

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию  
**Балданова Баира Батоевича**  
на тему: **Источники неравновесной аргоновой плазмы  
на основе слаботочных высоковольтных разрядов**  
по специальности 01.04.04 – физическая электроника  
на соискание ученой степени доктора технических наук

### **Актуальность избранной темы.**

Значительный научный и практический интерес к разработке новых источников низкотемпературной плазмы атмосферного давления связан с перспективами их широкого применения в медицинской технике и технологиях модификации материалов. Основой для разработки таких источников являются слаботочные формы высоковольтных разрядов атмосферного давления и различные типы неравновесных плазменных струй с низкой плотностью мощности. Основными требованиями к генераторам атмосферной плазмы являются эффективность, надежность, экономичность, стабильность функционирования.

Активно ведутся исследования, направленные на создание условий для генерации больших объемов однородной атмосферной плазмы, что делает возможной обработку больших поверхностей термочувствительных объектов. С этой точки зрения представляет значительный интерес относительно малоисследованный тлеющий разряд атмосферного давления в аргоне, наблюдаемый в переходной области между отрицательной короной и искровым разрядом.

Поэтому тематика исследований, направленная на изучение условий устойчивого существования тлеющего разряда атмосферного давления и расширение токового диапазона такого разряда, изучение особенностей генерации плазмы при ограничении тока искры в переходном режиме и разработку источников неравновесной (холодной) аргоновой плазмы атмосферного давления на основе широкоапертурного генератора с многоострийным катодом тлеющего разряда и генератора плазменных струй слаботочного искрового разряда для новых биомедицинских технологий является **актуальной**.

### **Структура и содержание работы**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и приложения. Работа изложена на 239 страницах печатного текста, содержит 4 таблицы и 115 рисунков. Список литературы включает 320 источников. В приложении приведены копии двух Актов об использовании результатов диссертационной работы.

Во **Введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели работы и выносимые на защиту научные положения, отмечена научная новизна, научная и практическая ценность работы.

**В первой главе** проведен критический анализ результатов экспериментальных и теоретических работ в области газовых разрядов атмосферного давления. Рассмотрены основные типы источников низкотемпературной неравновесной плазмы атмосферного давления, свойства и параметры применяемых в них разрядов, основные технические решения, используемые в экспериментальных установках и приборах для генерации плазмы атмосферного давления применительно к инактивации микроорганизмов. Рассмотрено применение низкотемпературной плазмы при атмосферном давлении как

антибактериального агента и сформулированы такие достоинства плазменной обработки, как отсутствие высокотоксических веществ пролонгированного действия и малая вероятность развития спонтанной устойчивости к низкотемпературной плазме у микроорганизмов. 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 электроположительном атомарном газе (аргоне) при атмосферном давлении в конфигурации электродов острие-плоскость. Установлено, что протекание тока отрицательной короны в аргоне характеризуется последовательностью регулярных импульсов тока при небольших значениях среднего тока короны. Импульсы тока отрицательной короны имеют передний фронт малой длительности ( $\approx 5,5$  мкс) и общую длительность  $\approx 0,35$  мс. Амплитуда импульсов тока составляет  $\sim 50$  мкА и не зависит от напряжения. Экспериментально показано, что характер распределения плотности тока в генерационной и дрейфовой областях разряда оказывают существенное влияние на параметры импульсов тока и границы токовой области существования импульсно-периодического режима отрицательного коронного разряда. Исследовано влияние скорости прокачки газа через разрядный промежуток на параметры импульсов тока и границы токовой области существования импульсно-периодического режима отрицательного коронного разряда.

В **третьей главе** описаны результаты экспериментальных исследований перехода импульсно-периодического режима отрицательной короны в режим тлеющего разряда атмосферного давления в конфигурации электродов острие-плоскость. Установлено, что величина предельного тока перехода отрицательной короны в режим тлеющего разряда увеличивается с ростом межэлектродного расстояния и уменьшается при увеличении скорости прокачки газа через разрядный промежуток. С увеличением расхода газа возрастает и ток перехода тлеющего разряда в искру, то есть, токовая область существования тлеющего разряда атмосферного давления с ростом расхода газа значительно расширяется. Проведены исследования радиального профиля плотности тока на аноде отрицательной короны в аргоне и установлено, что с ростом тока разряд концентрируется вблизи оси.

**Четвертая глава** посвящена разработке и созданию источника низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы на основе тлеющего разряда атмосферного давления в электродной системе многоострый катод - плоский анод. Исследованы особенности зажигания и характеристики многоострийной отрицательной короны, а также условий ее перехода в тлеющий разряд атмосферного давления. Изучено влияние числа острий и их взаимного расположения на общий ток тлеющего разряда и его распределение по остриям. Показано, что 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. Приведено описание разработанного автором портативного плазменного источника холодной аргоновой плазмы

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

Изучены свойства высоковольтного искрового разряда в геометрии острие-плоскость при ограничении разрядного тока на уровне нескольких сотен мкА. Показано, что характер протекания тока в тонком плазменном канале слаботочной искры представляет собой последовательность регулярных импульсов тока. С ростом тока разряда частота следования импульсов возрастает и при достижении критического тока происходит скачкообразный переход искрового разряда в другую форму - контрагированный тлеющий разряд. Исследован способ генерации плазменных струй низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы с использованием слаботочного искрового разряда. Описан разработанный генератор плазмы с коаксиально расположенными катодом и цилиндрическим анодом, через полость которого подается поток аргона.

В **шестой главе** представлены результаты исследований бактерицидных свойств низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы генерируемой слаботочными формами высоковольтных разрядов. Бактерицидная эффективность воздействия низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы атмосферного давления исследовалась по воздействию на бактерии *Escherichia coli*. Установлено, что полная инактивация микроорганизмов происходит в секундном интервале плазменной обработки. С увеличением времени экспозиции площадь инактивации значительно увеличивается. Механизм инактивации бактерий обусловлен разрушением мембран клеток под действием активных частиц плазмы

В заключении приведены основные результаты работы. Список цитируемой литературы (320 наименований) содержит исчерпывающую библиографию по тематике диссертации.

#### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

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.

#### **Новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Научная новизна работы определяется следующими основными результатами:

1. Впервые обнаружен и реализован импульсно-периодический режим 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 обнаружено новое физическое явление – переход отрицательной короны в аргоне при атмосферном давлении в режим стационарного тлеющего разряда атмосферного давления. Изучена эволюция пространственной структуры и электрических характеристик разряда в переходном режиме.

3. Исследован стационарный тлеющий разряд атмосферного давления в аргоне в электродной системе с многоострийным катодом и плоским анодом и установлено, что

стационарная сильнонеравновесная плазма однородно заполняет весь межэлектродный промежуток.

4. Показано, что характер протекания тока в плазменном канале слаботочной искры представляет собой последовательность регулярных импульсов тока, а вольтамперная характеристика разряда является падающей.

5. Исследовано формирование плазменной струи в коаксиальной электродной системе слаботочной искры и создан высокоэффективный источник низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы.

6. Показана высокая эффективность бактерицидного действия источников низкотемпературной (холодной) неравновесной аргоновой плазмы на основе слаботочных форм высоковольтных разрядов атмосферного давления. Установлено что полная инактивация микроорганизмов происходит в секундном интервале обработки.

#### **Значимость для науки и практики полученных автором результатов.**

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

2. Результаты исследований режимов генерации и характеристик тлеющего разряда атмосферного давления, возбуждаемого в аргоне, могут быть использованы для создания новых технологий стерилизации и обеззараживания с высокой эффективностью и малым временем обработки объектов.

3. На основе особой формы разряда – типа тлеющего, на который накладываются слаботочные искровые разряды, создан высокоэффективный портативный источник низкотемпературной неравновесной аргоновой плазмы PortPlaSter, который эффективно применяется для дезинфекции открытых ран, в том числе хронических незаживающих ран.

#### **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Основные результаты диссертационной работы, направленные на разработку, создание и практическое применение плазменных источников на основе слаботочных форм высоковольтных разрядов, уже используются в учебном процессе в Восточно-Сибирском государственном университете технологий и управления (ФГБОУ ВО ВСГУТУ), в Институте общей и экспериментальной биологии СО РАН (ИОЭБ СО РАН), в Бурятском государственном университете (ФГБОУ ВО БГУ), а также при проведении научно-исследовательских работ в Бурятском научно-исследовательском институте сельского хозяйства (БНИИСХ). Наиболее целесообразным представляется использовать результаты работы в медицинских центрах, занимающихся проблемой незаживающих ран, лечение которых обычными методами очень проблематично при сахарном диабете из-за повреждённых болезнью сосудов, при онкологии и ВИЧ — из-за подавленного иммунитета, а также в пожилом возрасте из-за низкой скорости деления клеток.

#### **Оценка содержания диссертации, ее завершенности**

Диссертация представляется завершенным научным исследованием, содержащим решение поставленной научной задачи. Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 01.04.04 – физическая электроника. По теме

диссертационного исследования автором опубликовано 58 научных работ, из которых 28 размещены в изданиях, рекомендованных ВАК. Исходя из списка публикаций можно сделать вывод о хорошем уровне освещения полученных научных результатов в печати. Опубликованные работы соответствуют тематике, основным положениям и выводам диссертационной работы.

**Автореферат** полностью и правильно отражает содержание диссертации

### **Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации**

Работа изложена грамотным языком в хорошем научном стиле, содержание работы выстроено логично, проведенными исследованиями поставленная цель работы достигнута. Текст хорошо иллюстрирован графиками, схемами, таблицами. Качество оформления диссертации и автореферата соответствует предъявляемым требованиям. По каждой главе сформулированы содержательные выводы, что облегчает понимание материала.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

1. Непонятно, зачем автор классифицирует наблюдавшуюся в экспериментах последовательность импульсов слаботочного искрового разряда, как особую форму разряда - типа тлеющего, на который накладываются слаботочные искровые разряды (стр. 182). Так, например, можно объявить особой формой сильноточный тлеющий разряд низкого давления с током, близким к пороговому току дуги с катодным пятном. В этом случае также будет наблюдаться последовательность импульсов тока самогасящейся дуги на фоне постоянного тока тлеющего разряда. Тем более, что ранее, на стр. 165, автор сообщил, что характер протекания тока в плазменном канале слаботочной искры представляет собой установившийся режим периодических импульсов тока. Какая особая форма разряда? Это просто циклически повторяющийся процесс зажигания и гашения слаботочной искры.
2. На стр. 64 автор заявил, что «...результаты исследований, представленные в диссертационной работе, отражены в исследованиях газоразрядной плазмы, проводимых в...» (зарубежной лаборатории – оф. опп.), причем указанная ссылка на работу имеет временной приоритет перед диссертацией. Если понимать это заявление буквально, то автор признает плагиат. При детальном рассмотрении оказывается, что иностранные коллеги просто получили импульсы разряда похожей формы (рис. 2-10). Точность формулировок иногда играет большую роль.
3. Механизм инактивации бактерий под действием атмосферной плазмы (стр. 199) рассмотрен автором очень кратко и сводится к тому, что бомбардировка бактерий ионами и электронами плазмы вызывает эффект травления на поверхности клетки, что приводит к ее разрушению. Вопрос считаю важным, так как автор использует аргоновую плазму, поэтому действие активных форм атмосферного азота и кислорода должно быть несущественным, но эффект, полученный автором в исследованиях, весьма впечатляющ. Как известно, бактерицидное действие атмосферной плазмы является комплексным и обусловлено проявлением целого ряда химических и физических эффектов. Считается, что тепловой эффект и ультрафиолетовое излучение атмосферной плазмы оказывают незначительное влияние на микроорганизмы. Имеются основания считать, что поток свободных электронов приводит к накоплению на поверхности мембраны заряда, который

способен влиять на проницаемость микробной стенки, а также вызывать разрыв мембран за счет электростатических сил. Это более реалистичное объяснение, так как энергия ионов в атмосферной плазме недостаточна для эффективного травления, а возможный механизм травления электронами нуждается в пояснении.

4. В обзоре, посвященном плазме низкого давления (Раздел 1.1), упомянуты ВЧ и СВЧ разряды, но нет упоминания о тлеющем и дуговом разрядах, которые очень широко используются в технологиях плазменной обработки (особенно в томских разработках!).

5. На стр. 118 применительно к плазме использован термин «возбужденные электроны». Обычно этот термин применяется для описания положения электронов на подуровнях атома, для описания электронной компоненты нетермической плазмы используют функцию распределения по энергиям и, соответственно, термины - низкоэнергетичные (плазменные) и высокоэнергетические (быстрые) электроны.

6. На стр. 18 автор использует следующую формулировку: «Газовые разряды, генерируемые при пониженном давлении, называются плазмой низкого давления». Здесь налицо путаница в понятиях. Плазма – это объект, разряд – процесс, посредством которого этот объект создается.

7. В работе имеется некоторое количество характерных стилистических погрешностей: например, на стр.61 – быстрый передний фронт, стр. 63 - распад импульса тока, стр. 66 - длительность заднего фронта и т.п.

8. Рис. 2.17 и 2.18 одинаковы и отличаются только подписями.

Общее впечатление – в работе использован простейший научный инструментарий, нет обычной для современных плазменных исследований оптической спектроскопии, не используются современные приборы с высоким временным и пространственным разрешением. А ведь именно такие возможности позволили обнаружить новый вид плазменной струи атмосферного давления – апокамп и доказать, что в определенных условиях плазменные струи являются дискретными, а процесс распространения плазменной струи представляет собой распространение волны ионизации (Соснин Э.А. и др. Феномен апокампического разряда // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103, № 12. С. 857-860). Тем не менее, в работе получены значимые научные результаты, на основе которых создан эффективный генератор атмосферной плазмы для биомедицины, поэтому сделанные замечания не снижают общей научной и практической ценности диссертационной работы.

#### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

Таким образом, на основании изложенного можно сделать вывод о том, что диссертация Б.Б. Балданова является научно-квалификационной работой, в которой решена научная проблема, имеющая важное значение для развития соответствующих разделов физики слаботоочных форм высоковольтных разрядов атмосферного давления и техники генерации однородной неравновесной холодной плазмы в больших объемах для биомедицинских технологий.

Диссертация Б.Б. Балданова соответствует всем требованиям ВАК и требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением

Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями, внесенными Постановлением Правительства РФ от 21 апреля 2016 г № 335), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Б.Б. Балданов заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Официальный оппонент,  
заведующий лабораторией пучков частиц ИЭФ УрО РАН,  
доктор технических наук,  
член-корреспондент Российской академии наук Гаврилов Н.В.

Гаврилов Николай Васильевич почтовый адрес: г. Екатеринбург, 620016, ул. Амундсена, 106, телефон: 8-(343)-267-87-78, адрес электронной почты: gavrilov@ier.uran.ru наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН), должность - заведующий лабораторией пучков частиц, доктор технических наук, член-корреспондент Российской академии наук.

Подпись Н.В. Гаврилова заверяю:

Ученый секретарь ИЭФ УрО РАН  
к.ф.-м.н.



Е.Е. Кокорина

Е.Е. Кокорина

«    » «    » 2015 г.