной  $T_0 = 293$  К, а начальное давление  $p = 760$  Торр. Начальное распределение электрического поля находилось из решения уравнения Пуассона.

Для решения системы уравнений была составлена разностная схема. При этом сетка сгущалась близи катода и анода с минимальным пространственным шагом по оси Y 1 мкм. Число ячеек между электродами составляло 300, а по радиусу равномерная сетка имела число ячеек 200.

Данная постановка задачи позволяет проследить общие закономерности формирования стационарного состояния газового разряда. Рассмотрены результаты численного моделирования процесса формирования объемного разряда для следующих предположений: а) катод считается идеально гладким; б) на катоде задается одна микронеоднородность; в) на катоде имеются три микронеоднородности.

В первом случае мы сможем понять общую динамику формирования и развития начальной стадии разряда. А второй и третий случаи позволят изучить роль микронеоднородностей, а также их количество на катоде при формировании и развитии импульсного объемного разряда. По описанной выше расчетной модели был исследован процесс формирования импульсного ОР в He и Ar при напряжениях в диапазоне  $U_0 = (4-15)$  кВ,  $p = 1$  атм,  $d = 1$  см.

Рассмотрим результаты численных исследований разряда в гелии.

На рис.9 приведены характерные распределения концентрации электронов (а) и напряженности поля (б) в межэлектродном промежутке для различных моментов времени.

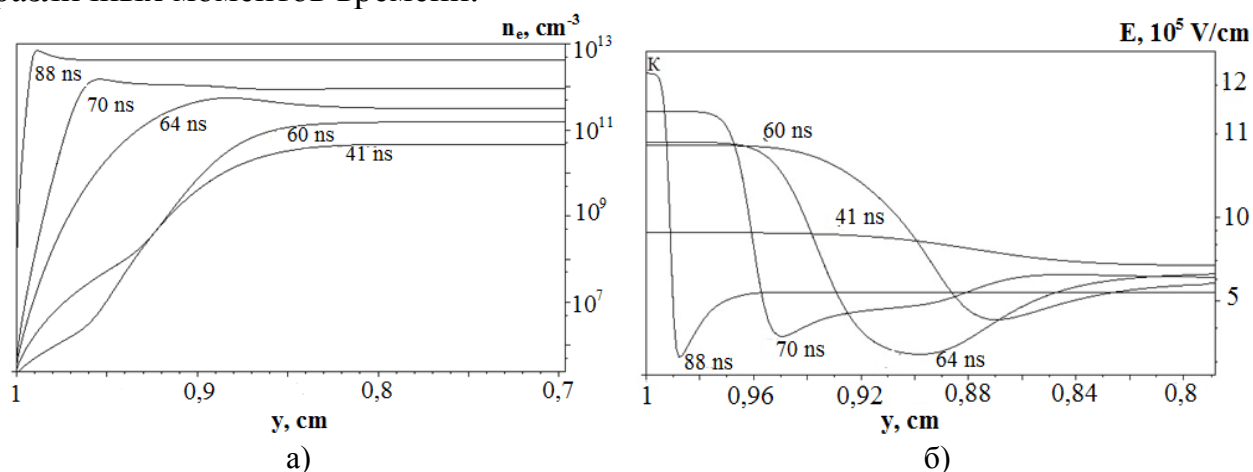


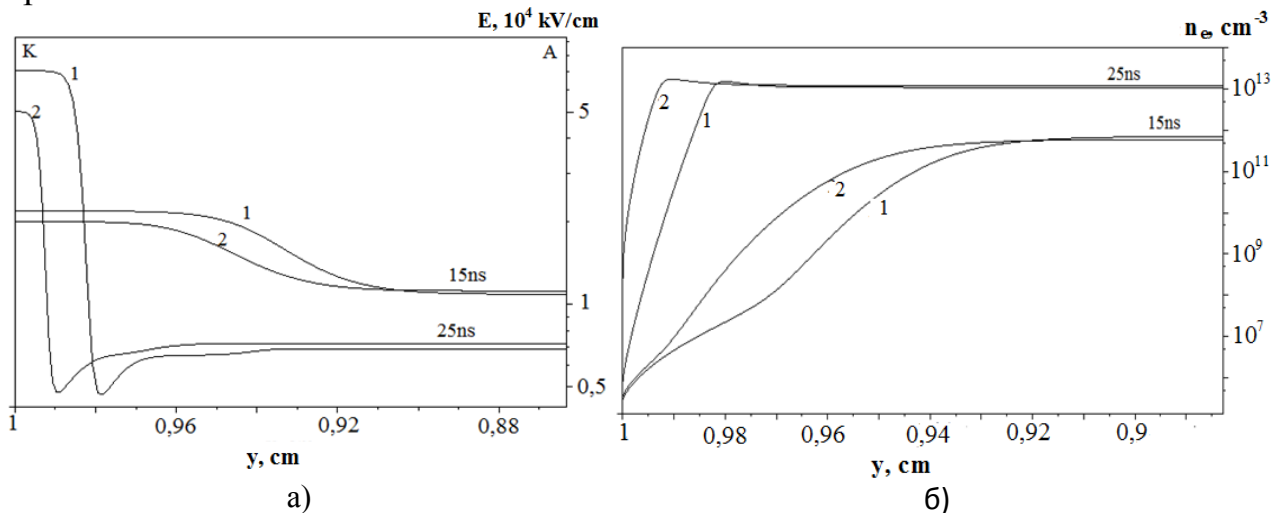
Рис.9. Характерные распределения концентрации электронов (а) и напряженности поля (б) в межэлектродном промежутке:  $U_0 = 7$  кВ,  $p = 760$  Торр,  $d = 1$  см.

Как видно из рисунка, вначале происходит поляризация плазмы близи катода. Электроны вследствие дрейфа уходят из прикатодной области, и образуется зона, где концентрация электронов меньше чем ионов. В

результате поляризации напряженность электрического поля в прикатодной области возрастает (рис.9 б), что приводит к росту процессов ударной ионизации. По мере удаления от катода плотность электронов в поляризованном слое также возрастает. Это приводит к смещению максимумов электронной плотности и поля к катоду. Из-за разного направления скоростей дрейфа заряженных частиц максимумы плотности электронов и ионов смещены друг относительно друга, и на профиле поля наблюдается минимум. С приходом волны ионизации на катод происходит релаксация основных параметров плазмы и электрического поля в катодном слое.

Результаты расчетов показывают, что напряженность поля в прикатодном слое на стадии объемного горения достигает  $\sim 10^4$ - $10^5$  В/см.

Были выполнены также расчеты формирования объемного разряда без учета и с учетом нелокальности ионизационных и дрейфовых характеристик электрона. В частности, на рис. 10 а,б приведены характерные распределения поля и концентрации электронов в промежутке для различных моментов времени.



**Рис. 10.** Характерные распределения напряженности поля (а) и концентрации электронов (б) в межэлектродном промежутке: кривая 1 - без учета нелокальности; кривая 2 - с учетом нелокальности ( $U_0=12$ кВ).

Показано, что использование нелокальных поправок приводит к увеличению скорости волны ионизации, а основные характеристики разряда изменяются незначительно и с приемлемой точностью могут рассчитываться в рамках локального подхода.

Аналогичные исследования были выполнены и в аргоне. Механизмы формирования катодонаправленных волн ионизации в гелии и аргоне аналогичны. Характерное значение концентрации электронов на стадии объемного горения определяется приведенной напряженностью поля  $E/p$ . В частности, при  $E/p=10$  В/(см атм) концентрация электронов составляет  $\sim 10^{14}$  см<sup>-3</sup> и удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. При наличии микронеоднородностей на поверхности катода поля будут иметь значения на порядок выше. Поэтому необходимо изучение роли таких



микронеоднородностей как на стадии формирования разряда, так и на более поздних стадиях.

На рис. 11 приведены характерные значения распределения концентрации электронов и напряженности электрического поля на промежутке для различных моментов времени в случае, когда на катоде имеются три микронеоднородности.

Здесь, на рис.9 - рис.11,  $x$  – координата, меняющаяся поперек электродов,  $y$  – координата, меняющаяся вдоль поля (от анода к катоду).

Расчеты показывают, что микронеоднородности существенно не искажают фронт волны ионизации, но с приходом волны ионизации на катод формируются совокупность диффузных каналов, привязанных к микронеоднородностям. Следовательно, можно предположить, что с увеличением амплитуды прикладываемого поля роль микронеоднородностей увеличивается и разряд должен состоять из большого числа диффузных каналов, характерное значение тока и энерговыдел в которых недостаточны для развития искрового канала, что и наблюдается на эксперименте.

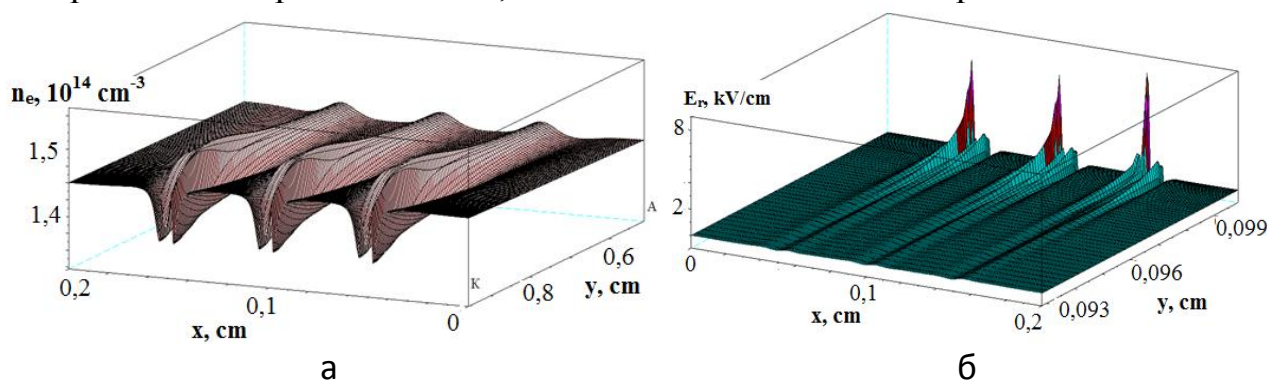


Рис. 11. Характерные значения распределения концентрации электронов (а) и напряженности поля в разрядном промежутке:  $U_0=10$  кВ,  $p=760$  Торр,  $t=42$  нс.

**В четвертой главе** диссертации исследованы спектральные характеристики и кинетические процессы в импульсных разрядах инертных газов атмосферного давления.

В § 4.1 определены проводимость и энерговыдел на различных стадиях импульсных разрядов инертных газов атмосферного давления. Представлены результаты экспериментальных исследований мощности вкладываемой в разряд в широком диапазоне изменения начальных условий. Показано, что с увеличением отношения  $E/p$  максимальная мощность и энергия вкладываемые в разрядный промежуток увеличиваются и основная доля энергии вкладывается в разряд на стадии объемного горения.

В § 4.2 изучены кинетические свойства плазмы импульсного разряда в гелии на различных стадиях развития. В частности, выполнены оценочные расчеты характерных частот (электрон-атомных, электрон-электронных и электрон-ионных) столкновений на различных стадиях для различных форм развития разряда в гелии атмосферного давления, которые позволили показать, когда плазма является слабоионизованной, а когда –

сильноионизованной. Рассчитаны также характерные параметры разряда: проводимость и средняя температура электронов.

В § 4.3 изучены особенности оптического излучения импульсного объемного разряда в гелии высокого давления. В частности, получены результаты исследования спектральных характеристик импульсного ОР в *He* в режиме однородного горения, в режиме перехода ОР в искровой канал и в режиме перехода ОР в сильноточный диффузный режим (СДР).

Изучен временной характер формирования и развития спектрального состава излучения самостоятельного объемного разряда в гелии и выявлены наиболее интенсивные спектральные линии исследуемого газа (*He*) и материала вещества электродов (*Fe*), возбуждаемые в разряде в области спектра (300–800 нм). Показано, что с увеличением величины приведенной напряженности электрического поля  $E/p$  интенсивности излучения в спектральных линиях увеличивается.

Для сравнения на рис. 12 приведен панорамный спектр разряда в области длин волн 370-430 нм для двух значений прикладываемого к промежутку напряжения (а - 10 кВ, б – 12 кВ). Из рис. 12 следует, что с увеличением энерговклада в разряд растет как относительная интенсивность спектральных линий, так и возбуждаются в разряде новые спектральные линии исследуемого газа (*He*) и материала вещества электродов (*Fe*).

На рис.13 приведен панорамный спектр разряда в области спектра 670-730 нм для двух значений прикладываемого к промежутку поля (а-7 кВ – объемный разряд, б – 12 кВ – контрагированный разряд). Следует отметить, что с увеличением энерговклада в разряд растет как относительная интенсивность спектральных линий, так и возбуждаются в разряде новые спектральные линии исследуемого газа и материала вещества электродов.

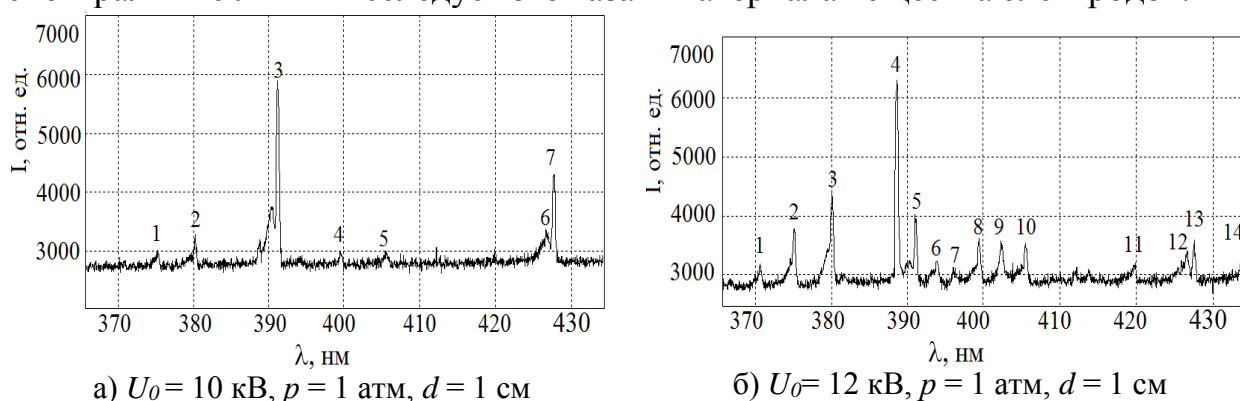
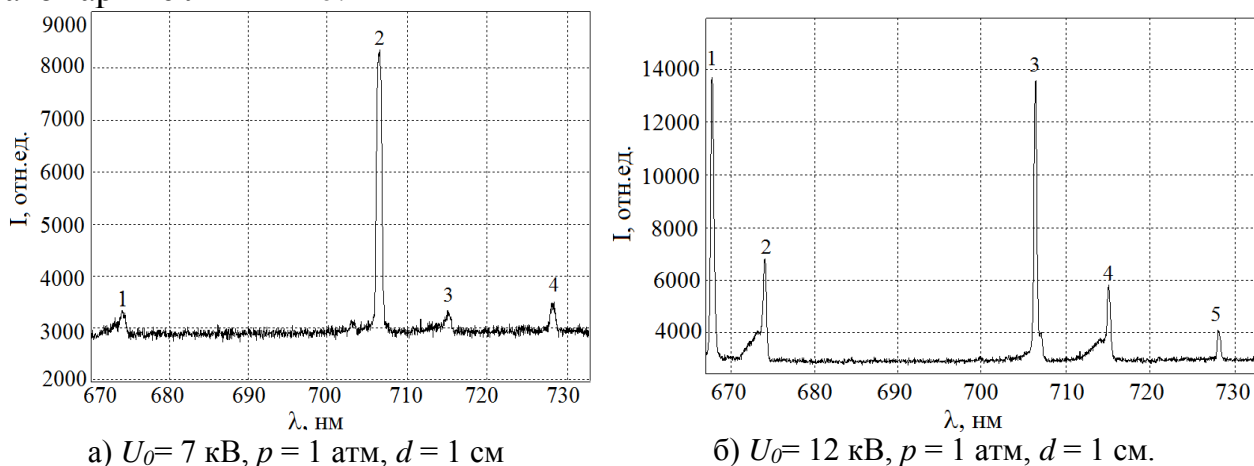


Рис.12. Панорамный спектр разряда в *He* при различных начальных энерговкладах в разряд: а) **Fe(нм):** 1 -  $\lambda=375,823$ ; 4 -  $\lambda=399,739$ ; 5 -  $\lambda=428,544$ ; **He(нм):** 2 -  $\lambda=381,96$ ; 3 -  $\lambda=388,865$ . б) **Fe(λ, нм):** 2 - 375,8; 5 - 391,364; 6 - 394,81; 7 - 393,606; 8 - 399,739; 10 - 404,582; 11 - 419,562; 12 - 428,544; **He (λ, нм):** 3 - 381,96; 4 - 388,865; 9 - 403,227.

Интенсивность исследованных спектральных линий (*He*, *Fe*) в диапазоне 370-730 нм, возбуждаемых в разряде увеличивается с увеличением амплитуды прикладываемого поля.

Например, при  $U_0=3$  кВ энерговклад в разряд составляет 0,0675 Дж, при этом разрядный промежуток представляет собой столб однородной плазмы

высокой проводимости. При этом в разряде возбуждаются в основном атомарные линии *He*.



а)  $U_0 = 7$  кВ,  $p = 1$  атм,  $d = 1$  см  
 б)  $U_0 = 12$  кВ,  $p = 1$  атм,  $d = 1$  см.  
 Рис.13. Панорамный спектр разряда в *He* при различных начальных энерговкладах в разряд: а)  $U_0 = 7$  кВ: **Fe (нм):1** - 673,31; **3** - 714,53; **He (λ, нм):2** - 706,52; **4** - 728,14; б)  $U_0 = 12$  кВ: **Fe (нм):2** - 673,31; **4** - 714,53; **He (λ, нм):1** - 667,82; **3** 706,52; **5**- 728,14.

**В пятой главе** подробно исследованы кинетические характеристики и оптическое излучение сильноточных импульсных разрядов в инертных газах (*He, Ar*) высокого давления.

Динамика формирования сильноточного диффузного разряда в инертных газах атмосферного давления подробно описана в § 5.1. Анализ экспериментальных результатов перехода в гелии диффузного ОР в контрагированный разряд и в СДР показывает, что увеличение энерговклада в разряд приводит к контрагированию ОР в искровой канал при критическом значении отношения  $E_{кр}/p \approx 13$  кВ/атм·см (см. рис. 1, фото б). На интегральных картинах с ростом давления (при давлениях 2, 3 атм в условиях эксперимента) разряд расконтрагируется и горит однородно и диффузно, так как приведенные значения отношения  $E/p$  с ростом давления при тех же полях оказываются малыми, существенно не достигающими критической величины  $E_{кр}/p \approx 13$  кВ/атм·см.

Показано, что при большом значении запасенной энергии  $CU^2/2 \geq 1$  Дж (величина накопительной емкости  $C = 1,5 \cdot 10^{-8}$  Ф, поля  $E_0 \geq 12$  кВ/см) и значительных перенапряжениях  $W \geq 300\%$  ( $p = 1$  атм,  $d = 1$  см) объемный разряд в *He* преобразуется в СДР (рис.3 а, фото 4; рис.3 б, фото 5, электроды – плоские) с удельной мощностью  $\sim 10^6$  Вт/см<sup>3</sup>, плотностью тока  $\sim 10^2 - 10^3$  А/см<sup>2</sup>, концентрацией электронов  $\sim 10^{16}$  см<sup>-3</sup> и температурой  $\sim 1-2$  эВ.

Развитие ОР затормаживается на промежуточной стадии - диффузные каналы, которые сливаясь, образуют однородный столб разряда высокой проводимости с высокой концентрацией электронов ( $\sim 10^{16}$  см<sup>-3</sup>) и плотностью тока порядка  $10^2 - 10^3$  А/см<sup>2</sup>. Дальнейшее повышение напряжения приводит к росту числа катодных пятен на поверхности катода, из которых прорастают диффузные каналы. Диаметр столба растет по мере увеличения приложенного напряжения.

Аналогичные измерения выполнены и в аргоне. Показано, что в аргоне начиная с некоторого критического напряжения (зависящего от давления),

переход к искровому каналу не наблюдается при вкладываемой энергии  $\leq 1$  Дж и при перенапряжениях более 75% формируется сильноточный диффузный разряд (СДР) с удельной мощностью  $\sim 10^7$  Вт/см<sup>3</sup>, плотностью тока  $\sim 10^3$ – $10^4$  А/см<sup>2</sup>, концентрацией электронов  $\sim 10^{17}$  см<sup>-3</sup> и температурой  $\sim 1$  эВ. Основным механизмом ионизации является ступенчатая ионизация, а каналом гибели электронов - диссоциативная рекомбинация.

Результаты исследований также показывает, что варьируя пробойным напряжением, удается в определенных пределах регулировать параметры плазмы СДР. Удельная мощность энергоклада в сильноточный диффузный разряд составляет  $\sim 10^7$  Вт/см<sup>3</sup>. Эти особенности СДР в сочетании с малой индуктивностью (по сравнению с искровым каналом) дают возможность создания импульсных тиратронов и коммутаторов тока, работающих в режимах горения СДР.

Экспериментальные результаты формирования и развития ударных волн (УВ) в инертных газах высокого давления также представлены в § 5.1. По спектрам излучения прикатодной плазмы и по пространственно-временным картинам развития тела свечения изучен процесс расширения плазмы катодного пятна (КП) и формирование УВ, приводящих к образованию диффузных каналов, привязанных к КП в импульсных ОР в гелии в диапазоне давлений 1-5 атм и прикладываемых напряжений от статистического пробивного до сотни процентов перенапряжений в сантиметровых промежутках. В рамках сферически симметричной модели получены аналитические выражения для расчета радиуса плазмы катодного пятна и скорости его расширения, удовлетворительно согласующихся с экспериментальными данными.

Результаты исследований оптического излучения сильноточных импульсных разрядов в инертных газах высокого давления представлены в §5.2. Изучены особенности спектра излучения исследуемого газа и спектра материала вещества электродов при различных начальных условиях, а именно в режиме однородного горения ОР, в режиме перехода ОР в искровой канал и в режиме перехода ОР в СДР. Показано, что спектр прикатодной плазмы характеризуется интенсивными линиями материала вещества электродов. По методу относительных интенсивностей определена температура электродов в плазме катодного факела, а по Штарковскому уширению спектральных линий определены характерные значения концентрации электронов.

**В заключении** диссертации сформулированы основные результаты и выводы работы:

1. Выполнено комплексное исследование, с применением современных методов диагностики, особенностей формирования и развития импульсного разряда в инертных газах (*He*, *Ar*) атмосферного давления в условиях предварительной ионизации газа. Развита физическая картина о механизме пробоя газов высокого давления на начальных стадиях, что важно для улучшения характеристик различных устройств,

работа которых связана с использованием пробоя газовых промежутков.

2. Изучен временной характер формирования и развития спектрального состава излучения как из объема, так и приэлектродной плазмы самостоятельных объемных разрядов в гелии и аргоне, как в режиме однородного горения, так и на сильноточных стадиях и выявлены наиболее интенсивные атомарные и ионные спектральные линии, возбуждаемые в плазме. Показано, что на стадии перехода от объемного режима горения в неустойчивый режим (контракция) возрастает интенсивности этих линий.

3. Разработана двухмерная осесимметричная модель формирования импульсного объемного разряда, в инертных газах высокого давления, учитывающая нелокальную зависимость коэффициента Таунсенда от напряженности электрического поля. Исследовано влияние начальных параметров на особенности формирования разряда. Показано, что формирование объемного разряда происходит в процессе развития одной катодонаправленной волны ионизации, а наличие микронеоднородностей на поверхности катода могут быть причиной формирования СДР. Установлено, что введение нелокальных поправок приводит к увеличению скорости волны ионизации, а основные характеристики разряда изменяются незначительно и с приемлемой точностью могут рассчитываться в рамках локального подхода.

4. Впервые выполнен качественный анализ кинетики формирования оптического излучения прикатодной плазмы самостоятельных разрядов в инертных газах (*He, Ar*), позволяющий определить механизм контракции объемных разрядов в искровой канал. Показано, что в процессе перехода объемного разряда в искровой канал и в СДР, в спектре прикатодной плазмы зажигаются новые линии материала вещества электродов. Изучено влияние перенапряжения на интенсивность (в отн. ед.) спектра излучения прикатодной плазмы (линий материала вещества катода).

5. Выполнено комплексное экспериментальное исследование формирования ударных волн в газах высокого давления с наносекундным временным разрешением. Экспериментально и расчетами показано, что разлет плазмы катодного пятна носит адиабатический характер, при этом плазма катодного пятна охлаждается с характерным временем  $\sim 10^{-8}$  с и имеет характерный начальный размер взрывоэмиссионного центра  $\sim 10^{-6}$  м. Ударная волна, распространяющаяся вдоль направления электрического поля, является дополнительным источником нагрева газа в предискровом диффузном канале.

6. Получены результаты детального исследования механизма зажигания в инертных газах (*He, Ar*) атмосферного давления в условиях предварительно ионизированной газовой среды необычной формы разряда с объемным протеканием тока – сильноточный диффузный режим (СДР), в котором практически отсутствует контракция. Характерные параметры СДР составляют: в гелии (удельная мощность  $\sim 10^6$  Вт/см<sup>3</sup>, плотность тока  $\sim 10^2$ – $10^3$  А/см<sup>2</sup>, концентрация электронов  $\sim 10^{16}$  см<sup>-3</sup> и температура  $\sim 1$ -2 эВ), в

аргоне (удельная мощность энерговыклада  $\sim 10^7$  Вт/см<sup>3</sup>, плотность тока  $\sim 10^3$ – $10^4$  А/см<sup>2</sup>, концентрация электронов  $\sim 10^{17}$  см<sup>-3</sup> и температура  $\sim 1$  эВ). Показано, что варьируя пробойным напряжением, удается в определенных пределах регулировать параметры плазмы СДР. Эти особенности СДР в сочетании с малой индуктивностью (по сравнению с искровым каналом) дают возможность создания импульсных тиратронов и коммутаторов тока, работающих в режимах горения СДР.

**Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:**

Статьи, опубликованные в журналах, включенных в Перечень ВАК РФ:

1. Курбанисмаилов, В.С. Особенности сверхзвукового расширения искрового канала в аргоне во внешнем продольном магнитном поле /Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Арсланбеков М.А., Рагимханов Г.Б., Курбанисмаилов М.В., Али Рафид. А.А. //Прикладная физика.- 2013.- № 5.- С. 47-51.
2. Курбанисмаилов, В.С. Особенности контракции объемного разряда в Не атмосферного давления /Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Абакарова Х.М., Али Рафид А.А. //Вестник Дагестанского государственного университета.- 2013.-№ 6.- С. 38-46.
3. Курбанисмаилов, В.С. Оптическое излучение импульсного объемного разряда в Не высокого давления /Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Арсланбеков М.А., Абакарова Х.М., Али Рафид А.А. //Успехи прикладной физики. -2014. -Т. 2.- № 3. С. 234-242.
4. Курбанисмаилов, В.С. Импульсный объемный разряд в гелии при высоких перенапряжениях. /Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Абакарова Х.М., Али Рафид А.А. //Успехи прикладной физики. - 2015. - Т.3. - №2. - С.154-161.
5. Курбанисмаилов, В.С. Сильноточный диффузный разряд в аргоне /Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Абакарова Х.М., Али Рафид А.А. //Прикладная физика. - 2015. - №2. - С.63-67.
6. Курбанисмаилов, В.С. Особенности формирования ударных волн в разрядной плазме при наличии магнитного поля /Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Абакарова Х.М., Али Рафид Аббас Али //Физика плазмы. - 2016. - Т.42. - №7. - С.1-13.

Другие публикации:

7. Курбанисмаилов, В.С. Однородность и устойчивость объемного разряда в гелии атмосферного давления /Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Арсланбеков М.А., Абакарова Х.М., Али Рафид Аббас Али // В сб.: Материалы Всероссийской конференции «Современные проблемы физики плазмы». Махачкала, 2013. С.54-63.
8. Курбанисмаилов, В.С. Формирование искрового канала в аргоне атмосферного давления /Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Курбанисмаилов М.В., Али Рафид Аббас Али //В сб.: Материалы Всероссийской конференции «Современные проблемы физики плазмы». Махачкала, 2013. С. 64-72.

9. Курбанисмаилов, В.С. Особенности формирования ионизационных волн на начальных стадиях импульсного пробоя в инертных газах высокого давления /Курбанисмаилов В.С., Аль-Харети Фаваз Мохаммед, Али Рафид Аббас Али //Тезисы доклада VI Всероссийской научно - практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов». Томск, 2013
10. Курбанисмаилов, В.С. Оптическое излучение импульсных объемных разрядов в инертных газах высокого давления /Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Арсланбеков М.А., Абакарова Х.М., Али Рафид Аббас Али. // Тез. докл. Всероссийской конференции "Физика низкотемпературной плазмы" Казань, 2014.
11. Курбанисмаилов, В.С. Формирование пространственной структуры импульсного разряда в гелии /Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Арсланбеков М.А., Абакарова Х.М., Али Рафид Аббас Али // В сб.: материалы VIII Всероссийской конференции «Физическая электроника», г. Махачкала, 2014. С. 107-114.
12. Курбанисмалов, В.С. Взаимодействие фотоплазмы в воздухе с ударной волной /Курбанисмалов В.С., Рагимханов Г.Б., Хачалов М.Б., Аббас Али А.Р. // В сб.: Тезисы докл. XLII Международной конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород. 2015.
13. Курбанисмалов, В.С. Двумерное моделирование развития волны ионизации в предварительно ионизованной газовой среде /Курбанисмалов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Терешенок Д.В., Али Рафид Аббас Али //В сб.: материалы II Всероссийской конференции Современные проблемы физики плазмы и физической электроники. Махачкала, 2015. С. 93-100.
14. Курбанисмалов, В.С. Влияние микронеоднородностей на поверхности катода на устойчивость самостоятельных объемных разрядов /Курбанисмалов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Терешенок Д.В., Али Рафид Аббас Али. // В сб.: Тезисы докл. XLIII Международной конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, 2016.
15. Курбанисмалов, В.С. Особенности развития волны ионизации в аргоне в условиях предварительной ионизации газа /Курбанисмалов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Абакарова Х.М., Али Рафид Аббас Али. //Российская научно-практическая конференция с международным участием «Фундаментальные проблемы и прикладные аспекты химической науки и образования. Махачкала, 2016.
16. Курбанисмалов, В.С. Особенности формирования начальной стадии импульсного разряда в аргоне в условиях предварительной ионизации газа /Курбанисмалов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Абакарова Х.М., Али Рафид Аббас Али. //Российская научно-практическая конференция с международным участием «Фундаментальные проблемы и прикладные аспекты химической науки и образования. Махачкала, 2016.