

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор АО ГНЦ РФ
«Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»



К. И. Ильин

2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»
на диссертацию 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

Высоковольтные разряды в газах атмосферного давления издавна привлекают внимание исследователей, так как они лежат в основе как природных явлений (молния, огни Святого Эльма), так и широкого круга технических приложений (электрофильтры, ионизаторы воздуха, озонаторы, плазменная обработка поверхностей и т.п.). Интерес исследователей к высоковольтным разрядам объясняется, прежде всего, возможностями их практического использования, обусловленными широким спектром физических и химических процессов, протекающих в этих разрядах. В этой связи можно упомянуть мощные импульсные источники УФ излучения на основе таких разрядов, применяемые для накачки газовых лазеров и скоростной спектроскопии, а также используемые в медицинских и биологических целях и т.д.

Ключевую роль в работе газоразрядных устройств играет начальная стадия развития разряда – электрический пробой газонаполненного промежутка. Способы реализации пробоя в практической деятельности характеризуются большим разнообразием, что обусловлено различием физических условий в каждом конкретном устройстве. В таком случае от разработчиков требуется глубокое понимание сложных фундаментальных процессов, определяющих развитие пробоя, чтобы подобрать наиболее оптимальную конструкцию газоразрядного устройства и параметры его эксплуатации для решения конкретной практической задачи. При этом, важное значение в понимании общих закономерностей пробоя придается расчетно-теоретическим методам исследования.

Газоразрядной плазме, формирующейся в процессе пробоя, присуща высокая степень нелинейности и нестационарности происходящих в ней явлений, что делает разряд трудным объектом как для экспериментальных, так и для теоретических исследований. Однако в последнее время современные вычислительные средства (техника и алгоритмы) позволили существенно расширить область задач, доступных

теоретическим методам, включая и моделирование процесса пробоя. По этой причине диссертационная работа, направленная на применение современных методов физической кинетики для корректного описания неравновесного процесса электрического пробоя в широком диапазоне давлений газа и коротких длительностей импульса приложенного напряжения, несомненно, является актуальной.

Оценка результатов работы и её завершенности

Представленная диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 130 страниц текста, 54 рисунка, 7 таблиц и библиографический список из 179 наименований.

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

Первая глава дает обзор электрических разрядов высокого давления с резко неоднородным распределением электрического поля. Подробно описаны различные режимы коронного разряда в воздухе высокого давления с отрицательной полярностью острейшего электрода. Представлены основные методы теоретического описания низкотемпературной плазмы газового разряда, отмечены их преимущества и недостатки.

Вторая глава (самая большая по объему) посвящена подробному описанию жидкостной модели плазмы нестационарного коронного разряда высокого давления, которая позволяет в деталях описать пространственно–временную структуру разряда, плазмохимическую кинетику заряженных компонент плазмы, а также самосогласованную эволюцию электрического поля. В этой главе обоснован выбор схемы плазмохимических реакций в воздушной плазме, отработаны и оптимизированы алгоритмы численного решения системы уравнений в частных производных, и проведены тестовые расчеты быстрых (субмикросекундного и субнаносекундного) разрядов в электродных системах с высокими градиентами плотности заряженных частиц. Фактически, здесь продемонстрированы все особенности и проблемы, возникающие при теоретическом моделировании быстро протекающих и сильно неоднородных электродинамических процессов, сопровождающих электрический пробой газоразрядного промежутка.

Обычно для моделирования разряда в воздухе приходится учитывать более сотни реакций с десятками сортов частиц, что предполагает использование для расчетов достаточно мощных компьютеров. Однако автор был сильно ограничен имеющимися в его распоряжении вычислительными возможностями, и поэтому при формировании полной схемы химических реакций ему пришлось провести сокращение числа сортов частиц и элементарных реакций. Эта задача нетривиальная и потребовала от него творческих усилий по изобретению приемов, обеспечивающих формулировку модели, оптимальную как по затратам расчетного времени, так и по точности получаемых результатов. В частности, автор опустил в теоретической схеме наличие возбужденных атомно-молекулярных частиц. Однако, их отсутствие было скомпенсировано модификацией скоростей некоторых реакций, обеспечивающих правильный порядок средней энергии электронов и скорости ионизационных процессов, о которых имеются надежные данные. Этот метод оптимизации плазмохимической схемы, отраженный в 1-ом защищаемом положении, является несомненной заслугой автора и его (метод оптимизации) можно отнести к положительным результатам исследовательской работы.

Третья глава посвящена моделированию работы высоковольтного коммутатора с лезвийным катодом, заполненного воздухом высокого давления (1–5 атм). В этом приборе использовалось зажигание слаботочного коронного разряда для выравнивания электрического поля на острой кромке, что обеспечило стабилизацию времени перехода разряда в сильноточную стадию искрового пробоя. Мотивом к теоретическому исследованию такого разряда послужила практическая необходимость оптимизации характеристик реального электрофизического устройства – сильноточного коммутатора. Конкретным результатом проведенного прикладного исследования стали рекомендации по уменьшению времени запаздывания искрового пробоя и кратному повышению частоты стабильной работы коммутатора.

В **четвёртой главе** (самой содержательной в научном плане) проведено тщательное и детальное теоретическое исследование нестационарного режима коронного разряда в воздушном газоразрядном промежутке с типичной геометрией «острие–плоскость». Оно показало, что при плавном росте напряжения на промежутке, которое обеспечивается включением в электрическую схему малой балластной ёмкости (до 100 пФ) и большого балластного сопротивления (0.1–10 МОм), отчётливо наблюдаются несколько (до 4-х) последовательных стадий развития разряда.

Следует отдать должное автору и считать его серьезным научным достижением то, что все стадии горения разряда (от темновой к импульсно-периодической и далее к стационарной) ему удалось просчитать в рамках одного расчета и с использованием одной модели плазмы. При этом, кроме стандартных временных профилей тока и напряжения, его расчет дал пространственно-временное распределение заряженных компонентов плазмы (свободных электронов, четырех сортов положительных и отрицательных ионов), а также напряженности электрического поля. Эти распределения являются важной научной информацией, необходимой для понимания механизма функционирования разряда в разных его стадиях. Вариация параметров исследуемой электрической цепи позволила автору выявить ранее неизвестные особенности, такие как быстрая реперолюсовка разрядного тока на начальной стадии пробоя.

В **пятой главе** (самой богатой по иллюстративному наполнению) представлены результаты моделирования процесса зарождения и распространения тонкого плазменного филамента, формирующегося в открытой геометрии разряда в электроотрицательных газах атмосферного давления. Эта форма разряда именуется его первооткрывателями как «апокампа». Результаты теоретического моделирования показали, что тонкий филамент, растущий от места изгиба плазменного канала, представляет собой канал положительного стримера. В эксперименте этот канал визуализируется в импульсно-периодическом режиме питания разряда.

Полученные автором в расчете количественные данные об апокампе хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Так, пороговый уровень напряженности поля для зарождения и роста апокампа в расчете равен ~ 2 кВ/см, а расчетная скорость движения волны ионизации в стримерном канале ~ 25 км/с, что не противоречит типичным экспериментальным данным.

Надо отметить, что еще до расчетов автора уже были работы других исследователей по численному моделированию апокампа, однако они проводились в рамках осесимметричной задачи. В то же время, в экспериментах в большинстве случаев реализуется несимметричная форма апокампа, которая более трудна для расчетов. Автор диссертации является первым, кто провел расчет несимметричной формы апокампа в рамках детерминированной жидкостной модели. При этом внешний вид основания единичного (одноканального) филамента, полученный в расчетах,

хорошо совпадает с реально наблюдаемой картиной. Заслугой автора является также то, что он впервые воспроизвел в расчете форму многоканального и несимметричного апокампа в хлоре.

В заключении диссертации сформулированы основные выводы работы.

В целом, диссертация выстроена логически последовательно и является завершённой работой, материал изложен грамотным языком и достаточно проиллюстрирован, тематика полностью соответствует специальности 1.3.13 Электрофизика, электрофизические установки.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

Развиваемый автором теоретический подход представляет собой последовательное, чётко сформулированное и обоснованное изложение основных идей и вытекающих из них выводов. Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается использованием и тщательным тестированием современных вычислительных алгоритмов, сопоставлением результатов расчетно-теоретического исследования с экспериментами, а также внутренней непротиворечивостью полученных результатов. Сформулированные научные положения хорошо согласуются с выводами работ других исследователей, полученными в рамках иных теоретических методов и подходов.

Научная новизна полученных результатов

1. Автор сформулировал и обосновал оригинальную схему плазмохимических реакций применительно к разряду в воздухе атмосферного давления, которая позволила ему в рамках ограниченных вычислительных ресурсов получить новые данные о возможных механизмах электрического пробоя в условиях сильно неоднородной геометрии разрядного промежутка.

2. В рамках единой гидродинамической модели были впервые описаны различные режимы горения слаботочного газового разряда в воздухе высокого давления с неоднородным распределением электрического поля. Теория позволяет выявить ключевые закономерности различных режимов и рассчитать внутренние (пространственно-временные распределения заряженных частиц и электрического поля) и внешние (ток и напряжение во внешней цепи разряда) характеристики нестационарных процессов.

3. Впервые сформулирована и реализована теоретическая модель зарождения и формирования тонкого плазменного филамента в открытом атмосферном разряде с несимметричной геометрией задачи, которая позволила описывать также и многоканальные формы такого разряда. Моделирование выявило, что формирование филамента в импульсно-периодическом разряде проходит по механизму положительного стримера.

Научная и практическая значимость работы

Представленные методы теоретического моделирования позволяют детально исследовать самые разные режимы зажигания газовых разрядов и рассматривать их пространственно-временную структуру при вариациях условий задачи: давление и сорт газа, геометрия промежутка, приложенное напряжение и т. п.

Проведённые исследования дают теоретически обоснованные ответы на многие вопросы, возникающие в технической и экспериментальной практике данных разрядов,

такие как коммутационные характеристики разряда, плазмохимический состав, пространственная структура разряда.

Расчеты работы коммутатора, работающего по принципу выравнивания поля на кромке лезвийного катода, имеют непосредственное практическое значение для последующей модификации конструкции подобных устройств.

Моделирование разнообразных форм горения открытых разрядов (апокамп) открывают новые возможности их использования в практике современных технологий на базе холодной плазмы.

Рекомендации по использованию результатов работы

Результаты, полученные в диссертационной работе А.О. Коковина можно рекомендовать к использованию в организациях, занимающихся исследованием быстропротекающих физических процессов, имеющих место при электрическом пробое газов в электрофизических установках. Этими организациями являются: Институт электрофизики УрО РАН, ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, Институт лазерной физики СО РАН, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет Санкт-Петербургского государственного университета, Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Центральный Аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского, КНИТУ КАИ им. А.Н. Туполева, Национальный исследовательский университет «МИФИ», Национальный исследовательский университет "МЭИ".

Имеются критические замечания:

1. Наибольшее число вопросов возникает к выбору и обоснованию схемы плазмохимических реакций в воздухе (глава 2). Есть, по крайней мере, три дискуссионных момента:

1) В схеме отсутствует молекулярный ион азота N_4^+ , хотя константа трехчастичной реакции $N_2^+ + N_2 + M \rightarrow N_4^+ + M$ довольно высока в исследуемых условиях. Константа диссоциативной рекомбинации иона N_4^+ также высока. Насколько допустимо исключение этого сорта ионов из модели, т.е. к каким последствиям в зарядовой и плазмохимической кинетике может привести неучет иона азота N_4^+ и связанных с ним реакций?

2) Отсутствие в схеме реакций частиц с электронным возбуждением может сильно исказить кинетику электронов, которая определяет скорости всех неупругих процессов с их участием, в том числе и скорость ударной ионизации. Насколько надежно использовать такую схему без учета процессов возбуждения, и какими соображениями руководствовался автор, пренебрегая реакциями частиц с электронным возбуждением?

3) В главе 5 используются очень краткие схемы плазмохимических реакций в чистом кислороде и хлоре. Насколько оправдан столь радикальный подход к плазмохимии, и насколько адекватными при этом получаются количественные результаты? Проводились ли автором какие-либо предварительные оценки по поводу правомочности такого подхода?

2. При расчете коронного разряда в воздухе (глава 3 и глава 4) никак не учитывались эффекты, связанные с изменением температуры газовой среды в области энерговыделения. Известно, что влияние эффектов уменьшения плотности N среды из-за энергии, вложенной разрядом в газ, может радикально изменить скорости элементарных реакций с участием электронов вследствие локального повышения приведенной напряженности электрического поля E/N . Проводились ли какие-либо

тестовые расчеты в этом направлении? Если ДА, то насколько велик эффект, связанный с учетом термического расширения газа?

3. Расчеты скорости продвижения фронта растущего филамента (раздел 5.2) дают величины (35 км/с), которые в несколько раз ниже тех, что наблюдаются в экспериментах (до 120 км/с). Чем может быть обусловлено это сильное различие теоретических и экспериментальных данных?

Сделанные замечания не снижают общей ценности представленных результатов и обоснованность выдвинутых научных положений, замечания носят, по сути, рекомендательный характер с целью их учета при последующих исследованиях.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 21 печатной работе, 8 из которых представляют собой статьи в авторитетных рецензируемых журналах, таких как Письма в ЖЭТФ, ЖЭТФ, Известия вузов - Физика, Energies, Europhysics Letters. Все эти журналы включены в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней кандидата и доктора наук. Результаты проведенных исследований были доложены в качестве научных докладов и опубликованы в трудах международных научных конференций (ISDEV, TELFOR, EFRE, GDP). **Автореферат** адекватно отражает содержание диссертации.

В диссертации соблюдены все требования ВАК (в частности, пп. 9 и 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842). Имеются необходимые ссылки на авторов и источники заимствованных материалов.

Заключение

Исследования, изложенные в диссертации, проведены на высоком научном уровне и свидетельствуют о высокой научной квалификации автора. Диссертация Коковина Александра Олеговича является законченной научно-квалификационной работой, в которой методом теоретического моделирования решен ряд задач по физике высоковольтного пробоя газоразрядных промежутков и достигнуто более глубокое понимание электрофизических процессов, протекающих в газоразрядной плазме. Полученные решения имеют важное практическое значение для широкого круга проблем электрофизики и развития принципов конструирования электрофизических установок, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Коковин Александр Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13 Электрофизика, электрофизические установки.

Отзыв подготовил начальник лаборатории кинетики слабоионизованной плазмы АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», профессор, доктор физико-математических наук (01.04.08 - физика плазмы) Акишев Юрий Семёнович.

Телефон: 8-926-893-0468

Адрес электронной почты: akishev@triniti.ru

Почтовый адрес: 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Солнечная, 8-72



/Акишев Юрий Семенович/

Отзыв обсужден и одобрен на заседании секции №6 "Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования физических процессов в плазме и твердых телах" АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», протокол № 35 от 14.11.2023.

Секретарь секции №6,
кандидат физико-математических наук Кочетов Игорь Валерианович

/Кочетов Игорь Валерианович/

Подписи заверяю

Ученый секретарь Акционерного Общества "Государственный Научный Центр Российской Федерации Троицкий Институт Инновационных и Термоядерных Исследований" (АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ")
Телефон: 8 495 851 88 27

кандидат физико-математических наук Александр Александрович Ежов

/Ежов Александр Александрович/

