

## Отзыв

официального оппонента Попова Олега Алексеевича 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».

Диссертационная работа Али Рафид Аббас Али посвящена экспериментальному и теоретическому изучению нелокальных процессов, протекающих в импульсных высоковольтных наносекундных разрядах высокого давления в инертных газах. Она лежит в русле исследований в области физики высоковольтного импульсного пробоя, проводимых на физическом факультет Дагестанского государственного университета с начала 70-х годов прошлого века.

Тема диссертации представляется актуальной не только из-за научной ценности полученных в ней результатов исследования механизмов формирования ударных волн, распространяющихся из области расширяющегося катодного пятна по слабоионизованной плазме высокого давления. Она актуальна и потому, что результаты исследований соискателя могут быть использованы для разработки и оптимизации мощных разрядных газовых лазеров и плазмохимических реакторов. Результаты исследования формирования объемного разряда (ОР) высокого давления, возникающего на начальной стадии пробоя, и условий «предотвращения» его контрагирования и перехода в сильноточный диффузный разряд (СДР) могут быть использованы при разработке импульсных тиратронов и коммутаторов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 169 наименований. Объем диссертации – 159 страниц, включающих 43 рисунка и 14 таблиц.

Во **введении** соискатель приводит убедительные аргументы в пользу актуальности темы его диссертации, определяет объект исследования, формирует поставленные задачи, приводит основные положения работы, выносимые на защиту, обосновывает научную новизну и практическую ценность результатов диссертации.

**Первая глава** диссертации содержит подробный анализ экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованиям трех стадий импульсного пробоя: лавинной, стримерной и искровой. Проведено обсуждение работ по приэлектродным процессам, в частности, их

роли в формировании ударной волны и искрового канала. Подробно обсуждены работы, изучавшие роль предионизация газа в зажигании и формировании объемного разряда, приведены аналитические модели, описывающие на основе различных представлений (ионизационные фронты, стример) начальные стадии пробоя. В конце первой главы приводятся результаты экспериментальных исследований электрических и излучательных характеристик плазмы объемного и диффузного разрядов.

**Вторая глава** диссертации посвящена описанию объекта исследований, экспериментальной установки и методик измерения электрических, спектральных и излучательных характеристик импульсных наносекундных высоковольтных разрядов в инертных газа высокого давления. Приведено подробное описание схемы генератора импульсного напряжения и методики регистрации пространственно-временного развития разряда.

В **третьей главе** приведены результаты исследования влияния начальных условий (напряженности электрического поля, давления инертного газа, плотности разрядного тока) на пространственно - временную динамику формирования и развития импульсного разряда и его различных стадий в инертных газах (гелий, аргон) высокого давления 1-5 атм в разрядной камере с межэлектродным расстоянием 1 см. Исследуется роль процессов на электродах и в приэлектродных слоях, в частности роли катодного пятна, на возникновение и развитие контракции.

В этой же главе излагается предложенная диссертантом двумерная осесимметричная модель пространственного распределения параметров импульсного разряда с предварительной ионизацией газа высокого давления. Модель описывает начальные стадии формирования низкотемпературной плазмы газового разряда, включая структур катодного и анодного слоев. Проведены расчеты пространственно-временного распределения напряженности поля и концентрации электронов в разрядном промежутке с учетом и без учета нелокальности ионизационных и дрейфовых процессов.

В **четвертой главе** диссертации по результатам измерений был рассчитан энерговклад в разряд в процессе его развития для разных значений напряженности электрического поля. Проведены расчеты проводимости, температуры электронов и частот столкновений заряженных частиц между собой и с нейтральными атомами. Установлен критерий определения слабо- и сильно-ионизованной плазмы. Там же проведены измерения спектрального состава оптического излучения плазмы и приэлектродных слоев импульсного наносекундного разряда в гелии в режиме объемного разряда однородного горения и перехода его в искровой канал, либо в сильноточный диффузный разряд. Обнаружены спектральные линии излучения не только атомов

рабочего газа (гелия), но и материала катода (железо) на длинах волн от 337 до 925 нм. Показано, что интенсивность спектральных линий растет с увеличением межэлектродного напряжения.

Установлено, что появление в спектре разряда линий железа связано с процессами на электродах, обуславливающих переход режима разряда от объемного в контрагированный. разряд. На основании полученных в работе результатов соискатель высказывает предположение, что появление в разрядном промежутке атомов материала электродов и, соответственно, спектральных линий излучения его атомов, связано со взрывными процессами на катоде, эмиссией или эрозией электродов.

**Пятая глава** диссертации посвящена исследованию сильноточных диффузных разрядов высокого давления в инертных газах: динамики их формирования, кинетических процессов и спектров оптического излучения. Обсуждаются условия, выполнение которых позволяет предотвратить переход объемного однородного разряда в контрагированный искровой разряд и создать однородный по диаметру разрядного промежутка сильноточный диффузный разряд. В диссертации экспериментально показано, что при большой величине запасенной энергии  $CU^2/2 \geq 1$  Дж и значительных перенапряжениях объемный разряд в гелии преобразуется в сильноточный диффузный разряд с удельной мощностью  $\sim 10^6$  Вт/см<sup>3</sup>, плотностью тока  $\sim 10^2-10^3$  А/см<sup>2</sup>, концентрацией электронов  $\sim 10^{16}$  см<sup>-3</sup> и температурой  $\sim 1-2$  эВ. Основным механизмом ионизации диссертантом полагается ступенчатая ионизация, а механизмом гибели электронов - диссоциативная рекомбинация.

В пятой главе, в рамках сферически симметричной модели СДР получены аналитические выражения, позволяющие проводить расчет радиуса плазмы катодного пятна и скорости его расширения, результаты которого удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

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

#### **Замечания к диссертационной работе**

1. Из рис. 3.2.2 (б) и из сопровождающего его текста (стр. 74-75) неясно, каким значениям времени развития разряда соответствуют пространственно-временные картины, обозначенные как 1, 2, 3, 4 и 5.
2. Как следует из рис. 4.3.3, при  $U > 10$  кВ интенсивность атомарных линий 587,6, 508,5 и 728 нм весьма резко возрастает с увеличением прикладываемого к промежутку напряжения  $U$ , примерно так же, как

интенсивности линий атома гелия 471, 501.6, 668 нм. В диссертации не указывается, что дают результаты сопоставления различного характера зависимостей интенсивностей излучения этих двух «групп» длин волн от напряжения горения разряда для понимания процессов на катоде и в прикатодной области.

3. На стр. 113 приводится фраза: «Температура катодного пятна, оцененная по относительной интенсивности спектральных линий материала катода, составляет 1-2 эВ». То есть, температура поверхности железного катода достигала 23 тыс. градусов?!... Может быть, речь идет о температуре электронов?
4. Сделанное диссертантом предположение о роли эмиссии в появлении в объеме разрядной камеры атомов материала катода (железа) желательнее подкрепить экспериментальными данными. Неясно также, о какой эмиссии идет речь.
5. Как в модели разряда (§ 3.4) учитываются микронеоднородности на катоде?
6. В тексте диссертации и в подписях к рисункам встречаются описки и жаргонные и по существу некорректные выражения. Например, в подписях к рис. 4.1.2 и 4.1.3 вместо слова «мощность» написано «скорость энерговыклада»; по тексту диссертации «гуляет» выражение «прикладываемое поле», вместо «напряженность электрического поля».

Однако, приведенные выше замечания носят частный характер, не снижают значимости и ценности полученных диссертантом результатов и не влияют на общую положительную оценку работы.

Диссертационная работа Али Рафид Аббас Али «Нелокальные ионизационные и волновые процессы в импульсных разрядах атмосферного давления» является законченной научно-исследовательской квалификационной работой, в которой проведены серьезные экспериментальные и теоретические исследования процессов в импульсных наносекундных разрядах в инертных газах высокого давления 1-5 атм.

Научные положения диссертации базируются на корректно сформулированных допущениях и использованных в работе математических методов исследования. Достоверность ее результатов подтверждается корректным использованием широко применяемых экспериментальных методик, а также качественным совпадением результатов численных расчетов с результатами измерений.

Содержание диссертационной работы полностью соответствует ее названию и специальности 01.04.04 - «Физическая электроника». Диссертация написана логичным, аргументированным и ясным языком. Автореферат соответствует содержанию диссертации и отражает ее основные положения. Основные результаты диссертации в полной мере отражены в 16 научных статьях, 6 из которых опубликованы в журналах из перечня ВАК, и докладывались на отечественных и международных конференциях.

На основании изложенного считаю, что представленная к защите диссертационная работа **«Нелокальные ионизационные и волновые процессы в импульсных разрядах атмосферного давления»** удовлетворяет требованиям, установленным п. 9 «Положения о присуждения учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Али Рафид Аббас Али заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника».

Официальный оппонент

доцент, доктор технических наук,

профессор кафедры светотехники Попов Олег Алексеевич

[popovoleg445@yahoo.com](mailto:popovoleg445@yahoo.com). 8-905-795-9283



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский университет «МЭИ». 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная 14.  
+7-495-362-7560. e-mail: [universe@mpei.ac.ru](mailto:universe@mpei.ac.ru)

Подпись профессора кафедры светотехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Национальный исследовательский университет «МЭИ», доктора технических наук, доцента Попова Олега Алексеевича удостоверяю,



