

*На правах рукописи*

**ГАДЖИЕВ МАХАЧ ХАЙРУДИНОВИЧ**

**ДИНАМИКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ И  
КИНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В  
ГЕЛИИ В КОРОТКИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕННЫХ  
ПРОМЕЖУТКАХ**

Специальность 01.04.04. – физическая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

МАХАЧКАЛА 2006

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Дагестанский государственный университет»

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор **Курбанисмаилов В.С.**,

**Научный консультант:** кандидат физико-математических наук, доцент **Хачалов М.Б.**

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук, профессор **Василяк Л.М.**

доктор физико-математических наук, профессор **Садыков С.А.**

**Ведущая организация:** **Институт высоких температур РАН**

Защита диссертации состоится « 26 » декабря 2006 г. в 14<sup>00</sup> час на заседании диссертационного совета Д 212.053.02 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук при Дагестанском государственном университете по адресу: 367000, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а, конференцзал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Дагестанского государственного университета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2006г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д. ф.- м. н.

Курбанисмаилов В.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию динамики развития пространственной структуры и кинетическим процессам, протекающих в импульсных разрядах гелия в коротких перенапряженных промежутках, а также определению механизмов контракции объемного разряда в искровой канал в режиме распыления материала электродов в широком диапазоне изменения начальных условий.

**Актуальность исследования.** Импульсные разряды, развивающиеся в плотных газах, находят широкое распространение и применение в новейших областях науки и техники. Именно такими разрядами накачиваются газовые технологические лазеры, лазеры для военных применений, медицины и научных исследований, применяются в импульсных источниках света, используются в разработке быстродействующих коммутаторов тока, в устройстве квантовой электроники, фотохимии и т.д.

Именно в подобных исследованиях были установлены классические – таунсендовский и стримерный механизмы роста проводимости разрядных промежутков, соответственно применяемых как для объяснения зажигания тлеющего разряда при малых полях, так и искрового пробоя при высоких перенапряжениях.

В связи с усовершенствованием современной техники эксперимента существенно расширился диапазон представлений об импульсных разрядах, развивающихся в плотных газах. В частности, для искровых разрядов в длинных промежутках обнаружено развитие неизвестной ранее неустойчивости плоского фронта ионизации участка стримера (ветвление стримера), которое происходит при достижении им некоторого критического размера и развивается быстрее, чем стример достигает противоположного электрода. В научной литературе отсутствуют надежные экспериментальные данные и единое мнение о механизме ветвления стримера и количественного и качественного его обоснования.

Поскольку атомарный газ - гелий широко используется в качестве буферного газа в активных средах газовых лазеров, то помимо исследований характера формирования и контракции ОР в искровой канал, наблюдений разнообразных картин развития неустойчивостей объемных и стримерных разрядов, представляют также значительный интерес экспериментальные и теоретические результаты, посвященные изучению механизмов возбуждения и девозбуждения энергетических уровней атомов, определению концентрации различных молекулярных комплексов и степени их влияния на процессы, протекающие в плазме газового разряда.

Прогресс в указанных областях в существенной степени зависит от знания физических свойств разряда на различных стадиях его развития. Все это требует получения дополнительных результатов на основе новых измерений.

**Цель и задачи исследования.** В настоящей работе исследованы динамика пространственной структуры и кинетические процессы импульсного разряда в гелии в коротких перенапряженных промежутках.

В задачи диссертационной работы входило:

1. Анализ процессов, протекающих на электродах и в прикатодных областях, и их роли в поддержании и развитии неустойчивостей объемного разряда.

2. Изучение физического механизма ветвления стримеров и качественное обоснование этого явления.

3. Детальное исследование спектрального состава излучения объемных и контрагированных разрядов и кинетики ее формирования в коротких перенапряженных промежутках.

4. На основе двумерной модели разработка методики и алгоритма численного расчета механизма формирования катодного слоя импульсного ОР и изучение его электрокинетических характеристик в условиях близких к экспериментальным.

**Объектами исследования** являлись свободно расширяющиеся самостоятельные импульсные разряды в межэлектродных промежутках (1-3 см) в гелии в диапазоне давлений 1-5 атм и прикладываемых полей 3-25 кВ/см.

**Методы исследования.** Для решения поставленной задачи был принят комплексный подход, включающий использование различных экспериментальных методов: электрических, оптических и спектральных с временным разрешением  $\approx 10$  нс. Распределения концентрации электронов, ионов, возбужденных атомов и молекулярных комплексов в межэлектродном промежутке как на стадии формирования, так и развития ОР, рассчитывались теоретически на основе разработанных математических моделей.

**Достоверность научных результатов и обоснованность научных положений** базируются на использовании современных средств диагностики с высоким временным и пространственным разрешением, систематичности экспериментальных исследований в широком диапазоне начальных условий. Сочетание численных и экспериментальных методов исследования, и их соответствие с имеющимися данными других авторов, подтверждают достоверность полученных результатов.

**Научная новизна исследования.** В результате проделанной работы впервые получены следующие результаты:

1. Впервые в коротких перенапряженных промежутках экспериментально обнаружен процесс ветвления стримера в гелии атмосферного давления и дано качественное обоснование этого явления.

2. Разработана и обоснована двумерная модель для изучения механизма формирования катодного слоя ОР при импульсном пробое гелия высокого давления. Экспериментально и расчетами показано, что формирование ОР в гелии с предыонизацией, как и в одномерном случае, происходит в процессе движения одной катодонаправленной волны ионизации, а основным процессом, обеспечивающим ток проводимости с катода на стадии формирования, является фотоэмиссия.

3. Детально изучена кинетика образования заряженных и возбужденных частиц в плазме объемного разряда высокого давления и выяснена роль

процессов диссоциативной рекомбинации с участием молекулярных комплексов  $\text{He}^+_2$  и  $\text{He}^+_3$  в общей кинетике развития разряда, которые являются преобладающими рекомбинационными процессами, обеспечивающие однородность и устойчивость объемного горения импульсного разряда.

**Научная и практическая ценность работы** в основном определяется актуальностью темы и научной новизной проведенных исследований. Результаты исследований будут способствовать дальнейшему развитию физических представлений как о начальных стадиях стримерного пробоя, так и об импульсных ОР, развивающихся в газах высокого давления. В частности, для объяснения наблюдаемых больших скоростей фронтов свечения в плотных газах и распространения ионизации в сторону катода, для получения объемных форм разрядов при атмосферных давлениях.

Результаты исследования спектрального состава излучения как из объема, так и приэлектродной плазмы (плазма паров металла, образуемая при распылении электродов), а также излучательные и спектральные характеристики плазмы, определяющие заселенность энергетических уровней атомов представляют интерес для получения стимулированного излучения в УФ областях спектра и дают обширную информацию о кинетике его формирования.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты экспериментального и численного исследования начальных стадий импульсного пробоя и качественного обоснования, обнаруженного в He в коротких перенапряженных промежутках механизма ветвления стримеров.

2. Результаты проведенного детального исследования спектра излучения как из объема, так и из приэлектродной плазмы объемного разряда в гелии.

3. Результаты двумерной модели формирования самостоятельного разряда с объемной предыонизацией, в основе которой лежит процесс движения одной катодонаправленной волны ионизации, скорость которой определяется интенсивностью накопления положительных ионов на фронте волны, а основным процессом, обеспечивающим ток проводимости с катода на стадии формирования, является фотоэмиссия с катода. А также механизм инициирования и развития неустойчивости ОР в гелии.

4. Результаты по кинетике заселения возбужденных состояний атомов исследуемого газа, а также выяснение доминирующих рекомбинационных процессов в плазме объемного разряда с участием молекулярных комплексов.

**Вклад автора.** Личный вклад автора в работы, на основе которых написана диссертация, является определяющим. Автор внес основной вклад во все этапы численного исследования импульсных разрядов. Автор непосредственно участвовал в измерении электронно-оптических и спектральных характеристик разряда, обработал результаты экспериментальных исследований и дал соответствующую интерпретацию.

Путем численного моделирования изучил как механизмы формирования катодного слоя ОР в гелии, так и кинетику заряженных и возбужденных частиц в плазме.

По экспериментальным значениям времен формирования катодных пятен рассчитал характерные параметры прикатодной области, с учетом различных процессов эмиссии и дал качественное обоснование механизма ветвления стримера в гелии атмосферного давления.

#### **Апробация результатов исследования и публикации.**

Результаты, содержащиеся в настоящей диссертационной работе, докладывались на VII, VIII и IX - Всероссийских конференциях студентов - физиков и молодых ученых (Санкт Петербург, 2001; Екатеринбург, 2002; Красноярск 2003); на VIII и X Международных конференциях студентов и аспирантов по фундаментальным наукам (Москва, МГУ - 2001, 2003); на II, III и IV Всероссийских конференциях по физической электронике (Махачкала, ДГУ 2001, 2003, 2006); на II Международном конгрессе студентов, молодых ученых и специалистов (Москва, МГТУ, 2002); на I, II и III Международных конференциях по фазовым переходам и нелинейным явлениям в конденсированных средах (Махачкала, ИФ ДНЦ РАН, 2000, 2002, 2004); на региональной конференции «Компьютерные технологии в науке технике и образовании» (Махачкала, ДГУ, 2000); на Всероссийских конференциях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород, 2003, 2004, 2005, 2006); на VI Международной конференции «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул» (Томск, 2003); а также на научных семинарах ДГУ. Высокий научный уровень результатов был отмечен дипломами лауреата различных конференций.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 34 печатных работ, в том числе 4 статьи (2 в реферируемых журналах).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 159 страниц печатного текста, включая 39 рисунков и 6 таблиц. Список цитируемой литературы насчитывает 152 наименований.

#### **Содержание работы**

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы основные задачи и цели исследования, отмечены научная и практическая значимость работы, научная новизна и выносимые на защиту положения. Приводится краткое содержание диссертации.

**В первой главе** приводится краткий обзор экспериментальных и теоретических работ, описывающих формирование самостоятельных импульсных ОР в различных газах высокого давления. Особое внимание уделяется работам как по кинетике процессов в инертных газах, так и спектроскопическим исследованиям объемных и контрагированных разрядов. Описаны условия, определяющие режим формирования и стационарного горения ОР, изучены механизмы формирования начальных стадий стримерного пробоя, а также особенности развития импульсных разрядов в

парогазовых смесях инертных газов. Показано, что длительность и устойчивость однородного ОР ограничивается неустойчивостями, возникающими как в объеме, так и в приэлектродных областях. В случае развития разряда в парогазовых смесях материала электродов показано, что именно наличие такой плазмы в области немоного распределения потенциала обеспечивает механизм токопереноса в приэлектродных областях, создавая потоки ионов, как в сторону катода, так и в сторону анода. Из-за низкого потенциала ионизации, пары материала электродов оказывают влияние на однородность, устойчивость и кинетику процессов в разряде.

Основное содержание первой главы сводится к изложению современного представления о состоянии вопроса и показывает достигнутую степень изученности процессов в импульсных разрядах атмосферного давления, а также определяет предмет и цель исследования.

**Во второй главе** диссертации (§2.1-§2.3) приводится описание экспериментальной установки и методик измерений параметров плазмы импульсных разрядов в газах атмосферного давления. Обосновываются методики регистрации электрических, оптических и спектральных характеристик разряда и анализируются их погрешности.

Диагностический стенд включает в себя вакуумную систему ( $\sim 10^{-5}$  Тор), спектрограф (ДФС-458С), монохроматор (МДПС-3), генератор импульсов напряжения (амплитудой до 30 кВ и фронтом нарастания  $\approx 10$  нс), фотоумножители (ФЭУ-30, ФЭУ-77, ФЭУ-79, ФЭУ-87), разрядную камеру из нержавеющей стали с симметричными кварцевыми окнами, скоростные и высоковольтные осциллографы (С8-12, С8-14), систему синхронизации и предыонизации.

Напряжение и ток разряда измерялись с помощью омического делителя напряжения и малоомного шунта соответственно. Начальная концентрация электронов, создаваемая внешним ионизатором, в который вкладывалась энергия  $\approx 0,3-0,4$  Дж, оценивалась по измеренному току в разрядной цепи при постоянном напряжении на промежутке (100-300В). Для улучшения отношения сигнал/шум и согласования сигнала с передающим кабелем применялся эмиттерный повторитель на высокочастотном транзисторе. По известному сечению разряда ( $D=4$  см) и измеренному току определялась средняя плотность тока и концентрация электронов.

Скорость распространения разряда и пространственно-временная структура его развития регистрировались с помощью фотоэлектронного регистратора ФЭР2-1. Здесь же приводится описание фотоэлектрического метода записи спектра излучения разряда с временным разрешением  $\sim 10$ нс.

В §2.4 диссертации представлена и обоснована двумерная модель формирования катодного слоя ОР, в которой решается система дифференциальных уравнений, состоящая из уравнений баланса для концентрации электронов и ионов, и уравнение Пуассона для электрического поля. Данная система уравнений решалась совместно с уравнением Кирхгофа для электрической цепи. Система уравнений имеет вид:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \operatorname{div} m_e \bar{E} n_e = a v_e n_e - b n_e n_i, \quad \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{e}{e_0} (n_e - n_i),$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} - \operatorname{div} m_i \bar{E} n_i = a v_e n_e - b n_e n_i, \quad (1)$$

$$\Delta j = 4pe(n_e - n_i), \quad \dot{E} = \nabla j, \quad a = \frac{A}{p} e^{\frac{-Bp}{p}},$$

с граничными условиями

$$n_e(t=0) = n_i(t=0) = n_0 f(x),$$

$$n_i(y=d) = 0; \quad j(y=0) = 0; \quad j(y=d) = U_0; \quad \left. \frac{\partial j}{\partial x} \right|_{x=\pm l} = 0;$$

$$m_e E_y n_e \Big|_{y=0} = g_i m_i E_y n_i \Big|_{y=0} + \frac{1}{p} g_{ph} \int dx' \int av_e n_e \frac{y dy}{y^2 + (x-x')^2}. \quad (2)$$

Здесь катод находится в точке  $y=0$ , а анод в точке  $y=d$ ,  $j$  - потенциал электрического поля,  $f(x)$  - описывает зависимость начальной концентрации плазмы от координаты  $x$  и  $f(x)$  задавалась функцией, близкой к ступенчатой, с характерной шириной  $h$ , стенки разрядной камеры располагались на расстоянии  $l$  от оси разряда, причем значение  $l$  выбиралось достаточно большим и не влияло на развитие разряда.

В приведенных уравнениях  $b$  - коэффициент электрон-ионной рекомбинации;  $n_e, n_i$  и  $v_e, v_i$  - соответственно концентрация и дрейфовые скорости электронов и ионов;  $e_0$  - электрическая постоянная,  $g_i, g_{ph}$  - коэффициенты вторичной эмиссии за счет бомбардировки катода ионами и фотонами соответственно;  $e$  - заряд электрона;  $j_e, j_i$  - плотности токов электронов и ионов;  $\alpha$  - коэффициент ударной ионизации,  $p$  - давление исследуемого газа,  $A$  и  $B$  - константы зависящие от сорта газа.

Данная сеточная краевая задача решалась с помощью итерационного процесса Либмана. При этом для вычисления двойного интеграла (2) воспользовались квадратурной формулой трапеций. Реализация описанной выше модели осуществлялась на языке программирования Delphi.

В §2.5 представлена кинетическая модель численного расчета распределения концентраций электронов, ионов, возбужденных атомов и молекулярных комплексов в межэлектродном промежутке и алгоритм её реализации. Для анализа элементарных процессов, протекающих в плазме импульсного ОР в гелии решается система из восьми дифференциальных уравнений кинетики для следующих компонент плазмы: концентрации атомов в основном и возбужденных состояниях с  $n=2, n=3,4$ ; электронов; атомарных и молекулярных ионов  $\text{He}^+, \text{He}_2^+, \text{He}_3^+$ ; эксимерных молекул совместно с уравнением для средней энергии электронов и уравнением Кирхгофа для электрического поля.

Для вычисления констант соответствующих элементарных процессов с участием электронов решалось кинетическое уравнение Больцмана в двучленном приближении:



$$\frac{d}{de} \left( b \frac{df}{de} \right) = J_{yn} + J_{ny} + J_{ee}, \quad (3)$$

где  $b = \frac{1}{3} \left( \frac{E}{N} \right)^2 e \cdot \left( \sum_k Y_k Q_{tr}^k \right)^{-1}$ ,  $E/N$ -приведенная напряженность электрического поля;  $e$  - текущая энергия электронов;  $Y$ - молярная доля  $k$ -го компонента смеси;  $Q_{tr}^k$ - транспортное сечение взаимодействия электрона с  $k$ -м компонентом, а  $J_y, J_{ny}, J_{ee}$  -соответственно интегралы упругих, неупругих и электрон-электронных столкновений.

**В третьей главе** рассматриваются и обсуждаются результаты расчетов функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ), кинетических и плазмохимических характеристик, а также результаты по двумерной модели формирования катодного слоя для импульсных ОР в гелии высокого давления. Здесь же рассматриваются результаты кинетики формирования заряженных и возбужденных частиц в плазме. Данная глава состоит из трех параграфов.

В §3.1 приведены результаты расчетов ФРЭЭ в плазме объемного разряда гелия высокого давления, и определены такие характеристики электронов как средняя энергия, приведенный коэффициент диффузии  $D/N$ , скорость дрейфа  $V_D$ , константы скоростей плазмохимических реакций  $k_j$ , которые с известными в литературе данными используются при моделировании кинетических характеристик объемного разряда.

В §3.2 детально изучена кинетика образования заряженных и возбужденных частиц в плазме объемного разряда гелия высокого давления и выяснена роль процессов диссоциативной рекомбинации с участием молекулярных комплексов  $He_2^+$  и  $He_3^+$  в общей кинетике развития разряда, которые являются преобладающими рекомбинационными процессами, обеспечивающие однородность и устойчивость объемного горения импульсного разряда. Расчетами показано, что концентрация молекулярных ионов на квазистационарной стадии горения разряда составляет 20-35% ( $10^{12} \text{ см}^{-3}$  и  $10^{11} \text{ см}^{-3}$  соответственно) от концентрации электронов и увеличивается с увеличением прикладываемого поля.

В частности, на рис.1 и рис.2 соответственно приведены характерные временные зависимости потоков процессов диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов  $He_3^+$  и  $He_2^+$  и их концентраций при различных начальных условиях. Расчеты также показывают, что с увеличением давления газа эффективность процессов диссоциативной рекомбинации с участием  $He_2^+$  и  $He_3^+$  уменьшается, а с ростом поля происходит увеличение потоков данных процессов.

В §3.3 приведены результаты расчетов по двумерной модели формирования катодного слоя ОР. Показано, что на начальной стадии формирования разряда, плазменный столб отодвигается от катода и вблизи катодной области, между плазменным столбом и катодом, образуется зона, обедненная зарядами, в которой концентрация ионов больше, чем электронов. Ионы частично экранируют внешнее поле, ослабляя его в плазменном столбе и

усиливая в прикатодной области, что приводит к формированию в межэлектродном промежутке катодонаправленной волны ионизации (КВИ), распространяющейся в сторону катода с характерной скоростью  $\sim 10^7$ - $10^8$  см/с. При этом в прикатодной области наиболее интенсивно заселяются состояния  $2^3S$ ,  $2^1P$  и  $3SPD$ .

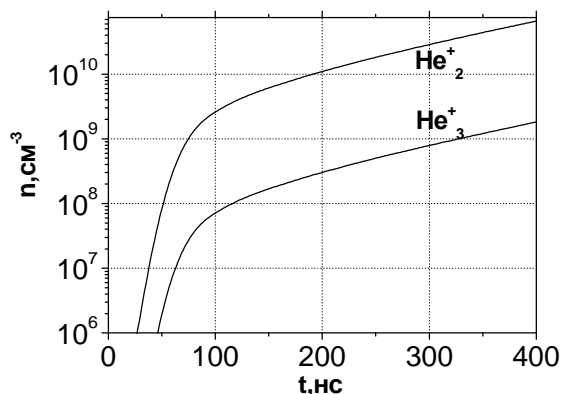
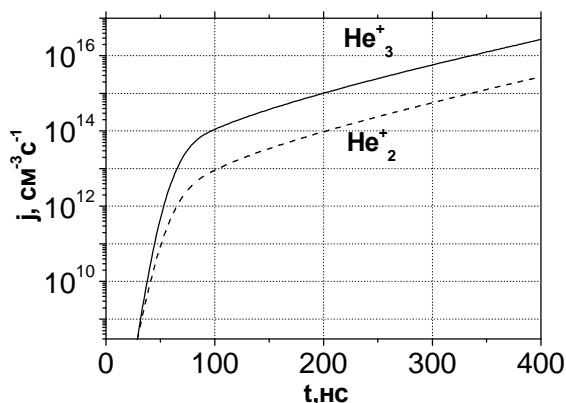


Рис.1. Характерные временные зависимости потоков диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов  $\text{He}_2^+$  и  $\text{He}_3^+$  при  $U_0=7$  кВ,  $p=1$  атм.

Рис.2. Характерные временные зависимости концентраций молекулярных ионов  $n(\text{He}_2^+)$  и  $n(\text{He}_3^+)$  при  $U_0=5$  кВ,  $p=1$  атм.

При заданной неоднородной предыонизации газа и поля максимальное искажение электрического поля приходится на центр разрядного промежутка, вследствие чего увеличивается коэффициент ударной ионизации и скорость рождения электронов. Увеличивающийся положительный объемный заряд в свою очередь вытесняет фронт КВИ к катоду и наиболее быстро в центре, что ведет к сужению КВИ при продвижении ее к катоду.

С приходом КВИ к катоду увеличивается роль процесса вторичной ионно-электронной эмиссии  $\gamma$ , Поэтому этот коэффициент нужно задать в виде функции  $E/p$ . Расчеты показывают, что при малых плотностях тока роль зависимости  $\gamma=f(E/p)$  является существенной. Однако при больших плотностях тока эта роль незначительна и основным механизмом, обеспечивающим ток проводимости с катода на стадии формирования ОР, является фотоэмиссия с катода. Стадия формирования ОР оказывается наиболее критичной к появлению зарядовых и других неоднородностей на катоде.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных и численных исследований начальных стадий импульсного пробоя в коротких перенапряженных промежутках как при наличии источника предварительной ионизации газа, так и без него. Данная глава состоит из пяти параграфов.

В §4.1 рассматриваются и обсуждаются экспериментальные результаты, полученные различными экспериментальными методами по развитию неустойчивости фронта волны ионизации на начальных стадиях стримерного пробоя. Известно, что для гелия  $E_{кр}=5,6$  кВ/см является границей стримерного пробоя. Скорости перекрытия промежутка стримерными каналами, измеренные из оптических картин, лежат в пределах  $10^7$ - $10^8$  см/с.

Динамические и статические картины (см. рис.3) свечения промежутка позволили определить наличие двух ионизационных фронтов в гелии:

- первый фронт (начальная стадия), регистрируемый с началом резкого спада напряжения, распространяющийся со скоростью  $10^7$ - $10^8$  см/с в зависимости от пробойного напряжения;

- второй фронт - искровой канал, регистрируемый со вторым спадом напряжения и распространяющийся со скоростью  $10^6$  см/с.

Оптические картины, снятые при различных давлениях в промежутке, показали, что с ростом давления скорость распространения стримерного канала уменьшается.

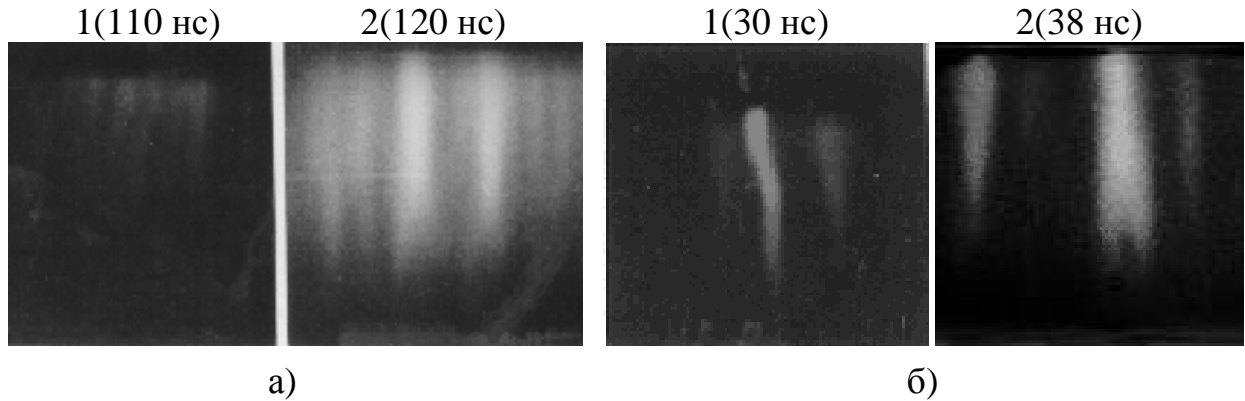


Рис. 3. Последовательные стадии развития плазменной области в гелии при полях 10 кВ/см (а) и 14 кВ/см (б) ( $p=1$  атм,  $d=1$  см, He).

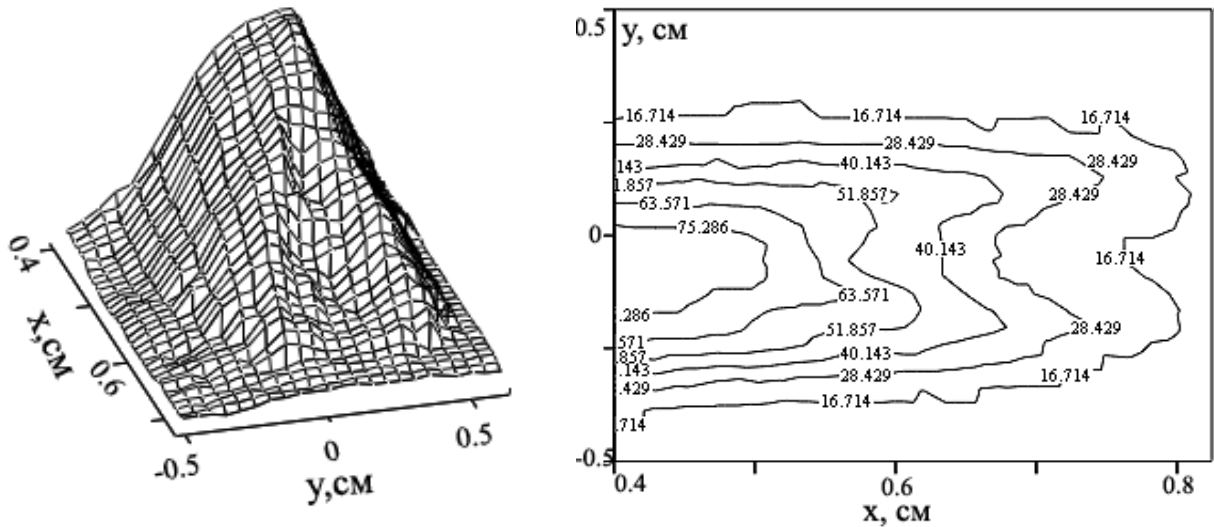


Рис.4. Двумерное распределение свечения стримерного пробоя в момент времени 38 нс при  $U_0=14$  кВ ( $p=1$  атм,  $d=1$  см, He), где  $x$  – координата, меняющаяся вдоль длины промежутка,  $y$  – поперек разряда.

С другой стороны, экспериментальные результаты развития начальных стадий стримерного пробоя позволили также обнаружить в гелии в сантиметровом промежутке при критическом значении прикладываемого поля процесс ветвления стримера. Из рис.3,4 видно, что при  $U_0=10$  кВ критическая длина стримера, при которой происходит ветвление, составляет  $l_{кр} \approx 7$  мм, а при  $U_0=14$  кВ –  $l_{кр} \approx 5$  мм. Таким образом, с ростом величины прикладываемого поля уменьшается как критическая длина, так и время ветвления стримера.

Качественное обоснование эффекта ветвления стримера можно представить следующим образом.

Во-первых, из пространственно-временных картин формирования стримерного пробоя (см. рис.3) видно, что по сечению в стримерном канале свечение распределено неравномерно, обусловленное наличием градиента плотности зарядов в радиальном направлении. Наличие такого градиента, прежде всего, обусловлено неоднородностью распределения внешнего электрического поля по сечению промежутка (использовались алюминиевые электроды с радиусом кривизны  $\approx 30$  см). Поэтому, из условия непрерывности полного электрического тока как на головке, так и на боковой поверхности следует, что амплитуда поля внутри стримерного канала с размытыми границами возрастает при переходе от центра к периферии, а концентрация электронов, наоборот падает. Именно там создаются условия для зарождения очагов повышенной концентрации плазмы. В усиленном поле происходит интенсивная ионизация, приводящая к появлению возмущения плотности зарядов и соответственно к неустойчивости поверхности фронта ионизации катодонаправленного стримерного канала.

Здесь же был рассчитан инкремент неустойчивости  $\gamma_0$  фронта ионизации стримера, который показывает, что характерное расстояние, на которое уйдет фронт за время развития неустойчивости  $1/g_0$ , составляет  $u_{fr} / g_0 \approx (0.3 \div 0.8)r_0$ , где  $u_{fr}$  – скорость фронта стримера,  $r_0$  – радиус головки стримера. Это означает, что головка стримера должна распадаться на отдельные отростки с характерными поперечными размерами, много меньшими  $r_0$ , что и наблюдается в условиях нашего эксперимента.

С другой стороны, возможно еще взаимодействие зарядов поверхности фронта с положительным остаточным зарядом перед головкой. В результате, появляются области с радиусом  $r < r_0$ , где напряженность поля выше, чем на оси головки канала. Поскольку от напряженности поля зависит скорость движения, то со временем центральная часть фронта головки будет замедляться, а периферийные области ускоряться. В конечном итоге это приводит к делению головки катодонаправленного стримера.

В исследованном диапазоне давлений и напряжений определены условия, при которых катодонаправленный стример не ветвится, а наблюдается одиночный канал или несколько стримерных каналов.

В §4.2 приводятся результаты экспериментального исследования времени устойчивого горения ОР. Показано, что в широком диапазоне плотностей токов и длительностей горения разряда (см. рис.5 а,б) процесс контракции происходит за счет прорастания высокопроводящих каналов со стороны электродов ( $v_k \approx 10^6$  см/с).

При этом роль иницирующих факторов для развития процесса контракции играют катодные и анодные пятна. Об этом свидетельствуют спектральные измерения, приведенные далее в §4.4.

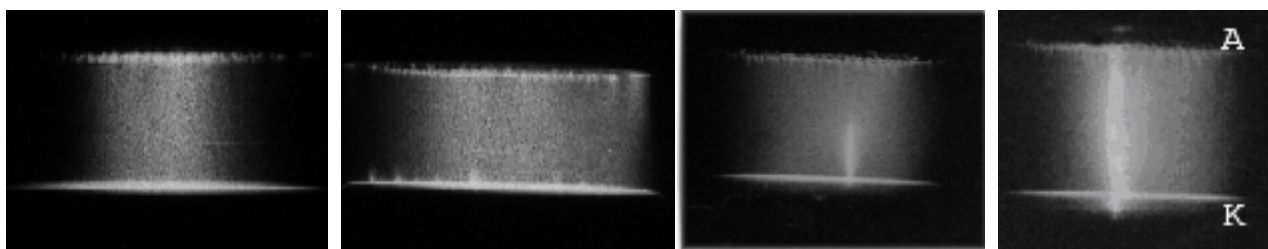


Рис.5 а. Интегральные картины свечения промежутка: 1 –  $U_0=4$  кВ; 2 – 6 кВ, 3 – 7 кВ; 4 – 10 кВ (He,  $d = 1$  см,  $p=1$  атм).

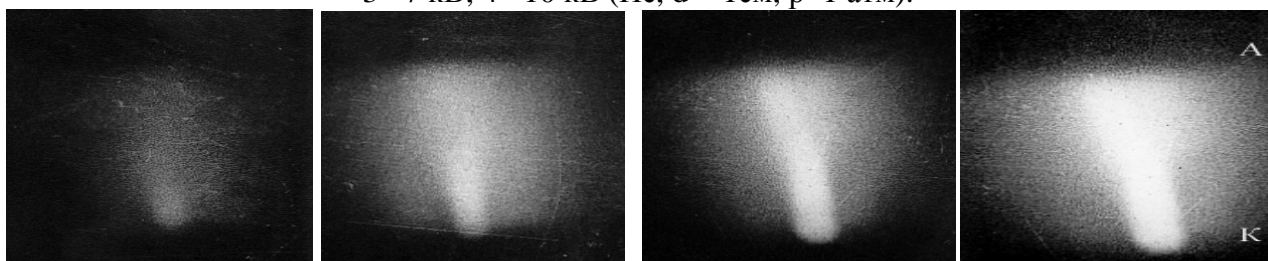


Рис.5 б. Покадровые картины формирования и прорастания искрового канала для величин  $U_0 = 9$  кВ,  $p=3$  атм,  $d=1$  см.

В §4.3 обсуждаются результаты спектроскопических исследований из объема плазмы. Наиболее интенсивные спектральные линии гелия, возбуждаемые в разряде, представлены ниже в таблице.

He I, нм	667,8	587,6	501,6	492,2	447,1	388,9
He II, нм	468,6	320,3	273,6			

Установлено, что интенсивность свечения объемного разряда слабо зависит от величины внешнего поля. Атомарная линия HeI 587,6 нм имеет три характерных максимума (см. рис.6 а), а другие – два, например, линия HeI 501,6 нм. При этом первые максимумы линий повторяют соответствующие максимумы тока, а третий – рекомбинационный возникает в момент времени, когда напряжение на промежутке  $U_0$  упало до нуля, и связан только с процессами рекомбинации. Максимумы на интенсивностях спектральных линий в первую очередь говорят, что данная стадия разряда эффективно способствует заселению верхнего уровня HeI, соответствующего данному переходу. Как показывают результаты расчетов, первый максимум линии HeI (501,6 нм) обусловлен заселением уровня  $3^1P_1$  в процессе ударного электронного возбуждения с уровней  $1^1S_0$  и  $2^1S_0$ .

Второй максимум на спектральных линиях соответствует стадии перехода разряда в контрагированное состояние. Однако, с первым резким спадом напряжения на газоразрядном промежутке происходит спад электронной температуры, что приводит к резкому спаду эффективности заселения уровня  $3^1P_1$ . Вместе с этим увеличивается вклад процесса ступенчатого возбуждения ( $2^1S_0 \rightarrow 3^1P_1$ ). Однако, роль последнего процесса в заселении уровня  $3^1P_1$  незначительна, о чем говорит малая амплитуда второго максимума.

Линия HeI ( $\lambda=587,6$  нм) излучается при переходе  $3^3D_{123} - 2^3P_{012}$  и малое значение первого максимума на спектре (см. рис. 6 а) обусловлено тем, что заселение уровня  $3^3D_{123}$  происходит в процессе ударного электронного возбуждения с основного состояния  $1^1S_0$  и, как показывает эксперимент, является неэффективным. На стадии объемного горения, как уже выше

отмечалось, растет эффективность процесса ступенчатого возбуждения, на что указывает увеличение второго максимума для линии HeI ( $\lambda=587,6$  нм). Поскольку известно, что процессы рекомбинации молекулярных ионов  $\text{He}_2^+$  не обладают селективностью по отношению к заселению возбужденных состояний атомов гелия с одними и теми же главными квантовыми числами (в данном случае  $n=3$ ), то появление более интенсивного послесвечения на переходе HeI ( $3^3D_{123}-2^3P_{012}$ ) может быть связано с перемешиванием заселенностей уровней He ( $n=3$ ) медленными электронами и уровень  $3^3D_{123}$ , может играть роль акцептора энергии, т.к. значение коэффициента перемешивания медленными электронами для уровня He ( $3^3D_{123}$ ) является отрицательным.

В искровом канале интенсивность излучения спектральных линий возрастает. Возбуждаются достаточно интенсивно ионные линии гелия.

При расширении плазмы температура падает, и спектральные линии, соответствующие высоко возбужденным состояниям, исчезают. Максимум излучения наблюдается после обрыва импульса тока, когда полностью преобладают рекомбинационные процессы. Об этом свидетельствует длительное послесвечение линии HeII (468,6 нм) (см. рис.6 б), возможно, обусловленное рекомбинацией молекулярных ионов  $\text{He}_2^+$  и  $\text{He}_3^+$ .

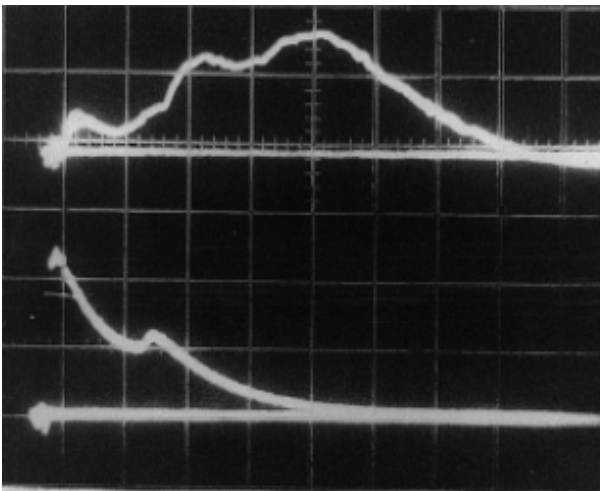


Рис.6а. Характерные временные зависимости интенсивности спектральной линии HeI 587,6 нм (верхний луч – в отн. ед.) и тока разряда (нижний луч – 30 А/дел) при начальных условиях:  $U_0=9$  кВ,  $d=1$  см,  $p=760$  Тор. Развертка – 1 мкс/дел.

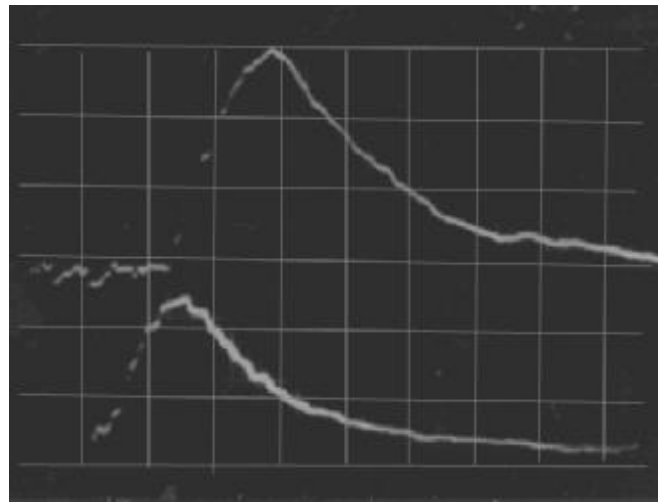


Рис.6 б. Осциллограммы разрядного тока (нижний луч – 200 А/дел) и интенсивности спектральной линии гелия HeII 468,6 нм (верхний луч – в отн. ед.). Развертка – 0,2 мкс/дел.

Одними из наиболее информативных методов, позволяющих получать информацию о прикатодных процессах, являются спектроскопические методы. Наличие в спектре прикатодной плазмы спектральных линий атомов и ионов материала электродов служит подтверждением возникновения катодных пятен и распыления материала электродов.

В §4.4 диссертации приведены исследования спектра излучения разряда как со стороны катода, так и анода для различных значений амплитуд

напряжения в диапазоне  $U_0 = (4-12)$  кВ. Были подробно изучены следующие интенсивные спектральные линии материалов электродов железа: Fe I  $\lambda = 364,5$  нм;  $\lambda = 344$  нм,  $\lambda = 341,3$  нм. Одновременная регистрация интенсивности излучения и импульса напряжения позволила определить момент возбуждения спектральных линий в разряде относительно момента приложения напряжения. В частности, показать, что при увеличении перенапряжения уменьшается время запаздывания формирования катодного пятна, обусловленное увеличением прикатодного падения потенциала и плотности тока разряда на катод, а также определить параметры взрывоэмиссионных центров.

В §4.5 обсуждаются результаты численного расчета механизма распространения искрового канала, которые находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными. По предложенной модели рассчитана скорость перекрытия разрядного промежутка искровым каналом, а также распределения напряженностей электрического поля внутри канала, в области фронта и вдали от фронта прорастающего искрового канала. Расчетами показано, что поле внутри канала меньше, чем поле на фронте канала на порядок, а мощность удельного энерговклада в канале в 3 раза выше, чем в столбе. Значение скорости распространения искрового канала по порядку величины составляет  $\approx 10^6$  см/с, что находится в хорошем согласии с результатами эксперимента.

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

1. Впервые в He экспериментально обнаружено явление ветвления катодонаправленного стримера в коротких сильноперенапряженных промежутках и дано качественное его обоснование. Экспериментально определены критические размеры стримера  $l_{кр}$ , при которых происходит ветвление и показано, что с ростом величины энерговклада в разряд уменьшается как критическая длина стримера, при которой происходит ветвление, так и время ветвления стримера. Теоретически рассчитан инкремент неустойчивости фронта ионизации на начальных стадиях стримерного пробоя, который показывает, что короткие стримеры устойчивы до тех пор, пока их длина не превышает обратной величины коэффициента Таунсенда.

2. Детально изучена кинетика образования заряженных и возбужденных частиц в плазме объемного разряда высокого давления и выяснена роль процессов диссоциативной рекомбинации с участием молекулярных комплексов  $He_2^+$  и  $He_3^+$  в общей кинетике развития разряда, которые являются преобладающими рекомбинационными процессами, обеспечивающие однородность и устойчивость объемного горения импульсного разряда.

3. Разработана двумерная численная модель, описывающая механизм формирования катодного слоя самостоятельного объемного разряда в гелии высокого давления, согласно которой формирование катодного слоя происходит в процессе движения одной катодонаправленной волны ионизации, и ее скорость определяется интенсивностью накопления

положительных ионов на фронте волны. Показано также, что неоднородность предыонизации газа и распределение поля приводят к тому, что максимальное искажение поля происходит на оси разрядного промежутка, приводящее к сужению катодонаправленной волны ионизации по мере ее продвижения к катоду.

4. Разработана физико-математическая модель прорастания искрового канала для объемных разрядов инертных газов атмосферного давления, в основу которой положена идея ионизационного размножения электронов фронта искрового канала и рассчитаны характерные распределения напряженности электрического поля в искре и показано, что скорость развития канала находится в удивительном согласии с результатами эксперимента и составляет  $10^6$  см/с.

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

1. *Ашурбеков Н.А., Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х.* Моделирование процесса формирования катодного слоя в самостоятельном объемном разряде в гелии. //Матер. II ВК по физической электронике. Махачкала, 2001. С.29-35.

2. *Курбанисмаилов В.С., Арсланбеков М.А., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х.* Спектр излучения объемного разряда в гелии атмосферного давления. //В сб.: Тез. докл. VIII Междун. конф. студентов и аспирантов. Москва, 2001.

3. *Курбанисмаилов В.С., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х.* Об устойчивости самостоятельного объемного разряда в гелии атмосферного давления. //В сб.: Тез. докл. VII Всероссийской конф. студ. физ. и молодых ученых. С.-Петербург, 2001. С.362-363.

4. *Курбанисмаилов В.С., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х.* Кинетические и оптические характеристики импульсных объемных разрядов. //В сб.: Материалы восьмой Всероссийской конференции студентов-физиков и молодых ученых. Москва, 2002. С.371-373.

5. *Курбанисмаилов В.С., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х.* Особенности формирования и устойчивости самостоятельного объемного разряда в гелии. //В сб.: Тез. докл. VIII Всероссийской конф. студ. физ. и молодых ученых. Екатеринбург, 2002. С.368-370.

6. *Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х.* Компьютерное моделирование нелинейных явлений нестационарной плазмы объемного разряда. //В сб.: Материалы Международной конференции по фазовым переходам и нелинейным явлениям. Махачкала, 2002. С.54-57.

7. *Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х.* Особенности спектров излучения самостоятельного объемного разряда в гелии. //Вестник ДГУ. 2002. Вып.2. С.34-38.

8. *Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х.* Кинетические процессы в самостоятельном объемном разряде. //Матер. III Всероссийской конференции по физической электронике. Махачкала, 2003. С.155-161.



9. Курбанисмаилов В.С., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х., Алимагомедов Я.А. Энергетические характеристики объемного разряда в гелии высокого давления. //В сб.: Тез. докл. X- Международной конф. студентов и аспирантов по фундаментальным наукам. Москва, 2003.

10. Курбанисмаилов В.С., Арсланбеков М.А., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х. Спектр излучения паров материала электродов в импульсном разряде гелия. //В сб.: Тез. Докл. X- Международной конф. студентов и аспирантов по фундаментальным наукам. Москва, 2003.

11. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х. Формирование и режим стационарного горения объемного разряда в гелии. //Матер. III Всероссийской конф. по физической электронике. Махачкала, 2003. С.161-165.

12. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Кадиева П.Г., Гаджиев М.Х. Особенности прорастания искрового канала в объемном разряде гелия. //Матер. III Всероссийской конф. по физической электронике. Махачкала, 2003. С.165-171.

13. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Кадиева П.Г., Гаджиев М.Х. Особенности развития разряда в парогазовой смеси гелия высокого давления. //Матер. III Всероссийской конф. по физической электронике. Махачкала, 2003. С.171-177.

14. Курбанисмаилов В.С., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х. Кинетика формирования оптического излучения объемного разряда в парогазовой смеси гелия. //В сб.: Тез. Докл. IX Всероссийской конф. студ. физ. и молодых ученых. Красноярск, 2003.

15. Курбанисмаилов В.С., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х. Электродинамические характеристики импульсного разряда с предыонизацией. //В сб.: Тез. докл. IX Всероссийской конф. студ. физ. и молодых ученых. Красноярск, 2003.

16. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Ашурбеков Н.А., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х. Импульсный разряд в парогазовых смесях гелия высокого давления. //В сб.: Тез. докл. XXX Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2003. С.214.

17. Kurbanismailov V.S., Omarov O.A., Ashurbekov N.A., Ragimkhanov G.B., Gadzhiev V.S. Special features of formation of vapor radiation spectrum of electrode material in the volumetric helium discharge. //VI International Conference Atomic and Molecular Pulsed Lasers AMPL-2003 Tomsk, Russia, 2003.

18. Omarov O.A., Ashurbekov N.A., Kurbanismailov V.S., Ragimkhanov G.B., Gadzhiev M.H. The pulse discharge in the steam-to-gas mixes of high pressure helium. //Prosp. FPPT-4. Minsk. 2004.

19. Ашурбеков Н.А., Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х. Кинетика формирования оптического излучения в импульсном разряде гелия атмосферного давления. //Материалы Всероссийской конф. по физике низкотемпературной плазмы. Петрозаводск, 2004.

20. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х. Моделирование процесса формирования волны ионизации в гелии атмосферного давления. //В сб.: Материалы Международной конференции по фазовым переходам и нелинейным явления. Махачкала, 2004. С.76-79.

21. Ашурбеков Н.А., Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х. Ионизационно-рекомбинационные процессы в плазме импульсного объемного разряда в гелии. //В сб.: Тез. докл. XXXI Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2004. С.269.

22. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Ашурбеков Н.А., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х. Импульсный разряд в парогазовых смесях гелия высокого давления. //Прикладная физика. 2004. №3. С.41-46.

23. Ашурбеков Н.А., Омаров О.А., Курбанисмаилов В.С., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х. Формирование и устойчивость ОР в парогазовой смеси гелия высокого давления. //Вестник ДГУ. 2005. С.58-73.

24. Ашурбеков Н.А., Омаров О.А., Курбанисмаилов В.С., Гаджиев М.Х., Рагимханов Г.Б. Расчет ФРЭЭ в плазме объемного разряда в гелии. //В сб.: Тез. докл. XXXI Всер. конф. по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2005.

25. Гаджиев М.Х., Курбанисмаилов М.В., Рагимханов Г.Б. Заселение возбужденных состояний атомов гелия в процессе формирования волны ионизации //В сб.: Тез. докл. ВНКСФ-11. Екатеринбург, 2005. С.185-186.

26. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Ашурбеков Н.А., Гаджиев М.Х., Рагимханов Г.Б., Кадиева П.Г. Численное моделирование процесса развития катодной неустойчивости в наносекундном разряде в гелии. //В сб.: Материалы Международной конференции по фазовым переходам и нелинейным явления. Махачкала, 2005. С.52-55.

27. Гаджиев М.Х., Курбанисмаилов М.В., Рагимханов Г.Б. Расчеты ионного состава плазмы объемного разряда в гелии. //В сб.: Тез. докл. ВНКСФ-12. Новосибирск. 2006. С.343-344.

28. Ашурбеков Н.А., Абдурагимов Э.И., Омаров О.А., Курбанисмаилов В.С., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х. Двумерное моделирование процесса формирования объемного разряда в гелии атмосферного давления. //В сб.: Тез. Докл. XXXIII Всер. конф. по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2006.

29. Омаров О.А., Курбанисмаилов В.С., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х., Баурханова М.Г. Неустойчивость фронта волны ионизации на начальных стадиях стримерного пробоя. //Матер. IV Всероссийской конф. по физической электронике. Махачкала, 2006. С.64-67.

30. Омаров О.А., Курбанисмаилов В.С., Кадиева П.Г., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х., Курбанисмаилов М.В. Образование молекулярных комплексов в плазме объемного разряда гелия. //Матер. IV Всероссийской конф. по физической электронике. Махачкала, 2006. С.51-54.

31. Омаров О.А., Ашурбеков Н.А., Курбанисмаилов В.С., Рагимханов Г.Б., Гаджиев М.Х. Формирование и развитие искрового канала в инертных газах атмосферного давления. //Изв. вузов. Сев. – Кав. регион. Естеств. науки. 2006. №4.

Подписано к печати 22.11.2006. Печать офсетная.  
Формат бумаги 60x84 1/16. Заказ 514. Тираж 100 экз.

Издательско-полиграфический центр ДГУ  
Махачкала, ул. М. Ярагского, 59-а.