

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Объединенного института высоких температур

Российской академии наук,

к.ф.-м.н. Гавриков А.В.

« 19 » сентября 2017 года



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу **Али Рафид Аббас Али «Нелокальные ионизационные и волновые процессы в импульсных разрядах атмосферного давления»**, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

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

На основе явления импульсного пробоя газов и последующего развития искровой и дуговой стадий разряда работают различные устройства: быстродействующие коммутаторы тока и напряжения, источники излучения для накачки мощных лазеров и др. На сегодняшний день достаточно подробно изучен механизм формирования однородного плазменного столба и определены границы ее формирования, а также механизмы, нарушающие режим однородного горения. Однако существует ряд проблем. Это, прежде всего, физические процессы на стадии формирования плазменного столба, в том числе, определение роли прикатодных процессов, протекающих в области прикатодного падения потенциала, в формировании и поддержании однородного плазменного столба.

Поэтому важное значение имеет исследование роли взрывных процессов

в формировании пробоя при напряжениях, близких к статическим пробойным. Этот вид разряда широко распространен в технике высоких напряжений (пробой контактов, конденсаторостроение и т.д.).

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

Таким образом, научная проблема, сформулированная в диссертации, является актуальной как с точки зрения научных, так и прикладных задач.

Диссертационная работа имеет следующую структуру: введение, обзор литературы (глава I), описание экспериментальной установки и методов диагностики (глава II), трех глав, в которых излагаются результаты изучения пространственно-временной динамики формирования и развития импульсного разряда в инертных газах (глава III), спектров излучения и кинетических процессов в диффузных разрядах инертных газов (глава IV), сильноточных импульсных разрядов в инертных газах высокого давления (глава V) и заключения содержащего основные выводы работы.

Во введении автор определяет объект и цели исследования, обосновывает актуальность работы и приводит основные положения, вынесенные на защиту.

В первой главе, состоящей из 4 параграфов, автор приводит обзор экспериментальных и теоретических работ, описывающих формирование таунсендовского, стримерного и объемного разрядов в газах высокого давления, которые отражают в том числе результаты большого цикла исследований, проводимых десятки лет коллективом физического факультета ДГУ. Особое внимание уделяется как моделям, описывающим начальные стадии пробоя на основе развития ионизационных фронтов, так и современным представлениям о формировании стримерных разрядов. Описаны условия, определяющие режим формирования и стационарного горения объемного разряда. Показано, что наличие предьонизации газа является одним из необходимых условий зажигания объемного разряда. Изучена роль приэлектродных процессов в формировании искрового канала, амплитудно-временные, спектральные, излучательные характеристики самостоятельных импульсных разрядов.

Во второй главе диссертации приводится описание экспериментальной установки и методов измерений параметров плазмы импульсных разрядов в инертных газах атмосферного давления. Обосновываются также основные методики измерений и оцениваются их погрешности.

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

Изучены механизмы формирования объемного самостоятельного

разряда в гелии и в аргоне в условиях многоэлектронного инициирования для различных начальных условий. Экспериментально определены условия, при которых в *He* при атмосферном давлении реализуются различные режимы горения импульсного разряда: однородный объемный разряд (ОР), ОР с прикатодными плазменными структурами, контрагированный разряд и сильноточный диффузный режим (СДР). Результаты экспериментальных исследований формирования импульсного ОР показывают, что однородность и устойчивость плазменного столба напрямую определяется условиями формирования разряда.

Экспериментальные результаты электрических и оптических характеристик, позволяют обобщить качественные представления о развитии на начальных стадиях искрового разряда в инертных газах (*He*, *Ar*) ионизационных фронтов, механизмы и скорости их распространения при различных давлениях и энерговкладах.

Здесь же представлена разработанная двумерная осесимметричная модель формирования импульсного объемного разряда в инертных газах высокого давления, учитывающая нелокальную зависимость первого коэффициента Таунсенда от напряженности электрического поля. Исследовано влияние начальных параметров на особенности формирования разряда. Показано, что формирование объемного разряда происходит в процессе развития одной катодонаправленной волны ионизации, а наличие микронеоднородностей на поверхности катода может быть причиной формирования СДР. Установлено, что введение нелокальных поправок приводит к увеличению скорости волны ионизации, а такие, например, интегральные характеристики как полный ток разряда изменяются незначительно, и с приемлемой точностью могут рассчитываться в рамках локального подхода.

В четвертой главе диссертации исследованы спектральные характеристики импульсных разрядах инертных газов атмосферного давления.

В частности, изучены особенности оптического излучения импульсного объемного разряда в гелии высокого давления, а именно в режиме однородного горения, в режиме перехода ОР в искровой канал и в режиме перехода ОР в СДР.

Изучен временной характер формирования и развития спектрального состава излучения самостоятельного объемного разряда в гелии и выявлены наиболее интенсивные спектральные линии исследуемого газа (*He*) и материала вещества электродов (*Fe*), возбуждаемые в разряде в области спектра (300–800 нм). Показано, что с увеличением энерговклада в разряд растет как относительная интенсивность спектральных линий, так и возбуждаются в разряде новые спектральные линии исследуемого газа (*He*) и материала вещества электродов (*Fe*).

В пятой главе подробно изучена динамика формирования и исследовано оптическое излучение сильноточных импульсных разрядов в инертных газах высокого давления. Показано, что в процессе перехода

объемного разряда в искровой канал и в СДР, в спектре прикатодной плазмы зажигаются новые линии материала вещества электродов. Изучено влияние перенапряжения на интенсивность (в отн. ед.) спектра излучения прикатодной плазмы (линий материала вещества катода).

В заключении диссертации сформулированы основные результаты и выводы работы.

Научная новизна исследования. Большинство результатов исследования являются оригинальными и получены впервые. Выполнено моделирование импульсного разряда на основе двумерной осесимметричной модели с учетом нелокальности ионизационных и дрейфовых характеристик электронов. Получены количественные данные о динамике изменения напряжения и тока разряда, концентрации электронов и ионов, распределения потенциала, фотоэлектронной и ион-электронной составляющих тока вторичной эмиссии с катода, и энергии, вводимой в промежуток. Установлено, что формирование объемного разряда происходит в процессе развития одной катодонаправленной волны ионизации, а наличие микронеоднородностей на поверхности катода могут быть причиной формирования СДР. Показано, что учет нелокальности приводит к росту напряженности электрического поля на фронте волны ионизации и ее скорости.

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

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

Основные результаты и выводы диссертации являются **достоверными и обоснованными**, что подтверждается использованием быстродействующего оборудования и современных приборов, тщательностью проведения экспериментов и учета погрешностей, согласием с имеющимися экспериментальными данными других авторов, опорой на современные физические представления. Результаты численного моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментальными результатами.

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, а также в организациях, разрабатывающих и изготавливающих приборы, работа которых зависит от параметров электрического разряда в газе при давлении порядка 1 атмосферы (высоковольтные быстродействующие коммутаторы, газовые лазеры), в

частности, в Объединенном институте высоких температур РАН, в Санкт-Петербургском, Мордовском, Петрозаводском и Дагестанском государственных университетах, Институте Общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Московском физико-техническом институте.

В целом, можно сказать, что автором проведено достаточно подробное исследование газового разряда в инертных газах с использованием широкого спектра диагностических методик. Проанализированы основные параметры плазмы сильноточного разряда. Представленную диссертационную работу можно отнести к разряду, к сожалению, немногочисленных на сегодняшний день экспериментальных работ высокого класса.

По работе необходимо сделать следующие **замечания**:

1. Учет нелокальности в численном моделировании основан на приближенных моделях, предложенных в работах других авторов, а экспериментальные подтверждения этих моделей, полученные в диссертационной работе, являются косвенными.

2. В диссертации автор говорит о наличии автоэмиссии в процессе разряда (например, стр. 116), но при этом проводит численное моделирование с учетом только ион-электронной эмиссии. Целесообразно было бы указать при каких условиях вторичная эмиссия электронов преобладает над автоэмиссией.

3. В диссертации не уделено достаточно внимания методике измерения начальной концентрации электронов, рождаемых УФ-излучением перед началом формирования разряда. Следует отметить, что вопрос влияния начальной концентрации электронов и ее распределения по объему разрядной камеры на исследуемый процесс развития разряда не затрагивается.

4. В главе 5 утверждается, что при формировании катодного пятна выделяется значительное количество энергии, что приводит к формированию сферической ударной волны, способной вызывать дополнительную ионизацию. То же, как утверждается, справедливо и для канала СДР, порождающего цилиндрическую ударную волну. К сожалению, в эксперименте не зарегистрировано распространение ударной волны, но для подтверждения этого предположения было бы к месту оценить число Маха ударной волны, а также величины расстояний, на которых ударная волна формируется и затухает.

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

Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации.

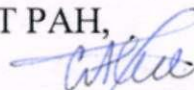
Доклад **Али Рафид Аббас Али** по содержанию и результатам представленной диссертации был заслушан и обсужден на заседании научного семинара Научно-исследовательского центра электрофизики и

тепловых процессов ОИВТ РАН под руководством академика Сона Э.Е.

По результатам обсуждения было принято следующее заключение. Несмотря на отмеченные недостатки, считаем, что диссертационная работа **Али Рафид Аббас Али «Нелокальные ионизационные и волновые процессы в импульсных разрядах атмосферного давления»** выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Результатом работы имеют значение для физики плазмы и для электроэнергетики. Диссертация **«Нелокальные ионизационные и волновые процессы в импульсных разрядах атмосферного давления»** соответствует критериям, «Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г.», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор **Али Рафид Аббас Али** заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 - Физическая электроника.

Отзыв составлен заведующим лабораторией №4.1.3. – экспериментальных и теоретических исследований горения Научно-исследовательского центра электрофизики и тепловых процессов ОИВТ РАН, кандидатом физико-математических наук Савельевым Андреем Сергеевичем.

Заведующий лабораторией 4.1.3 НИЦ-4 ОИВТ РАН,
к.ф.-м.н.



А.С. Савельев

Подпись Савельева А.С. и сведения удостоверяю.
Учёный секретарь ОИВТ РАН,
д.ф.-м.н.



Р.Х. Амиров

Почтовый адрес: Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2.

Телефон: (495) 485-90-09, (495) 484-17-33

Адрес электронной почты: amirovravil@yandex.ru