

УДК 537.523

На правах рукописи



Балданов Баир Батоевич

**ИСТОЧНИКИ НЕРАВНОВЕСНОЙ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЫ
НА ОСНОВЕ СЛАБОТОЧНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РАЗРЯДОВ**

01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2017 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФМ СО РАН)

Научный консультант:

Семенов Александр Петрович, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Гаврилов Николай Васильевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией пучков частиц, г. Екатеринбург

Королев Юрий Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией низкотемпературной плазмы, г. Томск

Бардаханов Сергей Прокопьевич, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник, г. Новосибирск

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Национальный исследовательский Томский политехнический университет**», г. Томск

Защита состоится «11» октября 2017 г. В 15 часов 30 мин на заседании диссертационного совета Д 212.268.04 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», 634050, г. Томск, пр. Ленина 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146, а также на официальном сайте ТУСУР <https://tusur.ru/urls/pvzbv3lj>

Автореферат разослан « ___ » 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., профессор

Ю.П. Акулиничев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы и степень ее разработанности. В последние годы наблюдается значительный научный и практический интерес к разработке новых источников низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы атмосферного давления, связанный с открывающимися новыми возможностями применения аргоновой плазмы в медицинской технике. Несмотря на широкий ряд источников низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы атмосферного давления, многие из которых обладают комплексом уникальных параметров, потребность в улучшении эксплуатационных характеристик обуславливает необходимость их дальнейшего совершенствования. Между тем возможности их дальнейшего совершенствования в результате оптимизации конструкции и рабочих параметров далеко не исчерпаны [1,2].

Физические принципы создания и пути технической реализации принципиально новых типов источников низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы могут рассматриваться как одна из альтернатив существующим источникам. Основой для разработки источников являются слаботочные формы высоковольтных разрядов атмосферного давления (коронный, тлеющий разряды и различные типы неравновесных плазменных струй) [3]. Данные типы разрядов позволяют работать при низких плотностях мощности, в отличие от импульсных, ВЧ и СВЧ-разрядов, где газ возбуждается намного более интенсивно, и следовательно, требуются значительные скорости потока газа для отвода тепла.

Одним из эффективных способов генерации низкотемпературной неравновесной плазмы является тлеющий разряд атмосферного давления на основе коронного разряда. Основными преимуществами разряда в сравнении с разрядом с диэлектрическим барьером и коронным разрядом являются: высокая объемная однородность горения, экономичность, возможность масштабирования конструкции в широких пределах. Для реализации тлеющего разряда необходимо использование специальных мер стабилизации отрицательной короны, при этом удается существенно отодвинуть токовую границу появления искрового разряда, и в токовой области между известными формами разряда – коронным и искровым – возникает новый вид разряда: диффузный тлеющий разряд при атмосферном давлении, создающий стационарную и однородную неравновесную плазму по всему объему межэлектродного промежутка. Начальной стадией развития тлеющего разряда атмосферного давления является отрицательный коронный разряд, и, несмотря на длительный период изучения разряда, до сих пор неясна физическая сущность многих процессов, определяющих его развитие. В частности, отличительным свойством отрицательной короны является ее способность к самоупорядочению происходящих в ней процессов, так называемых импульсов Тричела. К настоящему времени обнаружено существование импульсно-периодического режима отрицательной короны в электроположительных газах в N_2 [4], Ar [5], в широкой области экспериментальных параметров, хотя существует мнение, что импульсно-периодический режим в указанных газах отсутствует [6].

Особый интерес источники низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы представляют для практической медицины [7]. Установлено, что воздействие неравновесной аргоновой плазмы является одним из эффективных и перспективных подходов, обеспечивающих, в частности, активацию иммунного ответа и процессов стерилизации при низких температурах и заживления, уменьшения микробного обсеменения инфицированных ран и язв. Их используют *in vivo* для обеззараживания без инициации новых полирезистентных штаммов, для лечения бактериальных, грибковых и вирусных воспалений кожи. Однако существующие современные отечественные и зарубежные установки на основе аргоновых плазменных струй, с температурой плазмы на выходе около $(3-4) \cdot 10^3$ °С и диаметром плазменной струи 1,5-2 мм не позволяют эффективно обрабатывать обширные поверхности термочувствительных объектов. В связи с вышесказанным требуется принципиально новый подход к способам генерации аргоновой плазмы на основе плазменных струй.

Поэтому тематика исследований, направленная на разработку источников неравновесной (холодной) аргоновой плазмы атмосферного давления на основе слаботочных высоковольтных разрядов с высокой производительностью, простотой конструкции, эффективностью и надежностью, с возрастающей потребностью в новых инновационных биомедицинских технологиях, является **актуальной**.

Цель работы состоит в разработке, создании и исследовании источников низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы на основе слаботочных форм высоковольтных разрядов атмосферного давления и создании на их основе эффективных экологически чистых технологий стерилизационной и обеззараживающей обработки.

Основными задачами настоящей диссертационной работы являются:

- исследование газоразрядных систем на основе слаботочных форм высоковольтных разрядов, формируемых в аргоне при атмосферном давлении, выявление условий устойчивого горения таких разрядов в области высокого (атмосферного) давления и высоких напряжений, прикладываемых к разрядному промежутку;
- оптимизация конфигурации газоразрядных систем и их рабочих параметров для генерации однородной объемной неравновесной плазмы на обширной поверхности, обеспечения устойчивого функционирования разрядов при атмосферном давлении;
- разработка и реализация плазменного оборудования и приборов на основе слаботочных форм высоковольтных разрядов и демонстрация возможностей их эффективного применения для создания технологий стерилизационной и обеззараживающей обработки.

Научная новизна:

1. Экспериментально обнаружен и реализован импульсно-периодический режим (импульсы Тричела) отрицательного коронного разряда постоянного напряжения в электроположительном газе – аргоне. Проведены

исследования токовой области существования и амплитудно-частотных характеристик импульсно-периодического режима в потоке аргона.

2. Экспериментально реализован переход отрицательной короны в аргоне при атмосферном давлении в режим стационарного разряда без импульсов тока, как тлеющий разряд атмосферного давления. Изучена эволюция пространственной структуры и электрических характеристик отрицательной короны при ее переходе в режим тлеющего разряда.

3. Инициирован стационарный тлеющий разряд атмосферного давления в аргоне в конфигурации электродной системы многоострый катод – плоский анод. Проведенные экспериментальные исследования продемонстрировали, что стационарная сильнонеравновесная плазма однородно заполняет весь межэлектродный промежуток.

4. Показано, что характер протекания тока в плазменном канале слабotoчного искрового разряда представляет собой установившуюся последовательность токовых импульсов. Обнаружено, что наряду с низкочастотными импульсами тока слабotoчного искрового разряда генерируются и высокочастотные пульсации тока с длительностью, лежащей в наносекундном диапазоне.

5. Экспериментально реализована нестационарная форма диффузного разряда типа тлеющего разряда, на который накладываются слабotoчные искровые разряды. Вольтамперная характеристика разряда является падающей, а характер протекания тока в разрядном промежутке представляет собой установившийся режим периодических импульсов тока.

6. Показана высокая эффективность бактерицидного действия источников низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы на основе слабotoчных форм высоковольтных разрядов атмосферного давления. Изучение выживаемости бактерий в неравновесной аргоновой плазме генерируемой разрядами показало, что полная инактивация микроорганизмов наблюдается в секундном интервале обработки.

Практическая значимость:

1. Получены результаты, способствующие выявлению физических особенностей формирования и развития электрических разрядов в потоке газа и построению полной физической модели таких разрядов.

2. Результаты исследований режимов генерации и характеристик тлеющего разряда атмосферного давления, возбуждаемого в аргоне, являются научной базой при выработке рекомендаций по разработке, конструированию и созданию новых технологий стерилизации и обеззараживания с высокой эффективностью и малым временем обработки объектов. Разработанные плазменные установки позволяют масштабировать и интегрировать устройства стерилизации в различные промышленные и бытовые объекты (стерилизатор медицинского назначения, сфера услуг, бытовые приборы, биотехнология, микроэлектроника, пищевая промышленность и т.д.). Низкотемпературный характер плазмы разряда позволяет стерилизовать любые термочувствительные материалы, широко используемые в различных областях науки и техники.

3. На основе нестационарной формы разряда – типа тлеющего, на который накладываются слаботочные искровые разряды, создан высокоэффективный портативный источник низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы PortPlaSter для дезинфекции открытых ран, в том числе хронических незаживающих ран. Важнейшим преимуществом данного метода является то, что поток плазмы можно нацелить на зараженный участок тела, не воздействуя на здоровые области, чего нельзя достичь с помощью антибиотиков.

4. Основные результаты диссертационной работы, направленные на разработку, создание и практическое применение плазменных источников на основе слаботочных форм высоковольтных разрядов, используются в научно-исследовательских работах и внедрены в учебный процесс, на кафедре «биотехнология» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» (ФГБОУ ВО ВСГУТУ), в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте общей и экспериментальной биологии Сибирского отделения Российской академии наук (ИОЭБ СО РАН), в Медицинском институте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Бурятский государственный университет» (ФГБОУ ВО БГУ). Представленные в работе плазменные источники используются при проведении научно-исследовательских работ в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Бурятский научно-исследовательский институт сельского хозяйства» (БНИИСХ).

Методология и методы исследования. Методология проведенных исследований опирается на комплексное применение общенаучных и специальных методов, среди которых доминирующую роль занимают экспериментальные. В диссертационной работе использованы широко известные и многократно апробированные экспериментальные методики и оборудование для исследования протекающих электрофизических и плазменных процессов, адаптированные и доработанные с учетом поставленных задач и возможностей аппаратуры.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности Полученные соискателем основные научные результаты соответствуют пункту 5 «Плазменная электроника, включая физические процессы в плазменных электронных приборах: СВЧ-генераторах, усилителях, плазменных (коллективных) ускорителях, плазменно-пучковых разрядах» и пункту 6 «Изучение физических основ плазменных и лучевых (пучковых) технологий, в том числе модификации свойств поверхности, нанесение тонких пленок и пленочных структур» паспорта специальности 01.04.04 – «физическая электроника».

Научные положения, выносимые на защиту:

1. В импульсно-периодическом режиме отрицательного коронного разряда в электроположительном газе – аргоне, в электродной системе острие-плоскость, импульсы тока носят регулярный характер, длительность импульсов тока лежит в миллисекундном диапазоне.

2. Использование специальных мер стабилизации (газодинамический поток, балластное сопротивление) отрицательной короны отодвигает токовую границу возникновения искрового пробоя, и в токовой области между известными формами разряда – коронным и искровым – возникает новый вид разряда: диффузный тлеющий разряд при атмосферном давлении.

3. Стационарный тлеющий разряд атмосферного давления в аргоне реализован в электродной системе многоострыйный катод-плоскость при непрерывном переходе из режима диффузной отрицательной короны. При переходе происходит полная перестройка пространственной структуры отрицательной короны, приводящая к заполнению разрядного промежутка плазмой.

4. При ограничении разрядного тока балластным сопротивлением большой величины (>1 МОм) реализуется особая форма нестационарного разряда – слаботочный искровой разряд. Вольтамперная характеристика разряда является падающей, а характер протекания тока в тонком плазменном канале искрового разряда представляет собой установившуюся последовательность токовых импульсов.

5. Нестационарный разряд, реализованный на основе диффузной формы тлеющего разряда, на который накладываются слаботочные искровые разряды, обеспечивает получение объемной низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы на обширной поверхности. Данный тип разряда формируется в потоке газа в виде плазменных струй атмосферного давления.

6. Полная инактивация микроорганизмов с помощью источников низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы на основе слаботочных высоковольтных разрядов наблюдается при кратковременном (секундном интервале) воздействии плазмы на микроорганизмы. Полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности микроорганизмов к воздействию неравновесной аргоновой плазмы.

Обоснованность и достоверность результатов основана на систематическом и комплексном применении различных методов исследований и сопоставлении полученных данных, практической реализации научных положений, многократном проведении и повторении тестовых испытаний, сравнением результатов, получаемых различными способами, сопоставлением с имеющимися экспериментальными и расчетными результатами других исследователей. В целом полученные экспериментальные данные создают единую физическую картину исследуемых процессов.

Апробация результатов работы:

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, совещаниях и симпозиумах: III Международной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах» (Томск, 2002, 2004); Всероссийской конференции с международным участием «Научные чтения, посвященные 70-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР М.В. Мохосоева» (Улан-Удэ, 2002); II Международной научно-практической конференции «Энергосберегающие и

природоохранные технологии» (Улан-Удэ, 2003); Международном симпозиуме «Высокочистые металлические и полупроводниковые материалы» (Украина, Харьков, 2003); 9 Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (Екатеринбург-Красноярск, 2003); 30 International Conference ICOPS 2003 (Korea, Issue, 2003); III Международной научно-практической конференции «Энергосберегающие и природоохранные технологии» (встреча на Байкале), посвященной памяти академика РАН М.Ф. Жукова (Улан-Удэ, 2005); III конференции по фундаментальным и прикладным проблемам физики (Улан-Удэ, 2005); II Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт-Петербург, 2006, 2009); Всероссийской научно-технической конференции «Современные инновационные технологии и оборудование» (Москва-Тула, 2006); Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2007, 2008); Всероссийской конференции по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-2008 (Петрозаводск, 2007); V Международном симпозиуме по теоретической и прикладной плазмохимии (Иваново, 2008); Международном Крейнделевском семинаре «Плазменная эмиссионная электроника» (Улан-Удэ, 2009, 2015); VI International Conference «Plasma Physics and Plasma Technology» (Minsk, Belarus, 2009); Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы – 2011» (Петрозаводск, 2011); 25 Symposium on Plasma Physics and Technology (SPPT 2012) (Prague, Czech Republic, 2012); Международной конференции «Плазменные технологии исследования, модификации и получения материалов различной физической природы» (Казань, 2012); Всероссийской конференции «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине» (Новосибирск, 2013, 2015); Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Физикохимия процессов переработки полимеров» (Иваново, 2013); Всероссийской конференции (с международным участием) «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2014 (Казань, 2014); International Conference on Biomedical Engineering and Computational Technologies (SIBIRCON 2015), (Novosibirsk, 2015), на научных семинарах ИФМ СО РАН, общеинститутском семинаре «Теоретическая и прикладная механика» ИТПМ СО РАН (2004, 2015), научном семинаре НГТУ (2016).

Публикации. Основные результаты изложены в 58 публикациях, в том числе 28 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ.

Личный вклад автора. Для получения представленных в диссертационной работе результатов автор внес определяющий вклад в постановку задач исследований, разработку основных конструктивных решений, анализ полученных результатов. Автором лично выдвинуты основные идеи исследований, спланированы и проведены эксперименты, сделано большинство оценок, проанализированы и осмыслены полученные данные, сформулированы положения, выносимые на защиту. Другие соавторы, принимавшие участие в исследованиях и разработках по отдельным направлениям, указаны в списке

работ по теме диссертации. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

Диссертационная работа выполнена в рамках:

Проектов фундаментальных исследований СО РАН:

- проект № 2.7.2.2 «Плазменные эмиссионные процессы в газоразрядных электронных и ионных устройствах и их применение в новых технологиях» (2007-2009);

- проект № П.12.2.3 «Плазменные процессы в газоразрядных системах низкого и высокого (атмосферного) давления и их применение в новых технологиях» (2010-2012);

Государственного задания ФАНО России:

- тема (проект) № 0336-2014-0002 «№ 9.3.2 Релаксационные свойства наноструктурированных конденсированных сред и электро-, теплофизические свойства углеродных наноматериалов и композитов» (2013-2016);

Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН:

- проект № 156 «Фундаментальные проблемы технологии получения кремния солнечного качества и создания высокоэффективных солнечных элементов» (2003-2005);

Заказных проектов Министерства образования и науки Российской Федерации:

- проект № 1.5.02 «Исследование плазменных и плазмоподобных сред для определения свойств растворов и разработки новых технологий получения монооксида кремния» (2002-2005);

- проект № 1.5.06 «Фундаментальные процессы в газовых разрядах» (2005-2007);

Российского фонда фундаментальных исследований:

- проект № 15-44-04209-р_сибирь_a.

Объем и структура диссертации. Работа изложена на 239 страницах печатного текста и состоит из введения, 6 глав, заключения, содержит 4 таблицы, 115 рисунков. Список литературы включает 320 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и определены задачи исследования, показаны новизна, научная и практическая значимость работы, изложены основные выносимые на защиту положения, приведены сведения об апробации работы и публикациях.

В первой главе проведен критический анализ результатов экспериментальных и теоретических работ в области физики и техники импульсных разрядов в газах. Описаны основные принципиальные конструктивные решения, используемые в экспериментальных установках и приборах для генерации низкотемпературной неравновесной плазмы атмосферного давления, применительно к инактивации микроорганизмов. Отмечено, что большую проблему представляет оценка результатов плазменной инактивации микроорганизмов, полученных в различных экспериментальных условиях. Существующие трактовки результатов исследований в ряде случаев

противоречивы. Поэтому довольно сложно адаптировать выводы, полученные для одной специальной экспериментальной установки относительно другой, при использовании одного и того же типа разряда. Обстоятельно рассмотрено применение низкотемпературной «холодной» плазмы при атмосферном давлении как антибактериального агента с выделением признаков достоинства – отсутствие высокотоксических веществ пролонгированного действия, малая вероятность развития спонтанной устойчивости к низкотемпературной плазме у микроорганизмов. Проанализирована, во-первых, высокая чувствительность микроорганизмов к слабым воздействиям плазменных потоков. Во-вторых, наработка активных частиц плазменными потоками сильно зависит от свойств окружающей среды. Так, трудно воспроизвести результаты, полученные в воздушной плазме, не зная влажности, давления и температуры воздушной среды. Кроме того, взаимодействие плазменных струй и микроорганизмов существенно зависит от типа разряда и условий, в которых проводится эксперимент.

На основании анализа литературных данных обоснованы цель и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** излагаются результаты систематических исследований импульсно-периодического режима отрицательного коронного разряда постоянного напряжения в конфигурации электродов острие-плоскость.

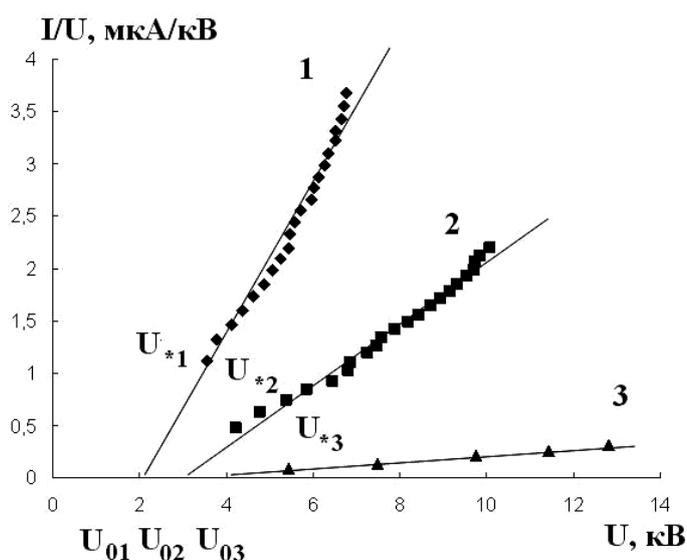


Рисунок 1 – Редуцированная вольтамперная характеристика отрицательной короны. Межэлектродное расстояние d : 1 – $d = 1$ см, 2 – $d = 3$ см, 3 – $d = 6$ см

обычно определяется экспериментально из пересечения прямой приведенного тока I/U с осью напряжений (в литературе зависимость I/U от U называют редуцированной вольтамперной характеристикой). В атмосфере аргона, начальное напряжение U_0 при котором прямая I/U пересекается с осью

Отрицательная корона реализуется путем подачи постоянного напряжения U на электродную систему острие-плоскость до некоторого критического значения напряжения – напряжения зажигания U_* . Визуальная картина свечения отрицательной короны в импульсно-периодическом режиме качественно соответствует общепринятому определению коронного разряда, и характеризуется слабовыраженным свечением генерационной зоны, которая располагается вблизи острия, при этом дрейфовая область остается практически темной.

В экспериментальной практике начальное напряжение U_0 отрицательной короны в воздухе

напряжений, не совпадает с напряжением зажигания U_* отрицательной короны $U_0 < U_*$ (Рисунок 1).

Из осциллограмм тока на рисунке 2 следует, что отрицательная корона зажигается в импульсно-периодическом режиме при небольших значениях среднего тока короны и характеризуется обнаруженной установившейся последовательностью токовых импульсов. Импульсы тока отрицательной короны

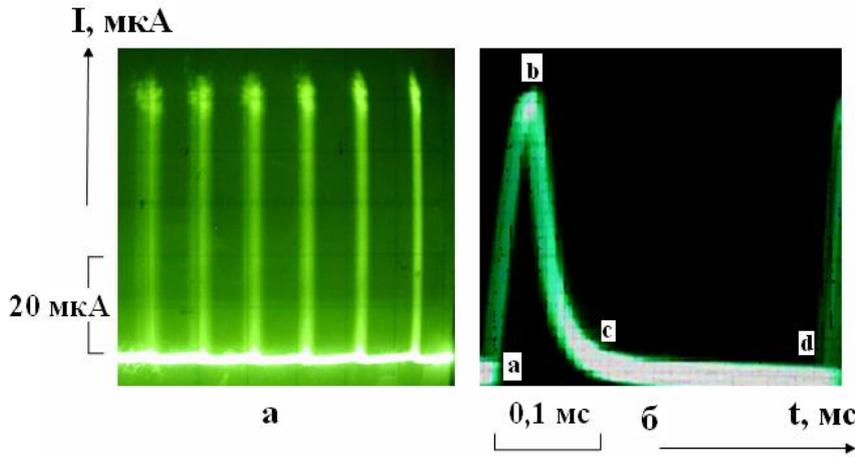


Рисунок 2 – Импульсно-периодический режим отрицательной короны в аргоне: а) регулярные импульсы тока; б) отдельный импульс тока. $[t] = 0,1$ мс/дел, $[I] = 20$ мкА/дел

короны можно продемонстрировать на основе формирования и развития одиночной электронной лавины.

$$n_e = n_{e0} e^{\nu_i t} \quad (1)$$

где n_{e0} – начальное количество электронов; ν_i – частота ионизации.

Для того чтобы электронная лавина началась с $n_{e0} = 1 \text{ см}^{-3}$, до равновесной плотности $n_e \approx 7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ она доросла бы за время $t = 1/\nu_i \ln(n_e/n_{e0}) \approx 0,27 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, т.е. время, за которое медленный электрон набирает в поле среднюю энергию ε , так как при одном упругом столкновении он теряет δ от нее. С другой стороны, t характеризует время установления энергии в данном поле (время релаксации для энергии). В рамках данного предположения, сопоставление времени релаксации $t \approx 0,27 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ и периода $T \approx 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ импульсов тока (импульсов Тричела) показывает удовлетворительное согласие: $t \approx T$. За время релаксации t электроны сдвигаются вследствие дрейфа на расстояние $\Lambda = v_e t \approx 0,8l/\sqrt{\delta} \approx 10^{-3} \text{ м}$, где $l = 1/N\sigma_e \approx 10^{-6} \text{ м}$ – длина свободного пробега электронов; v_e – скорость дрейфа; Λ – длина релаксации энергии. Средняя энергия ε которую электрон приобретает, пройдя разность потенциалов на длине Λ равна $\varepsilon = e E \Lambda \approx 100 \text{ эВ}$, где e – заряд электрона; $E \approx 10^3 \text{ В/см}$ – напряженность электрического поля.

За время дрейфа электронов до анода после распада плазмы $\tau_e = (d - \Lambda)/v_e \approx 10^{-6} \text{ с}$, где d – межэлектродный промежуток, выполняется условие роста тока разряда, т.е. ионизационное размножение вблизи острия превышает потери ионов, уходящих на катод. Образующийся вблизи острия положительный заряд на

имеют быстрый передний фронт ($\tau_f \approx 5,5 \text{ мкс}$) и общую длительность $\tau \approx 0,35 \text{ мс}$. Амплитуда импульсов тока составляет $\sim 50 \text{ мкА}$ и остается неизменной при различных напряжениях. Результаты исследований импульсно-периодического режима отрицательной короны в аргоне отражены в работе [2].

Качественную картину формирования импульса тока отрицательной

короны можно продемонстрировать на основе формирования и развития

этой стадии не влияет на распределение поля. Примерно за такое же время $\tau_i = \Lambda/v_i \approx 1,6 \cdot 10^{-6}$ с положительные ионы достигают катода. При этом накопление положительных зарядов происходит взрывным образом, а самосогласованная эволюция поля (усиление поля вблизи катода) и концентрации ионов (рост) имеет характер катодно-направленной волны ионизации со скоростью, превышающей скорость дрейфа ионов. Когда все электроны уходят на анод, идет гораздо более слабый и длительный ток, вызванный движением ионов. Величина тока, создаваемого лавиной, равна $I(t) = N_e(t) (e \cdot v_e/d) \sim 10^{-5}$ А, где $N_e(t) = (v_i/v_{da}) \cdot N_e$ – число электронов с учетом диффузионных потерь; $v_{da} = D_a/\Lambda_1^2 \approx 15,3 \cdot 10^6$ с⁻¹ – частота диффузионных потерь; $D_a \approx 5,23$ м²/с – коэффициент амбиполярной диффузии; $\Lambda_1 = R/2,4$ – характерная длина. Амплитуда импульса тока, наблюдаемая в эксперименте составляет $I \sim 10^{-5}$ А.

В третьей главе описаны результаты экспериментальных исследований перехода импульсно-периодического режима отрицательной короны в режим тлеющего разряда атмосферного давления.

На вольтамперной характеристике отрицательной короны (Рисунок 3) выделяются три режима формирования разряда, характеризующиеся своими пороговыми напряжениями и скоростями роста тока; начальный ток I_* , устанавливающийся скачком после зажигания разряда; минимальный ток $I_{\text{мин}}$, ниже которого разряд гаснет, и критический ток I^* , отделяющий импульсно-периодический режим отрицательной короны от режима тлеющего разряда атмосферного давления.

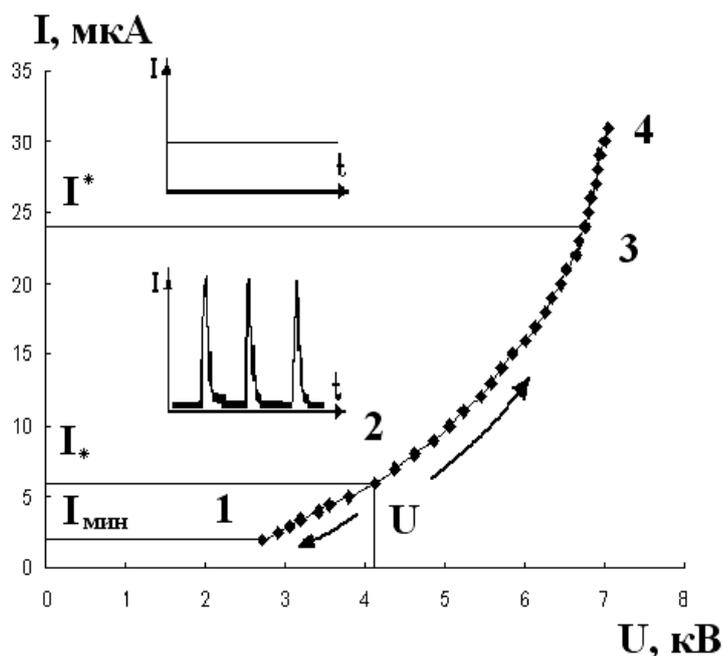


Рисунок 3 – Усредненная во времени вольтамперная характеристика отрицательной короны в аргоне. Межэлектродное расстояние $d = 1$ см, расход аргона $G = 4 \cdot 10^{-5}$ кг/с

Использование специальных мер стабилизации разряда (газодинамический поток, большое балластное сопротивление R_6) отодвигает токовую границу возникновения искрового пробоя и позволяет реализовать непрерывный переход импульсно-периодического режима отрицательной короны к стационарному разряду без импульсов тока, идентифицируемого в литературе как новый вид разряда – тлеющий разряд атмосферного давления (стадия 3-4).

На редуцированной вольтамперной характеристике разряда (Рисунок 4) выделяются два участка с приблизительно линейной зависимостью приведенного тока I/U от напряжения U – в импульсно-периодическом режиме отрицательной короны и в области больших токов, соответствующих режиму тлеющего разряда.

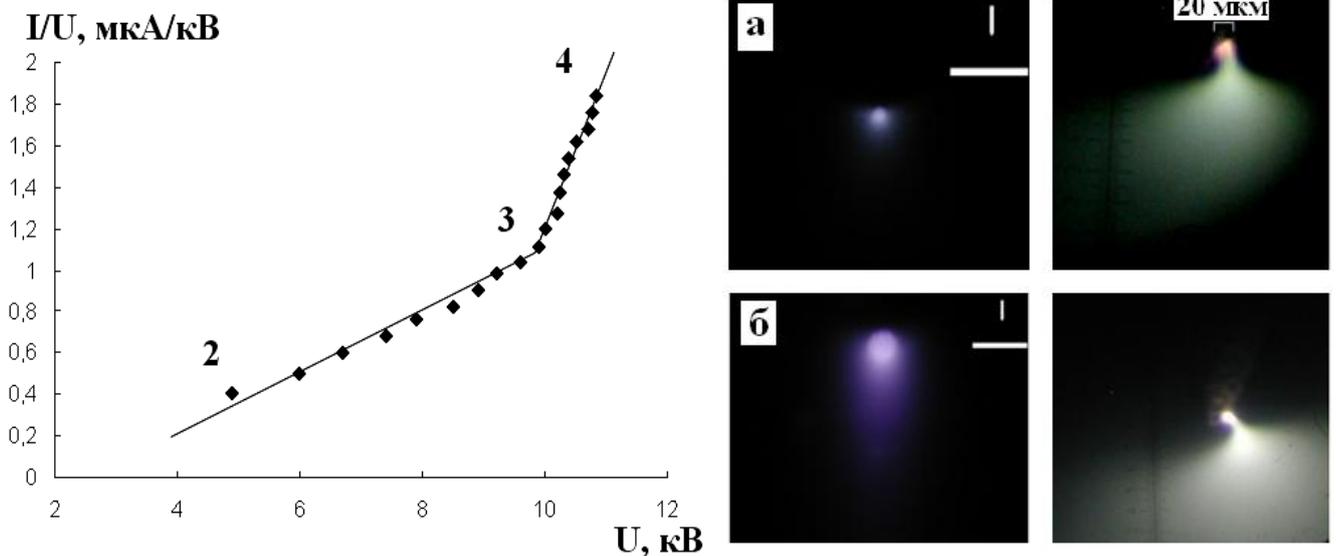


Рисунок 4 – Переход отрицательной короны в режим тлеющего разряда. а) фотография свечения отрицательной короны и увеличенного изображения прикатодной области отрицательной короны ($\times 60$); б) фотография свечения тлеющего разряда и увеличенного изображения катодного пятна в момент перехода отрицательной короны в режим тлеющего разряда

Визуальные наблюдения показывают, что при пороговом значении тока I^* (точка 3, на рисунке 4) происходит скачкообразная перестройка структуры разряда, заключающаяся в резком сужении коронирующего слоя в момент перехода, исчезновении импульсов тока, и появлением светящегося положительного столба между коронирующим слоем и плоскостью. В области токов $I \geq I^*$ поперечный размер стационарного катодного пятна ($\sim 7-8$ мкм) заметно меньше размера катодного пятна в импульсно-периодическом режиме отрицательной короны.

Экспериментально измеренная вольтамперная характеристика отрицательной короны аппроксимируется параболической зависимостью вида

$$I = kU(U - U_0) \cong \frac{\mu_i \varepsilon_0 S_a}{d^3} U(U - U_0) \quad (2)$$

где μ_i – подвижность ионов; ε_0 – электрическая постоянная; d – межэлектродный промежуток; U_0 – начальное напряжение; S_a – эффективная площадь токовой трубки на аноде.

В случае отрицательной короны в воздухе плотность тока на аноде монотонно падает от центра по закону Варбурга. Величина эффективного сечения токового канала отрицательной короны в воздухе оценивается как:

$$S_a \cong I / j_0 = \pi d^2 / j_0 \int j(\vartheta) d(\operatorname{tg} \vartheta)^2 \cong (2 \pm 0,2) d^2 (\text{мм}^2) \quad (3)$$

где I – полный ток разряда.

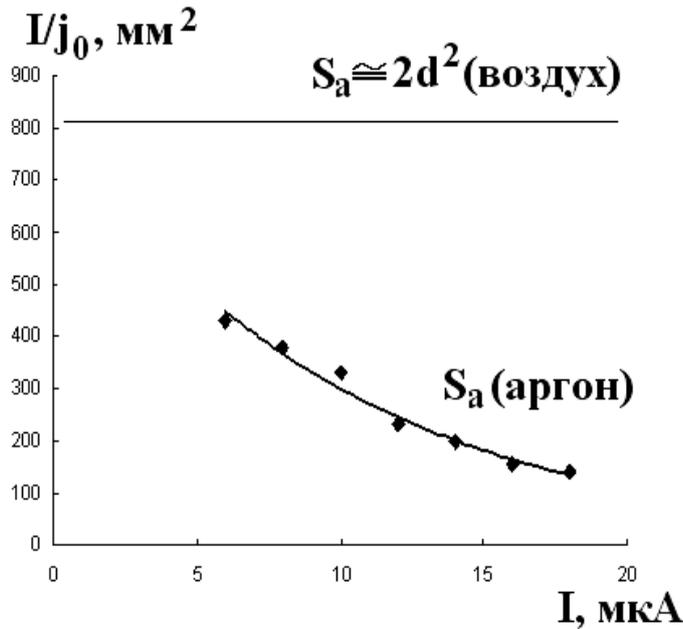


Рисунок 5 – Зависимость эффективного сечения S_a на аноде от полного тока I . Межэлектродное расстояние $d = 2$ см

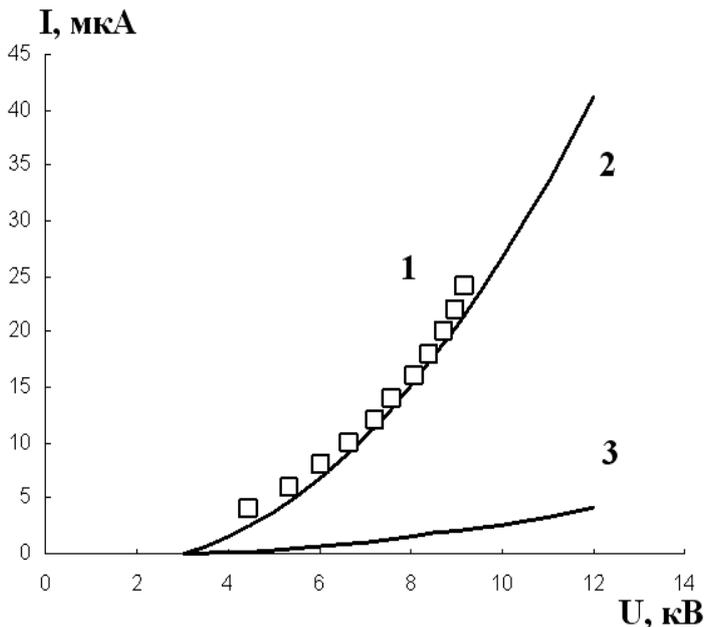


Рисунок 6 – Экспериментальная (1) и расчетные (2,3) ВАХ отрицательной короны

В случае атмосферы аргона токовое сечение S_a значительно меньше (\sim в 2 раза) эффективного сечения отрицательной короны, определяемого из распределения Варбурга (сплошная горизонтальная линия $S_a \approx 2d^2$ рисунок 5).

Совпадение расчетной ВАХ отрицательной короны (кривая 2, на рисунке 6) с экспериментально измеренной (кривая 1) достигается, если принять вместо общепринятой величины токового сечения $S_a \approx 2d^2$ (кривая 3), восстановленную из экспериментальных данных изменение величины площади S_a токовой трубки на аноде с ростом тока разряда.

Четвертая глава посвящена разработке и созданию источника низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы на основе тлеющего разряда атмосферного давления в электродной системе многоострый катод - плоский анод.

Многоострийная отрицательная корона в электродной системе однорядный острый катод - плоский анод зажигается в импульсно-периодическом режиме и характеризуется регулярными импульсами тока с длительностью, лежащей в миллисекундном диапазоне (Рисунок 7). В данном режиме горения разряда светятся лишь кончики острий, при этом свечение межэлектродного промежутка слабое.

Место излома на редуцированной вольтамперной характеристике отождествляется с началом перехода отрицательной короны в режим тлеющего разряда атмосферного давления (Рисунок 8). Как видно из рисунка 8, линейная зависимость I/U , соответствующая режиму отрицательной

короны, значительно сужается с уменьшением межэлектродного промежутка d .

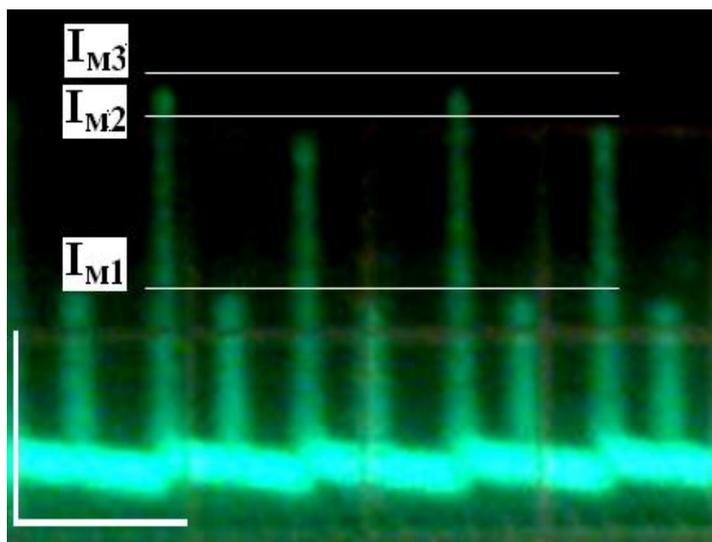


Рисунок 7 – Импульсы тока в электродной системе с тремя коронирующими острями. $[t] = 50$ мкс/дел, $[I] = 10$ мкА/дел

При уменьшении шага расположения коронирующих острий увеличивается общий ток отрицательной короны. Это связано с тем, что вследствие взаимной экранировки острий снижается напряженность поля в прикатодной области отрицательной короны, а объемная плотность заряда и электрическое поле в дрейфовой области отрицательной короны возрастают. Когда напряженность электрического поля в дрейфовой области коронного разряда становится достаточной для интенсивной ионизации газа, при критическом токе I^* импульсно-

периодический режим многоострийной отрицательной короны переходит в режим тлеющего разряда атмосферного давления.

Переход импульсно-периодического режима отрицательной короны в режим тлеющего разряда и тлеющего разряда в искровой разряд в электродной системе

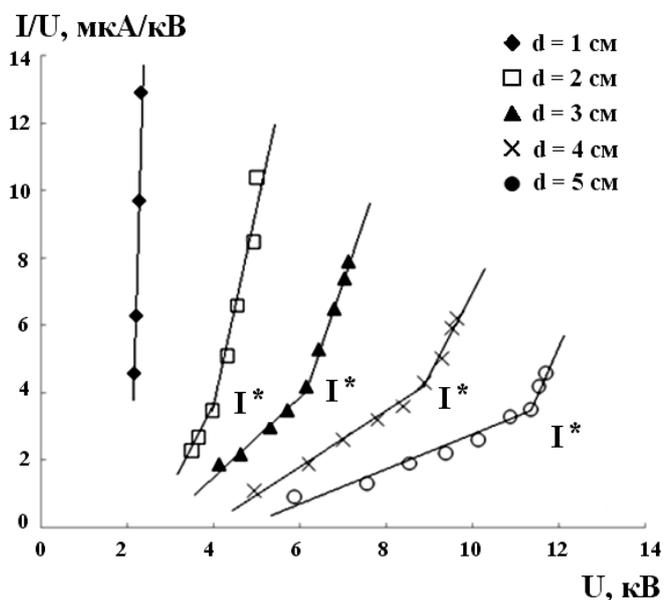


Рисунок 8 – Редуцированная вольтамперная характеристика. I^* – ток перехода отрицательной короны в режим ТРАД. Шаг расположения острий $s = 12$ мм; число острий – 5

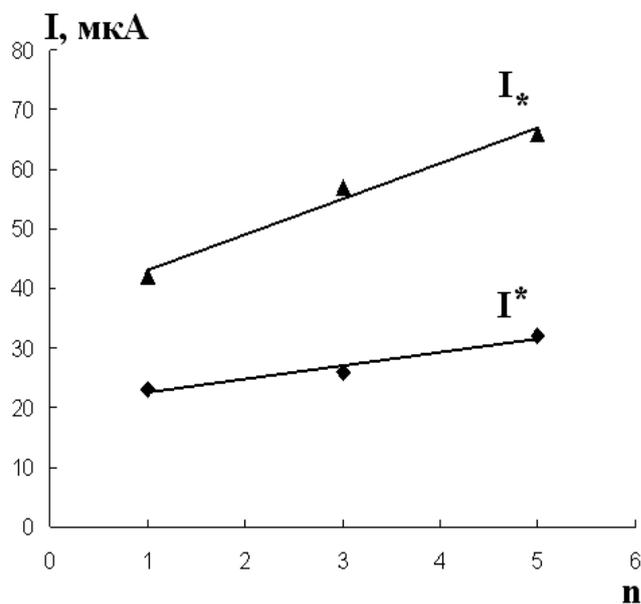


Рисунок 9 – Токковая область существования в зависимости от числа острий n . I^* – ток перехода импульсно-периодического режима отрицательной короны в режим тлеющего разряда; I_* – ток перехода в искровой разряд

однорядный острый катод - плоский анод происходит при значительно меньших значениях приведенного тока I_i по сравнению с отрицательной короной в конфигурации электродов острие-плоскость. Токовая область существования тлеющего разряда атмосферного давления существенно увеличивается с увеличением числа коронирующих острий (Рисунок 9).

Варьирование балластных сопротивлений R_6 на коронирующих остриях оказывает существенное влияние на параметры разряда. Динамика изменения тока острий с увеличением напряжения при различных значениях балластного сопротивления R_6 представлена на рисунке 10 (а-в). Однако данное поведение коронирующих острий в многоострийной отрицательной короне практически не влияет на форму ВАХ разряда.

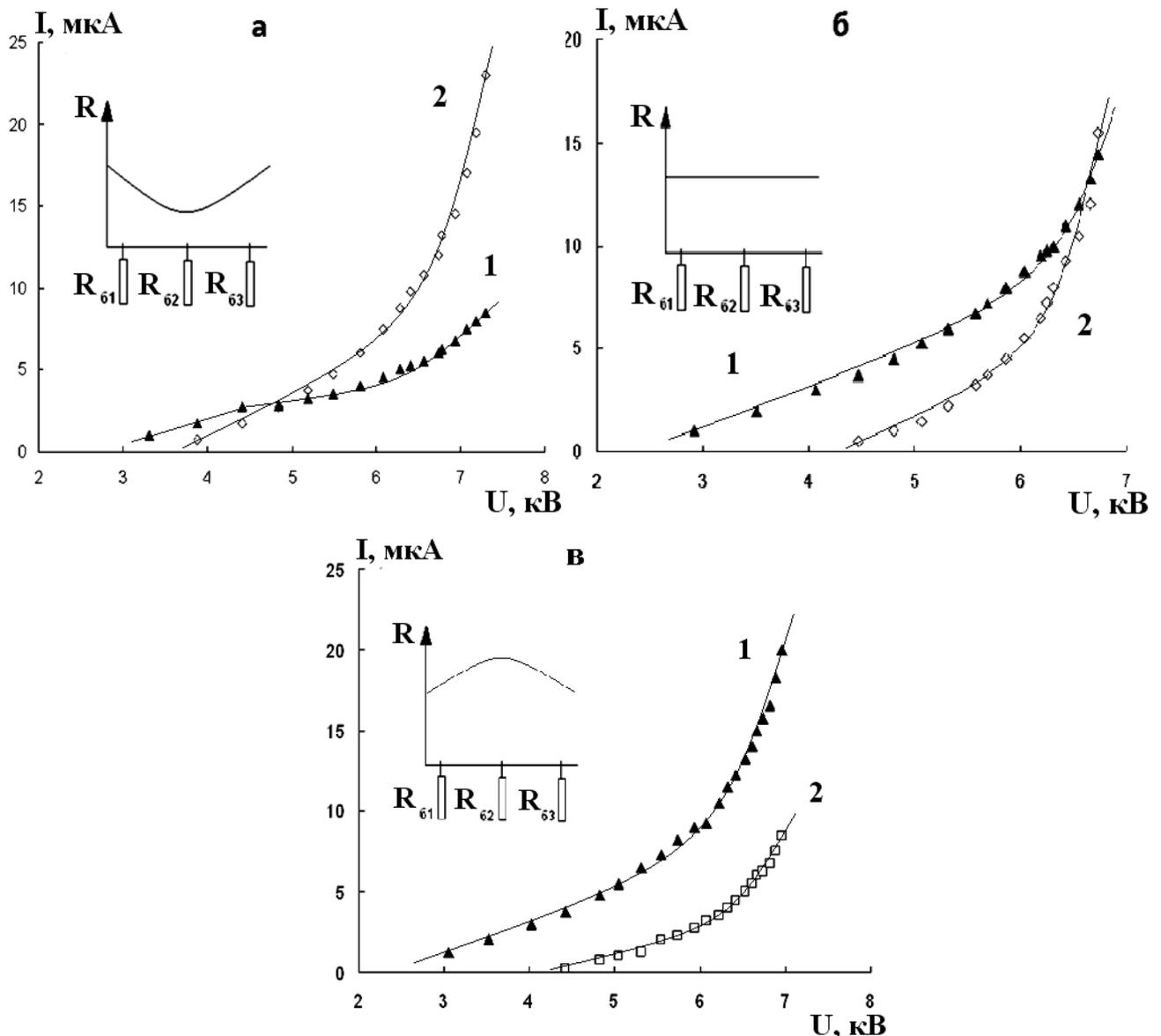


Рисунок 10 – Зависимость тока с центрального острия в зависимости от величины балластного сопротивления R_6 . а) 1 – $R_{61,3} = 85 \text{ MOhm}$; 2 – $R_{62} = 26 \text{ MOhm}$; б) 1 – $R_{61,3} = 31 \text{ MOhm}$; 2 – $R_{62} = 31 \text{ MOhm}$; в) 1 – $R_{61,3} = 26 \text{ MOhm}$; 2 – $R_{62} = 85 \text{ MOhm}$. Межэлектродное расстояние $d = 2 \text{ см}$; расход аргона $G = 3 \times 10^{-5} \text{ кг/с}$.



Рисунок 11 – Фотография свечения тлеющего разряда атмосферного давления

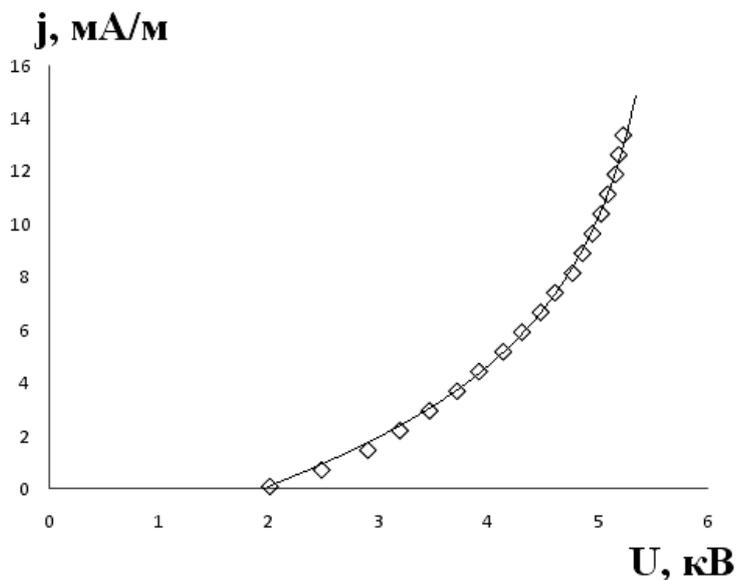


Рисунок 12 – Вольтамперная характеристика ТРАД. Межэлектродное расстояние $d=2$ см

тлеющего разряда наблюдается в виде расширяющихся цилиндрических каналов, вершины которых располагались в области острий, а основание около плоского анода.

Как видно из представленных результатов, увеличение количества коронирующих острий, секционирование катодного блока и использование индивидуального балластного сопротивления на остриях позволяет получить объемную однородную плазму на обширной поверхности и значительно увеличить предельный ток тлеющего разряда атмосферного давления по сравнению с отрицательной короной в конфигурации электродов острие-плоскость.

Пятая глава посвящена разработке и созданию источника низкотемпературной (холодной) аргоновой плазмы на основе плазменных струй атмосферного давления.

Искровой разряд, формируемый в неоднородном электрическом поле при ограничении разрядного тока балластным сопротивлением $R_6 (> 1 \text{ МОм})$,

Как показывают результаты экспериментальных исследований, распределение величины индивидуального балластного сопротивления на коронирующих остриях позволяет существенно повысить устойчивость разряда и добиться однородности заполнения разрядного промежутка плазмой.

На основе тлеющего разряда атмосферного давления в электродной системе многоострийный катод - плоский анод разработан и создан источник однородной объемной аргоновой плазмы (Рисунок 11). Вольтамперная характеристика тлеющего разряда атмосферного давления является возрастающей (Рисунок 12).

В режиме тлеющего разряда атмосферного давления разряд наблюдается в виде однородных, самостоятельных разрядов, заполняющих большую часть разрядной области и перекрывающих все межэлектродное расстояние. Поперечное сечение плазмы

представляет собой тонкий плазменный канал диаметром ($d \approx 0,5 \div 0,7$ мм), перемикающий разрядный промежуток (Рисунок 13). На фоне ярко светящейся внешней оболочки токового канала наблюдается внутренняя микроструктура, представляющая собой скопление микроканалов диаметрами $D \approx 5-10$ мкм, равномерно распределенных по сечению канала (Рисунок 14).

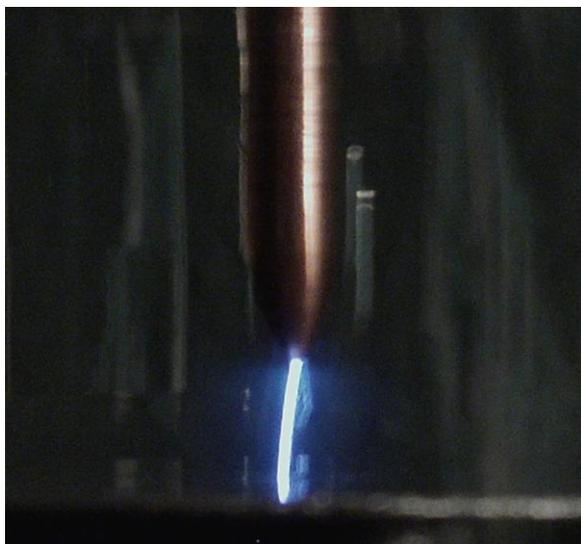


Рисунок 13 – Фотография слабotoчного искрового разряда в аргоне. $d = 0,5$ см; ток разряда $I = 110$ мкА; $R_6 = 21$ МОм

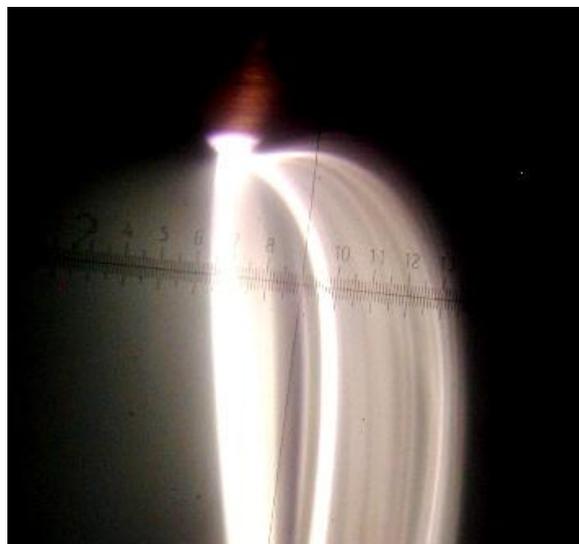


Рисунок 14 – Микроструктура плазменного канала слабotoчного искрового разряда. Межэлектродное расстояние: $d = 0,5$ см

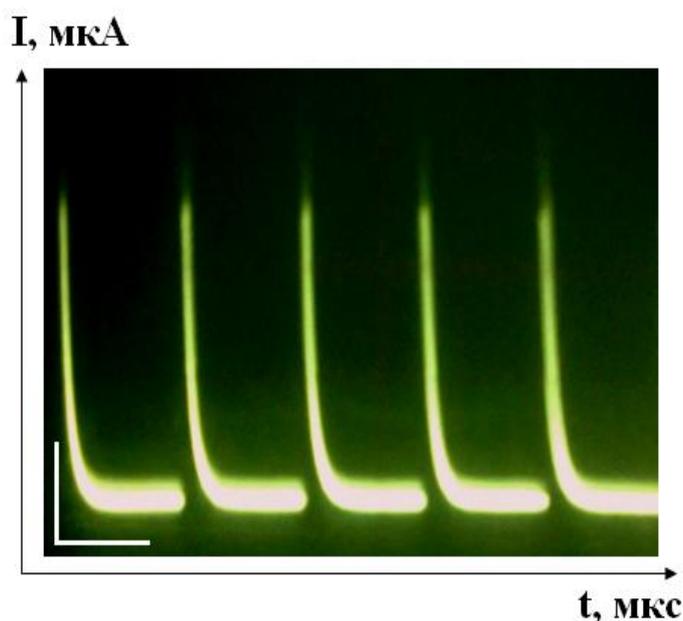


Рисунок 15 – Токoвые импульсы слабotoчного искрового разряда. $[I] = 100$ мкА/дел, $[t] = 0,2$ мс/дел

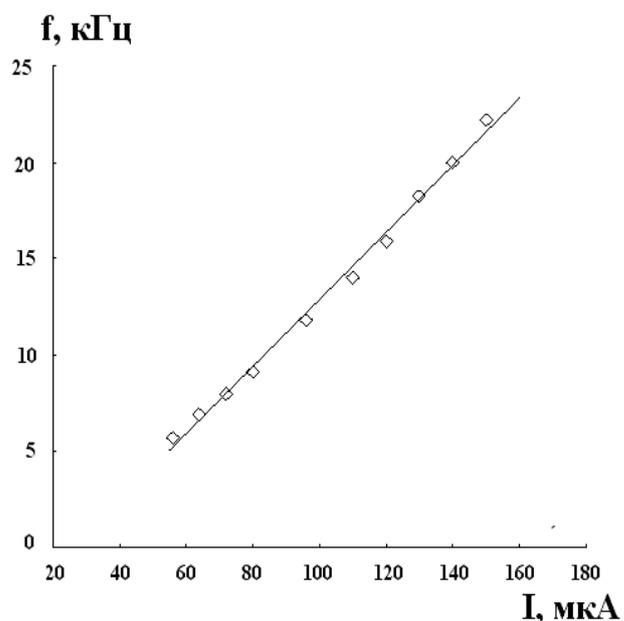


Рисунок 16 – Зависимость частоты следования импульсов тока слабotoчного искрового разряда от величины разрядного тока I

Осциллографирование разрядного тока слабotoчного искрового разряда показывает, что характер протекания тока в тонком плазменном канале искрового разряда представляет собой установившийся режим регулярных импульсов тока (Рисунок 15). В формировании импульса тока слабotoчного искрового разряда выделяются две характерные области: начальный узкий пик с амплитудой $I_m \approx 280$ мкА и вторая область 2 более длительная ($T \approx 70$ мкс при среднем токе разряда $I = 110$ мкА) по сути определяющая период T следования импульсов тока разряда.

При увеличении приложенного напряжения U частота следования импульсов тока в слабotoчном искровом разряде линейно увеличивается с увеличением разрядного тока I (Рисунок 16). Амплитуда импульса определяющим образом зависит от межэлектродного промежутка d и микрорельефа поверхности катодного острия.

Разработан способ генерации низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы, который базируется на использовании нестационарной формы горения диффузного разряда типа тлеющего, на который накладываются слабotoчные искровые разряды. Это позволяет получить однородный разряд на всей площади сопла генератора, и затем потоком газа плазма в виде плазменных струй выносятся на обрабатываемую поверхность (Рисунок 17). Факел аргоновой плазмы имеет диаметр 2,5 см и длину около 2 см. Температура аргонового факела на расстоянии 0,5 см от сопла генератора равна комнатной температуре (18-20° С).

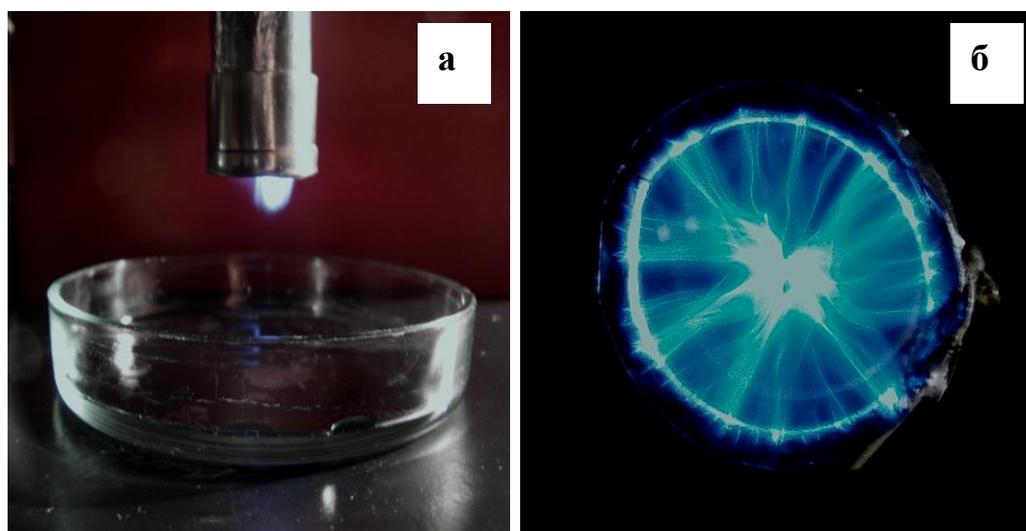


Рисунок 17 – Генератор холодной аргоновой плазмы на основе плазменных струй слабotoчного искрового разряда: а – инактивация микроорганизмов в чашке Петри; б – вид разряда с торца

В **шестой главе** представлены результаты исследований бактерицидных свойств низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы генерируемой слабotoчными формами высоковольтных разрядов.

Бактерицидная эффективность воздействия низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы тлеющего разряда атмосферного давления исследовалась на бактериях природной ассоциации микроорганизмов. Тест-

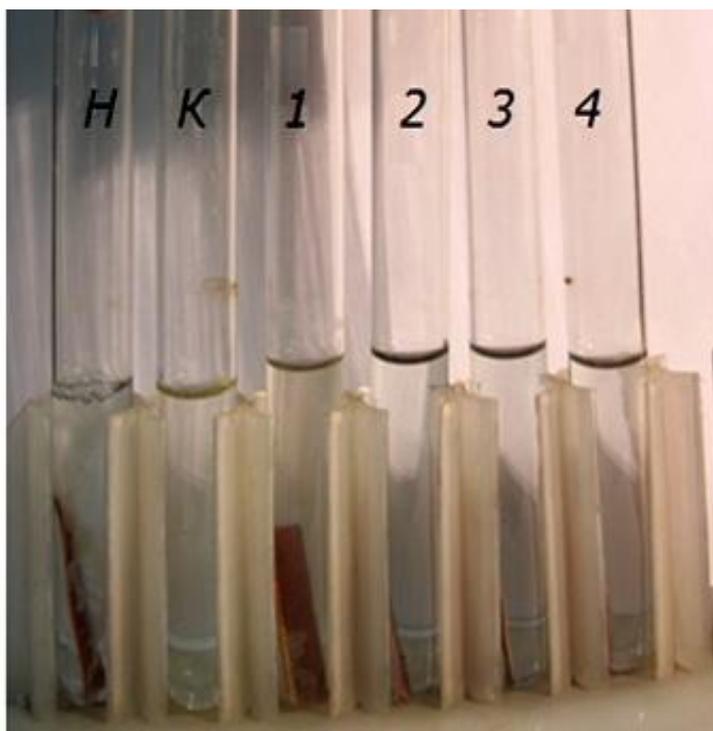


Рисунок 18 – Результаты бактерицидного действия холодной аргоновой плазмы. Н – необработанная пластина; К – контроль; пробирки 1, 2 – обработка в режиме отрицательной короны, $t = 2$ и 5 мин, соответственно; пробирки 3, 4 – обработка в режиме ТРАД, $t = 2$ и 5 мин, соответственно.

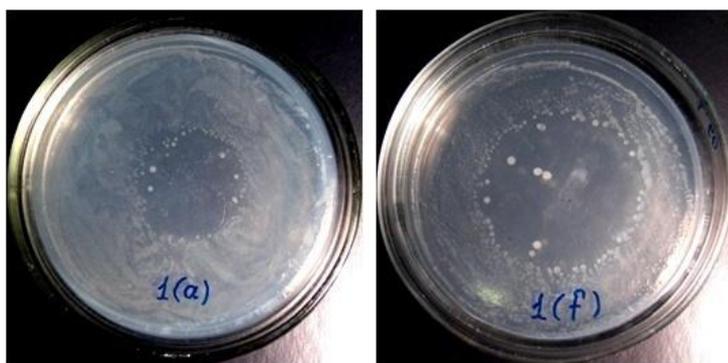


Рисунок 19 – Зоны инактивации бактериального роста природной ассоциации микроорганизмов: (а) – $t = 10$ с, (f) – $t = 60$ с

регистрируется в виде круглых прозрачных областей, которые являются зонами инактивации роста микроорганизмов (Рисунок 19).

полоски с микроорганизмами помещались на плоский анод, время обработки пластин в плазме варьировалось от 2 до 5 минут. Изучение выживаемости бактерий в плазме импульсно-периодического режима отрицательной короны показало, что после обработки пластин в течение 2 и 5 минут (ток разряда $I = 250$ мкА) бактерии погибают полностью (пробирки 1, 2 на рисунке 18). В режиме тлеющего разряда атмосферного давления (ток разряда $I = 700$ мкА, время обработки $t = 2$ и 5 минут), где разряд представляет однородные, самостоятельные разряды, перекрывающие все межэлектродное расстояние, бактерии также погибают полностью (пробирки 3, 4 на рисунке 18). Рост микроорганизмов после обработки в аргоновой плазме отсутствует на протяжении семи суток культивирования тест-полосок в жидкой питательной среде.

Эффективность биоцидного действия низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы, генерируемой плазменными струями атмосферного давления, оценивалась по воздействию на бактерии природной ассоциации микроорганизмов и вегетативной формы *Escherichia coli*. Воздействие низкотемпературной (холодной) аргоновой плазмы генерируемой плазменными струями на микроорганизмы

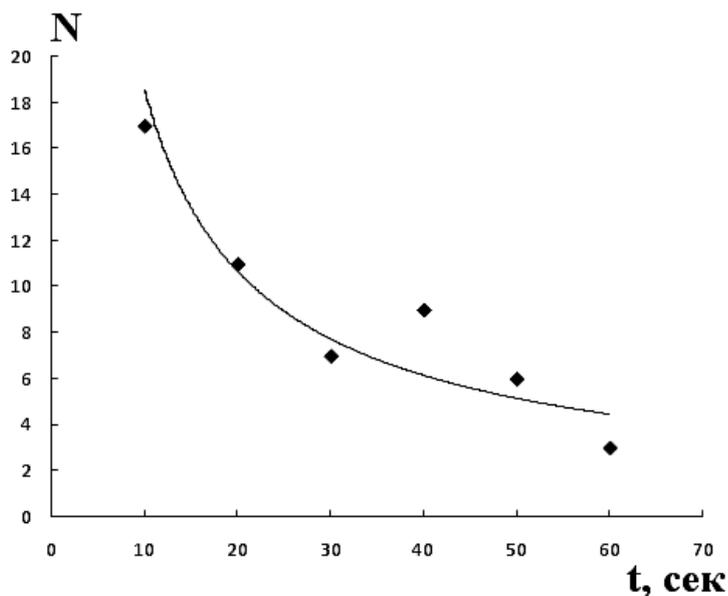


Рисунок 20 – Зависимость числа выживших бактерий от времени воздействия

Полученные данные показывают, что обработка чашек плазменными струями в течение 10 с приводит к гибели практически всех микроорганизмов в радиусе 0,9 см. После 60 секундной обработки диаметр зоны инактивации бактерий увеличивается в 1,6 раза. Определение инактивационной способности аргоновой плазмы, проведенное методом счета колоний, показывает, что после минутной обработки остаются лишь единичные выросшие макроколонии микроорганизмов (Рисунок 20).

Бактерицидные свойства неравновесной аргоновой плазмы, генерируемой плазменными струями, исследовались по воздействию на вегетативную форму штаммов *Escherichia coli* в сравнении с антибиотиками разных механизмов ингибирующего действия (Рисунок 21).

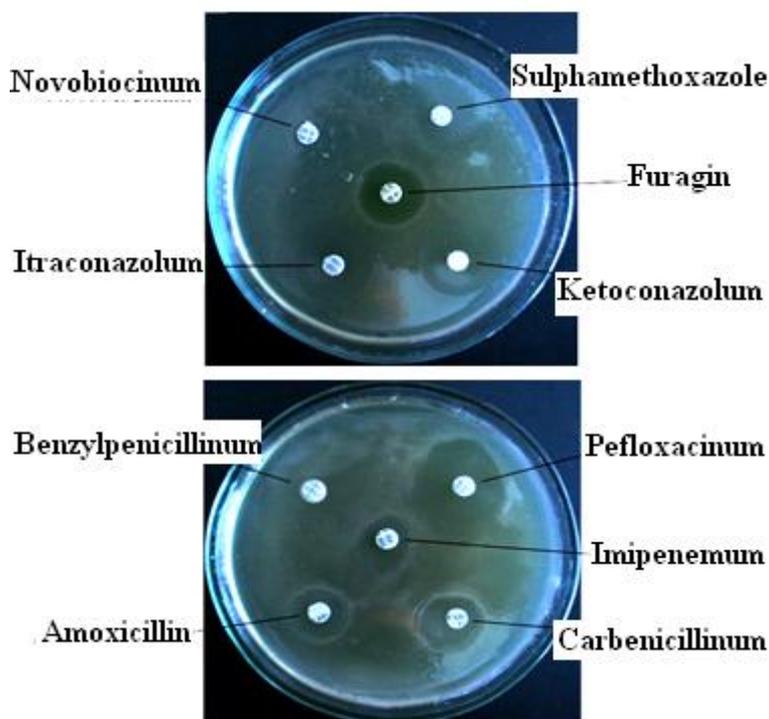


Рисунок 21 – Воздействие антибиотиков на вегетативную форму штаммов *Escherichia coli*. Время воздействия 18 часов



Рисунок 22 – Воздействие холодной аргоновой плазмы на вегетативную форму штаммов *Escherichia coli*. Время воздействия 30 секунд

Культура *Escherichia coli* была выращена на агаризованной богатой среде в виде газона. Воздействие различных антибиотиков на бактерии *Escherichia coli* в течение 18 часов приводит к разным площадям поражения в зависимости от токсичности антибиотика (Рисунок 21).

В случае плазменной инактивации обработка в течение 30 с приводит к полной гибели бактерий на площади ($S = 2 \text{ см}^2$), практически на такой же, как в случае с наиболее токсичными антибиотиками (Рисунок 22). Полученные данные свидетельствуют о высокой чувствительности микроорганизмов к воздействию холодной аргоновой плазмы.

На основе проведенных экспериментальных исследований реализованной особой формы тлеющего разряда, на который накладываются слаботочные искровые разряды, разработан высокоэффективный портативный плазменный источник холодной аргоновой плазмы (Рисунок 23). Эффективный процесс инактивации микроорганизмов при воздействии аргоновой плазмы плазменного источника начинается практически с 5 с, и с увеличением времени экспозиции площадь инактивации значительно увеличивается (Рисунок 24).

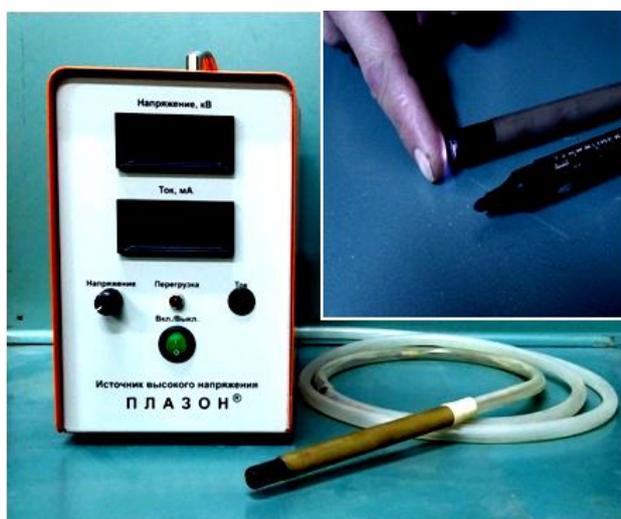


Рисунок 23 – Портативный плазменный источник низкотемпературной (холодной) аргоновой плазмы PortPlaSter

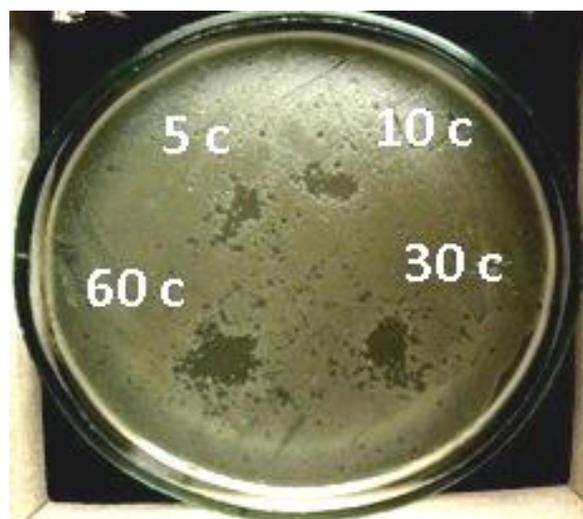


Рисунок 24 – Зоны инактивации бактериального роста *Escherichia coli*

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Экспериментально реализован отрицательный коронный разряд постоянного напряжения в электроположительном газе – аргоне. Установлено, что протекание тока в разрядном промежутке отрицательной короны в аргоне представляет собой установившийся режим регулярных импульсов тока с длительностью, лежащей в миллисекундном диапазоне.

2. Экспериментально реализован и исследован переход импульсно-периодического режима отрицательного коронного разряда в режим тлеющего разряда атмосферного давления. Величина предельного тока перехода

отрицательной короны в режим тлеющего разряда увеличивается с ростом межэлектродного расстояния и с уменьшением скорости прокачки газа через разрядный промежуток.

3. Экспериментально реализован и исследован стационарный тлеющий разряд атмосферного давления в потоке аргона в конфигурации электродов многоострый катод - плоский анод. Вольтамперная характеристика разряда в аргоне является возрастающей. Положительное дифференциальное сопротивление разряда свидетельствует о его стабильности и определяет малые потери электрической энергии на балластных сопротивлениях.

4. Экспериментально исследованы свойства высоковольтного искрового разряда в геометрии острие-плоскость, при ограничении разрядного тока балластным сопротивлением. Показано, что искровой разряд при ограничении разрядного тока балластным сопротивлением является слаботочным, а характер протекания тока в тонком плазменном канале искрового разряда представляет собой установившийся режим регулярных импульсов тока.

5. Экспериментально реализована и исследована нестационарная форма диффузного разряда – тлеющего разряда, на который накладываются слаботочные искровые разряды. Данный тип разряда формируется в потоке газа, в виде плазменных струй атмосферного давления. Вольтамперная характеристика разряда является падающей, а характер протекания тока в разрядном промежутке, представляет собой установившийся режим периодических импульсов тока.

6. Изучение выживаемости бактерий в диффузной плазме источника низкотемпературной (холодной) аргоновой плазмы на основе тлеющего разряда атмосферного давления показало, что полная инактивация микроорганизмов наблюдается в секундном интервале обработки: как в импульсно-периодическом режиме работы генератора, так и в режиме тлеющего разряда атмосферного давления.

7. Разработан и создан высокоэффективный малогабаритный плазменный источник низкотемпературной (холодной) аргоновой плазмы PortPlaSter на основе нестационарной формы горения диффузного разряда типа тлеющего разряда, на который накладываются слаботочные искровые разряды. Эффективный процесс инактивации микроорганизмов с помощью данного источника аргоновой плазмы начинается практически с 5 с. С увеличением времени экспозиции площадь инактивации значительно увеличивается.

Цитируемая литература

1. Месяц, Г.А. Импульсная энергетика и электроника. - М.: Наука, 2004. – 704 с.
2. Королев, Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. - М.: Наука, 1991. – 224 с.
3. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1992. – 536 с.

4. Акишев, Ю.С. Пульсирующий режим отрицательной короны в азоте. I. Эксперимент / Ю.С. Акишев, и др. // Физика плазмы. – 2001. – Т. 27. – № 6. – С.550-562.
5. Abolmasov, S.N. Negative corona in silane-argon-hydrogen mixtures at low pressures / S.N. Abolmasov, L. Kroely, P.Roca iCabarrocas// J. Phys. D: Appl. Phys. – 2008. – Vol. 41. – P. 165203.
6. Loeb. L.B. Electrical coronas. Berkeley and Los Angeles: University of California Press, 1965.
7. Shimizu, T. Characterization of Low-Temperature Microwave Plasma Treatment With and Without UV Light for Disinfection / T. Shimizu, et al. // Plasma Processes and Polymers. – 2010. – Vol. 7, Issue 3-4. – P. 288-293.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Дандарон, Г.-Н.Б. Экспериментальное исследование свойств отрицательной короны в аргоне при атмосферном давлении / Г.-Н.Б. Дандарон, **Б.Б. Балданов** // Физика плазмы. – 2007. – Т. 33. – № 3. – С. 273-279.
2. Дандарон, Г.-Н.Б. Экспериментальное исследование влияния расхода газа на импульсы тока отрицательной короны в аргоне / Г.-Н.Б. Дандарон, **Б.Б. Балданов** // Прикладная физика. – 2007. – №1. – С. 85-88.
3. Дандарон, Г.-Н.Б. Особенности зажигания отрицательной короны в потоке электроположительного газа / Г.-Н.Б. Дандарон, **Б.Б. Балданов**// Инженерная физика. – 2007. – №3. – С. 30-32.
4. Дандарон, Г.-Н.Б. Экспериментальные исследования по возбуждению тлеющего разряда атмосферного давления в потоке аргона / Г.-Н.Б. Дандарон, **Б.Б. Балданов** // Инженерная физика. – 2007. – №3. – С.33-35.
5. Дандарон, Г.-Н.Б. О характере влияния расхода газа на параметры отрицательной короны в потоке аргона/ Г.-Н.Б. Дандарон, **Б.Б. Балданов** // ЖТФ. – 2008. – Т. 78. – Вып. 2. – С. 140-142.
6. Дандарон, Г.-Н.Б. Результаты зондовых измерений потенциала отрицательной короны атмосферного давления / Г.-Н.Б. Дандарон, **Б.Б. Балданов**, Ц.В. Ранжуров, и др. // Инженерная физика. – 2008. – №6. – С. 20-23.
7. **Балданов, Б.Б.** Экспериментальное исследование многоострийной отрицательной короны в потоке аргона / Б.Б. Балданов, Ч.Н. Норбоев // Прикладная физика. – 2009. – №3. – С. 93-95.
8. **Балданов, Б.Б.** К вопросу стабилизации многоострийной отрицательной короны с помощью балластных сопротивлений / Б.Б. Балданов // ЖТФ.– 2009. – Т. 79. – Вып. 8. – С. 150-152.
9. **Балданов, Б.Б.** Экспериментальное исследование коронного разряда с многоострийным катодом в потоке аргона / Б.Б.Балданов // Физика плазмы. – 2009. – Т. 35. – № 7. – С. 603-610.
10. **Балданов, Б.Б.** Экспериментальное исследование тлеющего разряда в атмосфере инертного газа / Б.Б. Балданов, Ч.Н. Норбоев // Инженерная физика. – 2009. – №10. – С. 8-10.

11. **Балданов, Б.Б.** Гистерезис вольт-амперной характеристики отрицательной короны при переходе в режим тлеющего разряда атмосферного давления / Б.Б. Балданов // Инженерная физика. – 2009. – №10. – С. 11-13.
12. **Балданов, Б.Б.** Расчет параметров импульсно-периодического режима отрицательной короны в аргоне / Б.Б. Балданов // Инженерная физика. – 2010. – №1. – С. 47-50.
13. **Балданов, Б.Б.** Амплитудно-частотные характеристики слаботочной искры в аргоне / Б.Б. Балданов // Инженерная физика. – 2010. – №2. – С. 37-39.
14. **Балданов, Б.Б.** Два типа токовых пульсаций слаботочного искрового разряда в неоднородном электрическом поле / Б.Б. Балданов // ЖТФ. – 2011. – Т. 81. – Вып. 4. – С. 135-137.
15. **Балданов, Б.Б.** Особенности формирования искрового разряда при ограничении разрядного тока балластным сопротивлением / Б.Б. Балданов // Прикладная физика. – 2012. – №1. – С. 64-67.
16. **Baldanov, V.V.** Peculiarities of the spark discharge formation at a limiting ballast resistor / V.V. Baldanov // Plasma Physics Reports. – 2012. – V. 38. – № 13. – P. 1062-1065.
17. **Балданов, Б.Б.** О влиянии растекания тока в дрейфовой области разряда на вольтамперную характеристику отрицательной короны в аргоне / Б.Б. Балданов // Прикладная физика. – 2013. – №5. – С. 42-46.
18. **Балданов, Б.Б.** О повышении предельного тока тлеющего разряда атмосферного давления в потоке аргона / Б.Б. Балданов, Ц.В. Ранжуров // ЖТФ. – 2014. – Т. 84. – Вып. 4. – С. 152-154.
19. **Балданов, Б.Б.** Исследование распределения плотности тока на поверхности анода в импульсно-периодическом режиме отрицательной короны в аргоне / Б.Б. Балданов, Ц.В. Ранжуров // ЖТФ. – 2014. – Т. 84. – Вып. 7. – С. 136-138.
20. **Балданов, Б.Б.** Изменение контактных свойств поверхности пленок политетрафторэтилена, модифицированных в плазме слаботочного поверхностного разряда / Б.Б. Балданов, Ц.В. Ранжуров // Прикладная физика. – 2014. – №2. – С. 26-28.
21. Семенов, А.П. Воздействие низкотемпературной (холодной) аргоновой плазмы слаботочных высоковольтных разрядов на микроорганизмы / А.П. Семенов, **Б.Б. Балданов**, Ц.В. Ранжуров, и др. // Прикладная физика. – 2014. – №3. – С. 47-49.
22. **Балданов, Б.Б.** Модифицирование поверхности пленок политетрафторэтилена в плазме слаботочного поверхностного разряда / Б.Б. Балданов, Ц.В. Ранжуров // Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2. – №2. – С. 112-116.
23. Семенов, А.П. Инактивация микроорганизмов в холодной аргоновой плазме атмосферного давления / А.П. Семенов, **Б.Б. Балданов**, Ц.В. Ранжуров, и др. // Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2. – №3. – С. 229-233.

24. **Балданов, Б.Б.** Инактивация микроорганизмов в холодной аргонной плазме атмосферного давления / Б.Б. Балданов, Ц.В. Ранжуров, Ч.Н. Норбоев, и др. // Вестник ВСГТУ. – 2015. – № 4. – С. 56-60.

25. **Балданов, Б.Б.** Воздействие плазменных струй слаботочного искрового разряда на микроорганизмы (на примере *Escherichia coli*) / Б.Б. Балданов, А.П. Семенов, Ц.В. Ранжуров, и др. // ЖТФ. – 2015. – Т. 85. – Вып. 11. – С. 156-158.

26. **Балданов, Б.Б.** Формирование искрового разряда в неоднородном электрическом поле при ограничении разрядного тока балластным сопротивлением большой величины / Б.Б. Балданов // Физика плазмы. – 2016. – Т. 42. – № 1. – С. 86-92.

27. **Балданов, Б.Б.** Влияние поверхностного разряда при атмосферном давлении на поверхностные свойства пленок политетрафторэтилена / Б.Б. Балданов, Ц.В. Ранжуров // Химия высоких энергий. – 2016. – Т. 50. – № 1. – С. 64-67.

28. Semyonov, A. Development of microbicide equipment and research in pathogen inactivation by cold argon plasma / A. Semyonov, **B. Baldanov**, Ts. Ranzhurov, et al. // Siberian Scientific Medical Journal. – 2016. – Vol. 36. – № 1. – P. 18-22.

Статьи в научных сборниках, продолжающихся изданиях и трудах конференций

1. Дандарон, Г.-Н.Б. Импульсно-периодический самоиницирующий разряд в аргоне атмосферного давления / Г.-Н.Б. Дандарон, В.Б. Шагдаров, **Б.Б. Балданов** // Вестник ВСГТУ. – 2006. – №1. – С. 4-12.

2. **Балданов, Б.Б.** Экспериментальное исследование влияния газодинамического потока на параметры и токовую область существования отрицательной короны / Б.Б. Балданов, В.Б. Шагдаров // Вестник ВСГТУ. – 2009. – № 4. – С. 5-9.

3. **Балданов, Б.Б.** Особенности формирования поверхностного разряда инициируемого отрицательным коронным разрядом в атмосфере аргона / Б.Б. Балданов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57. – №3/2. – С. 52-54.

4. **Балданов, Б.Б.** Амплитудно-частотные характеристики искрового разряда при ограничении разрядного тока балластным сопротивлением / Б.Б. Балданов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57. – №3/2. – С. 55-58.

5. Dandaron, G.-N.B. Negative corona discharge in argon flow / G.-N.B. Dandaron, A.P. Rinchinov, V.Ts. Bazarsadaev, Ts.V. Ranjurov, **V.B. Baldanov** // 30th International Conf. ICOPS 2003. Abstracts. – Korea, Issue, 2003. – P. 356.

6. Дандарон, Г.-Н.Б. Экспериментальное исследование импульсно-периодического режима отрицательного коронного разряда в электроположительном атомарном газе / Г.-Н.Б. Дандарон, **Б.Б. Балданов**, Б.Ц. Базарсадаев // Труды IV Международной научной конференции «Радиационно-

термические эффекты и процессы в неорганических материалах». – Томск, 2004. – С. 366-368.

7. Дандарон, Г.-Н.Б. Экспериментальное исследование влияния потока газа на параметры импульсного режима коронного разряда / Г.-Н.Б. Дандарон, **Б.Б. Балданов** // Материалы III Международной научно-практической конференции «Энергосберегающие и природоохранные технологии» (встреча на Байкале), посвященной памяти академика РАН М.Ф. Жукова. – Улан-Удэ, 2005. – С. 119-122.

8. Дандарон, Г.-Н.Б. Особенности развития отрицательной короны в аргоне – источника неравновесной плазмы атмосферного давления / Г.-Н.Б. Дандарон, **Б.Б. Балданов** // Высокие технологии, фундаментальные исследования, образование. Т.5.: Сборник трудов II Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – Санкт-Петербург, 2006. – С. 328-329.

9. Дандарон, Г.-Н.Б. Влияние газодинамических и геометрических факторов на характеристики отрицательной короны в потоке аргона / Г.-Н.Б. Дандарон, **Б.Б. Балданов** // Доклады Всероссийской научно-технической конференции «Современные инновационные технологии и оборудование». – Москва-Тула, 2006. – С. 3-4.

10. Дандарон, Г.-Н.Б. Экспериментальное исследование перехода импульсно-периодического режима отрицательной короны в режим тлеющего разряда в потоке аргона / Г.-Н.Б. Дандарон, **Б.Б. Балданов** // Тезисы докладов XXXIV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. – Звенигород, 2007. – С. 223.

11. Дандарон, Г.-Н. Б. О зажигании отрицательной короны в потоке аргона / Г.-Н.Б. Дандарон, **Б.Б. Балданов** // Материалы Всероссийской конференции по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-2008. – Петрозаводск, 2007. – С. 67-68.

12. Дандарон, Г.-Н.Б. Исследование влияния структуры газодинамического потока аргона на параметры отрицательной короны / Г.-Н.Б. Дандарон, **Б.Б. Балданов** // Тезисы докладов XXXV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. – Звенигород, 2008. – С. 216.

13. **Балданов, Б.Б.** Переход многоострийной отрицательной короны в режим тлеющего разряда атмосферного давления в аргоне / Б.Б. Балданов, Ч.Н. Норбоев // Сборник трудов V Международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии. Т. 2. – Иваново, 2008. – С. 504-505.

14. **Балданов, Б.Б.** К устойчивости коронного разряда с многоострийным катодом в потоке аргона / Б.Б. Балданов // Труды III Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника». – Улан-Удэ, 2009. – С. 89-91.

15. **Baldanov, V. V.** Experimental study of a multipoint cathode corona in an argon flow / V. V. Baldanov // VI International Conference «Plasma Physics and Plasma Technology». – Minsk, Belarus, 2009. – V. 1. – P. 141-144.

16. **Балданов, Б.Б.** Экспериментальное исследование характеристик тлеющего разряда на основе многоэлектродного коронного разряда в потоке аргона / Б.Б. Балданов // Т.1.: Сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – Санкт-Петербург, 2009. – С. 97-98.

17. **Балданов, Б. Б.** Особенности формирования режимов разряда в аргоне в геометрии многоострыйный катод – плоскость / Б.Б. Балданов // Материалы Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы – 2011». – Петрозаводск, 2011. – С. 74-77.

18. **Балданов, Б. Б.** Формирование стационарного тлеющего разряда в аргоне при атмосферном давлении / Б.Б. Балданов // Материалы Международной конференции «Плазменные технологии исследования, модификации и получения материалов различной физической природы». – Казань, 2012. – С. 57-59.

19. **Baldanov, V.V.** Two types of current oscillations in a low-current spark discharge initiated in a nonuniform electric field / V. V. Baldanov // 25th Symposium on Plasma Physics and Technology (SPPT-2012). – Prague, Czech Republic, 2012. – P. 35.

20. **Балданов, Б.Б.** О повышении предельного тока тлеющего разряда атмосферного давления в аргоне / Б.Б. Балданов // Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: доклады V Всероссийской конференции. Т. 1. – Новосибирск: Параллель, 2013. – С. 17-19.

21. **Балданов, Б.Б.** Исследование воздействия неравновесной плазмы отрицательной короны на поверхностные свойства пленок политетрафторэтилена / Б.Б. Балданов, Ц.В. Ранжуров // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции (с международным участием) «Физикохимия процессов переработки полимеров». – Иваново, 2013. – С. 119.

22. **Балданов, Б.Б.** Особенности формирования слаботокового поверхностного разряда при атмосферном давлении в аргоне / Б.Б. Балданов, Ц.В. Ранжуров, Ч.Н. Норбоев // Материалы Всероссийской конференции (с международным участием) «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2014. Т.1. – Казань, 2014. – С. 43-45.

23. **Балданов, Б.Б.** Инактивация микроорганизмов в холодной аргоновой плазме атмосферного давления / Б.Б. Балданов и др. // Материалы Всероссийской конференции (с международным участием) «Физика низкотемпературной плазмы» ФНТП-2014. Т. 1. – Казань, 2014. – С. 176-177.

24. Гомбоева, С.В. Исследование влияния плазменных потоков на микроорганизмы / С.В. Гомбоева, **Б.Б. Балданов**, Ц.В. Ранжуров // Биотехнология в интересах экологии и экономики Сибири и Дальнего Востока: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Улан-Удэ, 2014. – С.45-46.

25. **Baldanov, V.V.** Modification of the PTFE film in low-current argon discharges / V.V. Baldanov, Ts.V. Ranzhurov // XV International Scientific Conference «High-Tech in Chemical Engineering – 2014». – Zvenigorod, 2014. – P. 242.

26. **Балданов, Б.Б.** Воздействие плазменных струй формируемых в потоке аргона на микроорганизмы / Б.Б. Балданов, Ц.В. Ранжуров, С.В. Гомбоева, А.П. Семенов, Э.О. Николаев // Доклады VI Всероссийской конференции «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине». Т. 2. – Новосибирск, 2015. – С. 3-5.

27. **Балданов, Б.Б.** О подобии свойств отрицательной короны и слаботоочного искрового разряда формируемых в неоднородном электрическом поле / Б.Б. Балданов // Труды V Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника». – Улан-Удэ, 2015. – С. 73-78.

28. Семенов, А.П. Перспективы использования низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы как антимикробного агента / А.П. Семенов, **Б. Б. Балданов**, Ц.В. Ранжуров, и др. // Труды V Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника». – Улан-Удэ, 2015. – С. 215-219.

29. Semyonov, A. Development of microbicide equipment and research in pathogen inactivation by cold argon plasma / A. Semyonov, **В. Baldanov**, Ts. Ranzhurov, et al. // International Conference on Biomedical Engineering and Computational Technologies (SIBIRCON 2015). – Novosibirsk, Russia. – P. 53-56.

30. Заявка 2016131803/07 Российская Федерация, МПК H05H. Способ стерилизации газоразрядной плазмой атмосферного давления и устройство для его осуществления / А.П. Семенов, **Б.Б. Балданов**, Ц.В. Ранжуров, Ч.Н. Норбоев; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук. - № 2016131803/07; заявл. 02.08.2016.