

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу *Коковина Александра Олеговича* «Динамика электрического пробоя в газах повышенного давления в условиях высокой пространственной неоднородности электрического поля» представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13 – электрофизика, электрофизические установки

Актуальность темы.

Физика неравновесной плазмы газового разряда в настоящее время является одной из перспективных и развивающихся областей современной науки. Неравновесная низкотемпературная плазма широко используется в различных газоразрядных приборах и технологических процессах.

Газоразрядной плазме присуща высокая нелинейность и нестационарность процессов, что часто приводит к невозможности сформулировать строгую математическую модель. С одной стороны, сказывается ограниченность вычислительных ресурсов, что приводит к искусственному ограничению количества плазмохимических реакций и искажению результатов. С другой стороны, полная кинетическая схема в большинстве случаев оказывается избыточной и даже перегруженной, затрудняя анализ результатов расчёта. Решением вышеописанных проблем является *оптимизация* кинетической схемы: определение наиболее важных компонент плазмы и элементарных реакций с их участием.

Особый интерес представляют исследования динамики развития пространственной структуры разряда при различных профилях поверхности катода, поскольку такие системы дают возможность управлять параметрами плазмы под конкретные технологические требования.

Диссертация Коковина Александра Олеговича посвящена выявлению ключевых закономерностей электрического пробоя в газовых диодах на базе континуального описания многожидкостной электродинамики заряженных частиц. В этой связи, **актуальность темы диссертации не вызывает сомнений** как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения.

Остановимся на содержании диссертационной работы.

Диссертационная работа имеет структуру, соответствующую рекомендациям ВАК. Она состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Суммарный объём диссертации составляет 130 страниц и включает 54 рисунка и 7 таблиц. Список литературы содержит 179 наименований

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируются цель и задачи работы, приводятся её научная новизна и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор электрических разрядов в газоразрядных промежутках высокого давления с резко неоднородным распределением электрического поля. Описаны различные режимы отрицательного коронного разряда в воздухе высокого давления. Представлены основные методы теоретического описания низкотемпературной плазмы газового разряда, показаны их преимущества и недостатки.

Во второй главе дано описание гидродинамической модели плазмы нестационарного коронного разряда высокого давления, которая позволяет в деталях описать пространственно–временную структуру разряда, плазмохимическую кинетику всех заряженных компонент плазмы, а также эволюцию самосогласованного электрического поля. Сформулирована оригинальная схема плазмохимических реакций в искусственном воздухе (80% N₂ – 20% O₂) высокого давления и показана обоснованность данной кинетической схемы для описания нестационарного газового разряда с высокой неоднородностью электрического поля.

Описаны методы решения системы эллиптических дифференциальных уравнений массопереноса через линеаризацию методом конечных элементов и оптимальную дискретизацию пространства через триангуляцию Делоне. Описаны методы решения системы линейных алгебраических уравнений с использованием LU-факторизации. Для решения задачи зажигания газового разряда автором было выбрано COMSOL Multiphysics.

Верификационные расчеты подтверждают применимость модели к описанию быстропротекающих процессов в плазме газового разряда атмосферного давления. Исследовано формирование и распространение субмикросекундного стримера в неоднородной геометрии «острие-плоскость», получены коммутационные характеристики разряда при разных давлениях газа. Показано, что в данной конфигурации образуется нетривиальная структура разряда, с двумя областями ионизации и областью дрейфа между ними. Такая структура обеспечивает появление вторичных волн ионизации, что приводит к задержке между примыканием канала и минимумом спада напряжения.

В рамках «гибридного подхода» для газового диода с сетчатым катодом рассмотрен процесс субнаносекундного пробоя. Получены временные профили напряжения и тока разряда. Показано, что коммутация происходит на переднем фронте импульса напряжения. Изучена динамика формирования разряда и его скорость продвижения, соответствующая критерию Лозанского-Фирсова.

В третьей главе в рамках задачи о пробое высоковольтного искрового разрядника в воздухе высокого давления было рассмотрено зажигание и формирование стационарного коронного разряда в различных конфигурациях газонаполненного диода. Моделирование проводилось в различных пространственных геометриях задачи.

Показано, что в неоднородном электрическом поле реализуется структура классического коронного разряда, состоящая из области ионизации вблизи потенциального электрода с высокими значениями электрического поля и характерный размер которой примерно ~ 2 раза, превышает радиус скругления электрода, и области дрейфа в остальном промежутке, ширина которой в ~ 50 раз больше области ионизации. Воздушная плазма стационарного коронного разряда состоит из положительных ионов O_4^+ и отрицательных ионов O_2^- , а протекание тока в пространстве дрейфа обеспечивается ионами. Профиль тока разряда подчиняется соотношению $I(t) \sim U^2(t)$, что говорит о самоограничении тока. Показано, что при скоростях роста $dU/dt \sim 2-10$ кВ мкс $^{-1}$ электрическое поле в зоне проводимости успевает выровняться, что говорит о формировании стационарного коронного разряда, а при скоростях роста $dU/dt \geq 10$ кВ мкс $^{-1}$ происходит искровой пробой промежутка.

В четвертой главе проведено исследование импульсно-периодического режима коронного разряда в газоразрядном промежутке с неоднородной геометрией типа «острие-плоскость».

Показано, что первой реализуется предпробойная стадия, которая характеризуется плавным ростом напряжения на промежутке и формированием нескомпенсированного пространственного заряда. Вторая стадия определяется быстрым ростом плотности плазмы вблизи острейного электрода и формированием первого импульса тока, за которым следует частотно-импульсная последовательность импульсов Тричела. Анализ показал, что длительность данной стадии определяется скоростью роста напряжения на промежутке, а характеристики импульсов Тричела претерпевают дрейф в течение одной последовательности вплоть до их прекращения. При изменении напряжения на источнике характеристики импульсов Тричела практически не изменяются.

Приведенный диссертантом анализ показал, что прикатодный слой в стационарном коронном разряде проявляет признаки особого (нестандартного) режима функционирования, который явно обусловлен сильно неоднородной геометрией. Увеличение скорости роста напряжения на промежутке приводит к росту тока коронного разряда и резко изменяет механизм формирования плазмы у острия с лавинного на стримерный. Исследования показали, что при скорости роста $\sim 3,0$ В·нс $^{-1}$ в коронном

разряде может реализоваться режим с образованием двух последовательных разнонаправленных стримеров. При формировании первого катода направленного стримера происходит образование положительного выброса тока субнаносекундной длительности, за которым следует отрицательный выброс тока, характеризующий анода направленный стример.

В **пятой главе** детально исследован механизм зарождения и распространения апокампиического разряда в электроотрицательных газах атмосферного давления.

Показано, что тонкий филамент на изгибе плазменного канала представляет собой положительный стример, растущий от неоднородности плазменной границы, вблизи которой электрическое поле превышает пробивные значения. Пороговый уровень напряженности поля для начала роста апокампа примерно равен $\sim 2 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$, что с учетом разницы геометрий задачи соответствует экспериментам. При высоких напряжениях превышение критического значения электрического поля и интенсивная ионизация происходят сразу в нескольких областях около неоднородной плазменной границы. Отмечается, что в этом случае образуется структура множественных отростков, стремящихся к плоскому аноду. Наличие нескольких отростков, расположенных близко друг к другу, приводит к их взаимному отталкиванию. Приведенный диссертантом анализ показал, что скорость продвижения отростков неодинакова: большая скорость присуща тем отросткам, направление движения которых перпендикулярно плоскому аноду. При более высоком напряжении на промежутке наблюдается увеличение средней скорости продвижения апокампа в несколько раз.

В **заключении** перечислены основные результаты диссертационной работы.

Научная новизна работы.

Разработана оригинальная физико–математическая модель низкотемпературной плазмы электрического разряда в воздухе, в рамках которой были проведены исследования слабых режимов горения разряда высокого давления с резко неоднородным распределением электрического поля. Модель позволяет рассчитать пространственно–временную динамику газоразрядной плазмы и самосогласованного электрического поля и выяснить ключевые закономерности различных режимов.

Показано, что в неоднородной геометрии электродов «острие–плоскость» образуется нетривиальная структура разряда, состоящая из двух областей ионизации и расположенной между ними области дрейфа. Такая структура обеспечивает появление вторичных волн ионизации, которые приводят к задержке между переключением канала и минимумом спада напряжения, наблюдаемой в эксперименте.

Теоретически обосновано, что при увеличении скорости роста напряжения на промежутке «острие–плоскость» приводит к росту тока коронного разряда и резко изменяет механизм формирования плазмы у острия с лавинного на стримерный. Это выражается в генерации биполярного импульса тока разряда с положительным всплеском субнаносекундной длительности на переднем фронте.

Установлено, что тонкий филамент на изгибе плазменного канала (апокампиического разряда), представляет собой положительный стример, растущий от неоднородности плазменной границы, а несимметрия стартового филамента, как следствие, порождает асимметрию распределения электрического поля на плазменной границе, что со временем дает старт новым отросткам.

В целом диссертационная работа Коковина А.О. выполнена на высоком научном уровне, в ней получен большой объем новой и важной информации, достоверность которой не вызывает сомнения.

С точки зрения оппонента изюминкой работы является результаты теоретического исследования механизма зарождения и распространения апокампиического разряда в электроотрицательных газах атмосферного давления

Практическая значимость работы.

Развитая модель позволяет детально исследовать режимы зажигания слабых

газовых разрядов и рассмотреть их пространственно–временную структуру при вариации условий задачи. Полученные результаты могут найти применение в разработке и конструировании электротехнических приборов на основе коронного разряда.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов обеспечивается использованием автором апробированных численных алгоритмов решения математических уравнений, а также внутренней непротиворечивостью полученных результатов, которые хорошо согласуются с выводами работ других исследователей, полученных в рамках иных теоретических методов и подходов. Существенным обстоятельством также является удовлетворительное согласие результатов расчетов с известными экспериментальными данными.

Апробация. Характеризуя диссертацию в целом, следует отметить, что она выполнена на **высоком научном уровне**. При этом диссертант проявил себя исследователем, способным анализировать и находить подходы к решению сложных проблем. Основные результаты по теме диссертации изложены в 21 печатном издании, в том числе 7 изданы в авторитетных рецензируемых журналах, включённых в Перечень ВАК, 18 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 12 — в трудах конференций.

Публикации отражают основные положения диссертационной работы и позволяют подтвердить личный вклад Коковина А.О.

Автореферат правильно и достаточно полно отражает основное содержание диссертационной работы. Отмечая общий высокий научный уровень диссертационной работы, следует сделать следующие **замечания**:

1. В диссертации представлена кинетическая модель с учетом фотоионизации, но не уточняется механизм такой реакции для азота N_2 как в чистом газе, так и для смеси N_2 - O_2 . Для фотоионизации O_2 достаточно наличие N_2 так как он имеет электронно возбужденный уровень с энергией больше потенциала ионизации O_2 . В чистом же азоте фотоионизация возможна через излучения электронно-возбужденного иона N^{*+} , полученного в результате реакции $N_2 + e \rightarrow N^{*+} + N + 2e$ с последующим излучением $N^{*+} \rightarrow N^+ + h\nu$. Такой механизм рассматривался или другой? Кроме указания самого механизма фотоионизации N_2 следовало бы привести соответствующие константы для уравнения (2.48).
2. При моделировании субмикросекундного разряда не учитывается ступенчатая и пеннинговская ионизации. В тоже время есть ряд работ (например, A. Sobota, F. Manders, E. M. van Veldhuizen, J. van Dijk, and M. Haverlag, IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 38, no. 9, pp. 2289–2299; Dmitry V. Tereshonok, Natalia Yu. Babaeva, Georgy V. Naidis, Artem G. Abramov, and Aleksandr V. Ugryumov IEEE Trans. Plasma Sci. vol. 50, no. 3, pp. 580–586) где показано, что учет этих процессов в положительном столбе стримера на субмикросекундных временах при атмосферном давлении может приводить к увеличению концентрации электронов на порядок.
3. При моделировании субнаносекундных разрядов используется BOLSIG+, который выполняет расчет в стационарного, локального кинетического уравнения Больцмана в двучленном приближении. Следовало бы привести оценки и показать на сколько данное приближение подходит, особенно в области низких давлений.
4. В работе сформирована и протестирована оптимальная схема плазмохимических реакций для искусственного воздуха ($N_2:O_2=4:1$) и разработана физико–математическая модель газоразрядной плазмы, в рамках которой были проведены исследования слаботочных режимов горения разряда высокого давления с резко неоднородным полем. Следовало бы указать границы применимости указанной схемы.
5. В диссертации не уделяется внимание вопросу распыления материала электродов и их влияние на кинетику процессов в приэлектродной зоне разряда. Насколько это не существенно?

Указанные замечания не снижают общую значимость работы, не затрагивают сущность защищаемых положений, а также основных результатов, полученных в ходе выполнения работы, и не влияют на общую высокую оценку диссертации.

Заключение

Диссертационная работа, выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной, практической ценностью, является самостоятельной и законченной научно-исследовательской работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне. В своей диссертационной работе автор продемонстрировал высокий уровень владения методами численного моделирования. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи' имеющей как научное, так и практическое значение.

Диссертация Коковина Александра Олеговича «Динамика электрического пробоя в газах повышенного давления в условиях высокой пространственной неоднородности электрического поля» полностью соответствует паспорту специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки и требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года с дополнениями от 21 апреля 2016 года № 335, а его автор Коковин А.О. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки.

Официальный оппонент

Кандидат физико–математических наук, доцент кафедры общей физики,
заместитель декана физического факультета по учебной работе ФГБОУ ВО
«Дагестанский государственный университет»
367000, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева 43а,
Телефон: +8 9640016446

e-mail: gb-r@mail.ru

 Рагимханов Гаджимирза Балагланович

«14» 11 2023 г.

Подпись Рагимханова Г.Б. удостоверяю,

Секретарь Ученой совета ДГУ





Омарова З.У.