

На правах рукописи



**Коковин Александр Олегович**

**ДИНАМИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В  
ГАЗАХ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ В  
УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ  
НЕОДНОРОДНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ**

Специальность 1.3.13.  
Электрофизика, электрофизические установки

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико–математических наук

Томск — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук» (ИСЭ СО РАН).

Научный руководитель: **Козырев Андрей Владимирович**,  
доктор физико–математических наук, заведующий лабораторией теоретической физики ИСЭ СО РАН, профессор

Официальные оппоненты: **Пушкарев Александр Иванович**,  
доктор физико–математических наук, профессор Отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Рагимханов Гаджимирза Балагланович**,  
кандидат физико–математических наук, доцент кафедры общей физики, заместитель декана физического факультета по учебной работе ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный университет»

Ведущая организация: Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (ГНЦ РФ ТРИНИТИ)

Защита состоится 15 декабря 2023 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета 24.1.115.01 при Институте сильноточной электроники СО РАН по адресу: 634055, г. Томск, пр–кт Академический, 2/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭ СО РАН и на сайте <https://www.hcei.tsc.ru/ru/cat/dissertations/dissertations.html>

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук



Г. Ю. Юшков

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Одним из важнейших инструментов изучения окружающей действительности является построение теоретических моделей различных процессов. К современным направлениям теоретического исследования можно отнести моделирование сложных многокомпонентных систем, таких как плазма. Теоретические модели, описывающие широкий круг плазмохимических процессов в газоразрядной плазме, позволяют не только предсказать характер протекания того или иного процесса, но и делать общие выводы о физическом явлении в целом. Это оказывается очень полезным, так как экспериментальные исследования часто ограничены в выборе методик измерения параметров газовых разрядов и газоразрядной плазмы, что приводит к недостаточности экспериментальных данных.

Теоретические модели в большинстве случаев не имеют аналитического решения из-за высокой математической сложности, однако развитие полуаналитических и численных методов позволило существенно расширить область применения теоретического описания. Газоразрядной плазме присуща высокая нелинейность и нестационарность процессов, что часто приводит к невозможности сформулировать строгую математическую модель. Поэтому часто прибегают к упрощённым теоретическим моделям. Несмотря на существенные упрощения, они обладают конструктивной простотой и позволяют проводить необходимые уточнения и обобщения газоразрядных явлений.

На сегодняшний день наиболее распространённым методом описания неравновесной газоразрядной плазмы высокого давления является гидродинамический подход. Данный подход основан на континуальном описании плазмы и оперирует усреднёнными макроскопическими параметрами плазмы (концентрациями и потоками заряженных частиц и их средними энергиями). Гидродинамический подход позволяет описать широкий класс газоразрядных явлений в неравновесной плазме и обладает вычислительной эффективностью и устойчивостью численных алгоритмов.

**Целью** данной работы является выявление ключевых закономерностей электрического пробоя в газовых диодах на базе континуального описания многожидкостной электродинамики заряженных частиц.

Для достижения цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Разработать численную модель самосогласованного описания кинетики заряженных частиц и электрического поля на основе двухмоментного дрейфово-диффузионного приближения уравнений переноса электронов, многокомпонентной диффузионной модели тяжёлых частиц и уравнений для электрического поля с учетом внешней цепи.

2. Оптимизировать кинетическую схему плазмохимических реакций и получить минимально достаточный набор элементарных процессов, позволяющий рассчитывать внутренние (пространственно–временные распределения заряженных частиц и электрического поля) и внешние (ток и напряжение во внешней цепи разряда) характеристики нестационарных процессов.
3. Протестировать и оптимизировать вычислительные алгоритмы на простых задачах зажигания газового разряда.
4. Исследовать режимы горения коронного разряда в неоднородной конфигурации газоразрядного промежутка.
5. Исследовать формирование и распространение тонкого плазменного филамента и выявить причины его ветвления.

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Создана оригинальная физико–математическая модель газоразрядной плазмы, в рамках которой были проведены исследования слаботочных 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.
2. Теоретически обосновано, что при увеличении скорости роста напряжения на промежутке «остриё–плоскость» происходит смена механизма формирования коронного разряда с лавинного на стримерный. Это выражается в генерации биполярного импульса тока разряда с положительным всплеском субнаносекундной длительности на переднем фронте.
3. Доказан стримерный механизм зарождения тонкого светящегося филамента на изгибе плазменного канала (апокампитического разряда), допускающий рост множественных стримерных каналов.

**Теоретическая и практическая значимость.** Развитая модель позволяет детально исследовать режимы зажигания слаботочных газовых разрядов и рассмотреть их пространственно–временную структуру при вариации 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 (коммутационные характеристики разряда, плазмохимический состав, пространственная структура разряда). Полученные результаты могут быть полезны при разработке и совершенствовании технических устройств на основе коронного разряда.

**Методология и методы исследования.** При построении теоретической модели использовался гидродинамический метод описания

плазменных и газоразрядных явлений, реализованный в среде коммерческого лицензионного пакета COMSOL Multiphysics™. Эволюция электронной компоненты описывается в рамках дрейфово-диффузионного подхода с применением двухмоментного приближения. Описание тяжёлых частиц проводится в рамках диффузии многокомпонентной смеси. Линеаризация уравнений проводится методом конечных элементов, применяющий слабую конечно-разностную формулировку метода Галеркина совместно с методами дифференцирования назад.

### Положения, выносимые на защиту:

1. Сформирована и протестирована оптимальная схема плазмохимических реакций для искусственного воздуха ( $N_2 : O_2 = 4 : 1$ ), которая содержит 25 элементарных реакций с электронами и 8-ю сортами тяжёлых заряженных и нейтральных частиц ( $N_2, O_2, N, O, N_2^+, O_2^+, O_4^+, O_2^-$ ). Она позволяет адекватно описать пространственно-временную динамику разряда в воздухе в широком диапазоне давлений без включения в расчеты колебательно-вращательной кинетики молекулярных частиц. Эта схема обладает свойством минимальной полноты, так как удаление любой реакции из схемы приводит к ошибочным прогнозам проводимости и скорости ионизации воздушной плазмы.
2. На базе нестационарной кинетики многокомпонентной плазмы проведен цикл теоретических исследований пространственно-временной эволюции коронного разряда в воздухе высокого давления. В этих исследованиях варьировалась пространственная геометрия задачи (коаксиальная одномерная задача, двумерная плоская задача «лезвие-плоскость», осесимметричная двумерная задача «круглая кромка-цилиндр»), что позволило оптимизировать работу реального разрядника высокого давления ( $pd = 9,2 \text{ атм} \cdot \text{см}$ ), работающего в режиме самопробоя. Показано, что подобные разрядники могут стабильно работать в диапазоне скорости нарастания напряжения от 2 до 10 кВ · мкс<sup>-1</sup>.
3. В рамках одной многожидкостной модели, включающей схему плазмохимических реакций и уравнения электродинамики заряженных частиц, детально описаны последовательные стадии горения коронно-стримерного разряда: инициирование плотной плазмы в области локального усиления электрического поля, нестационарный режим импульсов Тричела и его затухание, повторный пробой и формирование стационарного тлеющего разряда. Физической причиной перехода от импульсного режима к повторному пробую является формирование протяжённого плазменного столба между электродами.
4. На основе плоской несимметричной модели разряда в электроотрицательных газах построена нестационарная теория инициирования

и формирования тонкого плазменного филамента, растущего от изгиба плазменного канала в среде кислорода и хлора. Теоретически доказан стримерный механизм формирования длинных плазменных филаментов. Полученные в расчетах пороговые напряжённости поля (ниже 10 % от напряженности статического пробоя) и скорости прорастания стримерных каналов (десятки  $\text{км} \cdot \text{с}^{-1}$ ) согласуются с экспериментами.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием апробированных численных алгоритмов решения математических уравнений и согласием результатов расчётов с экспериментальными данными и согласованностью теоретических тенденций при изменении условий задач, в том числе с экспериментами и расчётами других авторов.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы представлялись на следующих международных конференциях:

1. 26<sup>th</sup> и 27<sup>th</sup> Telecommunications Forum (TELFOR) (2018, 2019), Belgrade, Serbia,
2. 4<sup>th</sup> International Conference on Modern Approaches in Science, Technology & Engineering (STECOF) (2019), Berlin, Germany,
3. 28<sup>th</sup> International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV) (2018), Greifswald, Germany,
4. XI International Conference on Computational Heat, Mass and Momentum Transfer (ICCHMT 2018), Cracow, Poland,
5. 2018 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive, Milano, Italy,
6. 20<sup>th</sup> International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE) (2018), Tomsk, Russia,
7. 7<sup>th</sup> и 8<sup>th</sup> International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE) (2020, 2022), Tomsk, Russia.

Работа выполнялась при частичной поддержке грантами РФФИ № 17-08-00932, 18-52-53003 и 19-08-00286 и РНФ № 22-29-00137.

**Личный вклад.** Автором лично подготовлены и протестированы все представленные в диссертации вычислительные программы, проведены компьютерные расчёты, проанализированы полученные результаты, подготовлены материалы для научных публикаций. Им лично написан текст диссертации и сформулированы основные выводы. Вычислительные алгоритмы для решения уравнений непрерывности отрабатывались и корректировались с участием д.ф.-м.н. В. Ю. Кожевникова. В рамках «гибридного» подхода решение гидродинамических уравнений осуществлялось автором, а решение кинетического уравнения Больцмана — к.ф.-м.н. Н. С. Семенюк.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 21 печатном издании, в том числе 7 изданы в авторитетных рецензируемых

журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней кандидата и доктора наук, 18 — в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 12 — в трудах конференций.

**Объём и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, списка публикаций автора, списка рисунков и таблиц и 3 приложений. Полный объём диссертации составляет 130 страниц, включая 54 рисунка и 7 таблиц. Список литературы содержит 179 наименований.

## Содержание работы

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.

**Первая глава** представляет собой 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.

**Вторая глава** посвящена подробному описанию 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.

Гидродинамический подход основан на непрерывном (континуальном) описании плазмы как совокупности потоков заряженной жидкости, взаимодействующих друг с другом. Плазменные электроны в модели описываются двухмоментными уравнениями непрерывности для концентрации  $n_e$  и плотности энергии  $n_\varepsilon$  электронов:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j}_e = r_e, \quad \frac{\partial n_\varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j}_\varepsilon = r_\varepsilon - e\mathbf{E} \cdot \mathbf{j}_e,$$

где  $\mathbf{j}_e$  — средний направленный поток электронов,  $r_e$  — функция источника, описывающая процессы генерации и потери электронов (ионизация, прилипание и т. д.),  $\mathbf{j}_\varepsilon$  — средний поток плотности энергии электронов,  $r_\varepsilon$  — функция источника, описывающая изменение энергии электронов в результате неупругих столкновений (ионизация, диссоциация и т. д.).

Тяжёлые компоненты плазмы (атомы/молекулы и ионы) описываются в рамках теории многокомпонентной диффузии:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho w_k + \nabla \cdot (\rho w_k \mathbf{u}) = r_k - \nabla \cdot \mathbf{j}_k, \quad k = 1, \dots, N,$$

где  $\rho$  — плотность смеси,  $w_k$  — массовая доля тяжёлых частиц сорта  $k$ ,  $\mathbf{u}$  — средневзвешенная скорость смеси (скорость центра масс смеси),  $r_k$  — функция источника частиц сорта  $k$ ,  $\mathbf{j}_k$  — диффузионный массовый поток частиц сорта  $k$ ,  $N$  — число тяжёлых компонентов плазмы.

Для описания самосогласованного потенциального электрического поля используется уравнение Пуассона:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{e}{\varepsilon_0} \left( \sum_{k=1}^M z_k n_k - n_e \right), \quad \mathbf{E} = -\nabla \varphi,$$

где  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая постоянная,  $e$  — элементарный заряд,  $\varphi$  — электростатический потенциал.

На базе современных представлений физической кинетики об элементарных процессах в многокомпонентной плазме была сформулирована оригинальная схема плазмохимических реакций в искусственном воздухе высокого давления. Данная кинетическая схема является оптимальной в том смысле, что она обладает минимально возможным количеством компонент плазмы и реакций. В схеме были учтены следующие частицы: нейтральные атомы и молекулы  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{O}$ , электроны, положительные ионы  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{O}_2^+$ ,  $\text{O}_4^+$  и отрицательные ионы  $\text{O}_2^-$ . Данная кинетическая схема включает в себя основные элементарные процессы, позволяющие детально описать временную эволюцию и пространственную структуру нестационарного разряда. При построении минимальной кинетической схемы были исключены как многие ионы (например,  $\text{O}_3^-$ ,  $\text{O}^-$ ,  $\text{N}_4^+$ ), так и возбуждённые атомы/молекулы и комплексы типа  $\text{N}_x\text{O}_y$ . Показана обоснованность данной кинетической схемы для описания нестационарного газового разряда с высокой неоднородностью электрического поля.

Были описаны вычислительные методы решения системы эллиптических дифференциальных уравнений массопереноса. Линеаризация дифференциальных уравнений осуществлялась методом конечных элементов. Описана оптимальная дискретизация пространства, представляющая собой триангуляцию Делоне. Приведена конечно-разностная формулировка метода Галеркина и аппроксимация формулами дифференцирования назад. Описаны методы решения систем линейных алгебраических уравнений через LU-факторизацию.

Была проведена серия верификационных расчётов, демонстрирующих применимость физико-математической модели к описанию быстропротекающих процессов в плазме газового разряда атмосферного давления. Показано,



что при использовании простейшей схемы плазмохимических реакций молекулярного азота модель корректно описывает процессы генерации и распространения волны ионизации.

На примере задачи о формировании и динамике субмикросекундного стримера в неоднородной геометрии «острие–плоскость» было получены коммутационные характеристики разряда при разных давлениях рабочего газа [1–3]. Также была получена картина формирования и распространения стримера. Показано, что в данной конфигурации электродов 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 минимум спада напряжения, наблюдаемой в эксперименте.

В рамках «гибридного» подхода был рассмотрен процесс субнаносекундного пробоя в газовом диоде с сетчатым катодом [4–8]. Были получены временные профили напряжения и тока разряда, свидетельствующие о том, что коммутация происходит на переднем фронте импульса напряжения. Также была рассмотрена динамика формирования разряда, иллюстрирующая механизм продвижения классического стримера. Скорость продвижения стримера пропорциональна его длине, что соответствует 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 [9; 10]. Моделирование проводилось в различных пространственных геометриях задачи. Результаты показали, что в неоднородной конфигурации электрического поля реализуется структура классического коронного разряда (рисунок 1).

Пространственная структура разряда состоит из области ионизации вблизи потенциального электрода с высокими значениями электрического поля и характерными размерами  $\sim 2r_{curv}$ , где  $r_{curv}$  — радиус скругления электрода, и области дрейфа в остальном промежутке, ширина которой в  $\sim 50$  раз больше области ионизации. Воздушная плазма стационарного коронного разряда состоит из положительных ионов  $O_4^+$  и отрицательных ионов  $O_2^-$ , а протекание тока в плазме обеспечивается ионами.

Профиль тока разряда подчиняется соотношению  $I(t) \sim U^2(t)$ , что говорит об самоограничении тока. Исследование возможности зажигания стационарного коронного разряда при вариации скоростей роста напряжения на промежутке показало, что скоростях роста  $dU/dt \sim 2 - 10 \text{ кВ} \cdot \text{мкс}^{-1}$  электрическое поле в зоне проводимости успевает выровняться, что говорит о формировании стационарного коронного разряда, а при скоростях роста  $dU/dt \geq 10 \text{ кВ} \cdot \text{мкс}^{-1}$  происходит искровой пробой промежутка.

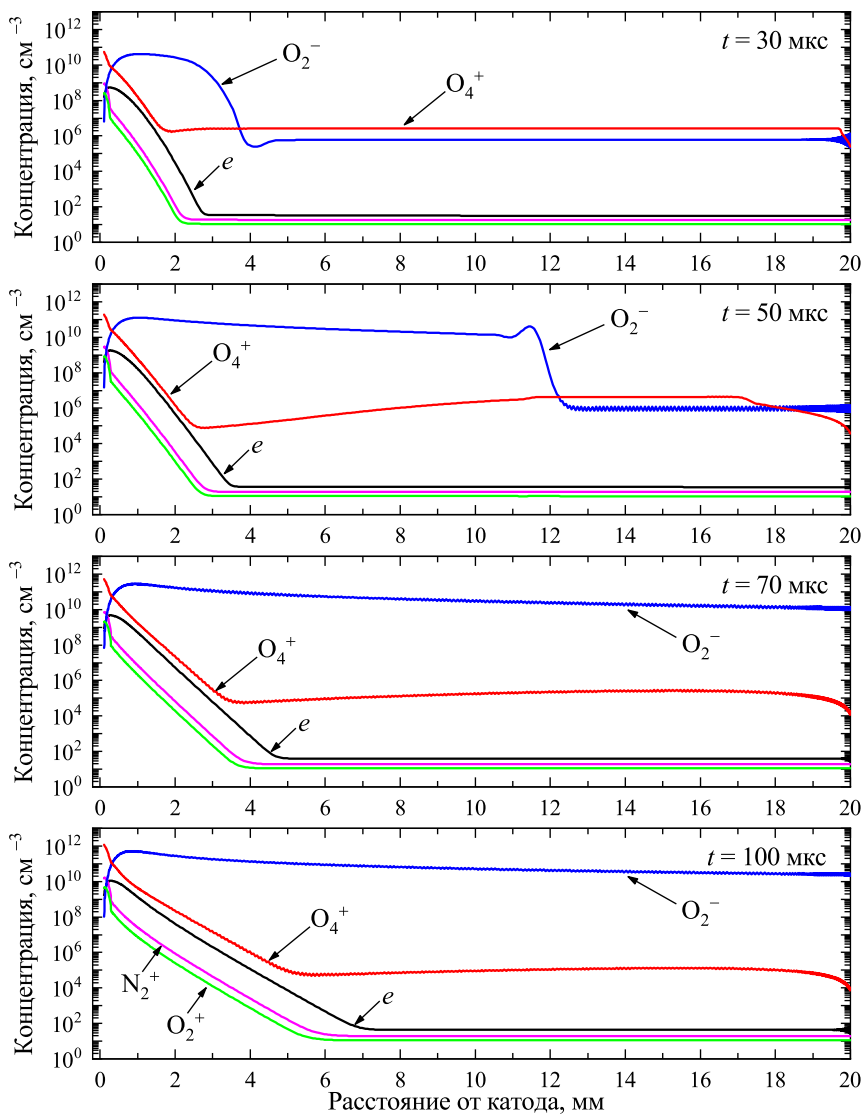


Рис. 1 — Пространственно–временная эволюция коронного разряда вдоль оси разряда

В **четвёртой главе** проведено исследование импульсно–периодического режима коронного разряда в газоразрядном промежутке с неоднородной геометрией типа «остриё–плоскость» [11–17]. Оно показало, что при плавном росте напряжения на промежутке, которое обеспечивается

включением в электрическую схему малой балластной ёмкости, отчётливо наблюдается несколько последовательных стадий (рисунок 2). Первой реализуется *предпробойная стадия* (запаздывание пробоя), которая характеризуется плавным ростом напряжения на промежутке и формированием нескомпенсированного пространственного заряда.

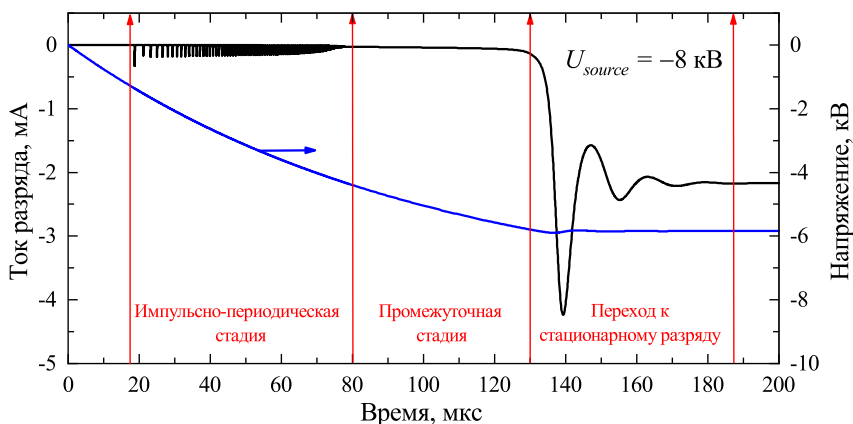


Рис. 2 — Коммутационные характеристики перехода к сильноточному режиму горения коронного разряда

*Вторая стадия* определяется быстрым ростом плотности плазмы вблизи острейшего электрода и формирование первого импульса тока, за которым следует частотно-импульсная последовательность импульсов Тричела. 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.

При достижении плазмы анода происходит затухание импульсного режима и переход в *промежуточную стадию*. Данная стадия характеризуется плавным ростом тока разряда, в течение которого происходит перераспределение плазмы в промежутке и формировании структуры, схожей со структурой стационарного коронного разряда.

При достижении определённого напряжения на промежутке, независимо от величины приложенного напряжения, происходит резкий переход к сильноточному режиму, в результате которого образуется структура *классического тлеющего разряда* (рисунок 3). Прикатодный слой в стационарном коронном разряде проявляет признаки особого (нестандартного) режима функционирования, который явно обусловлен сильно неоднородной геометрией.

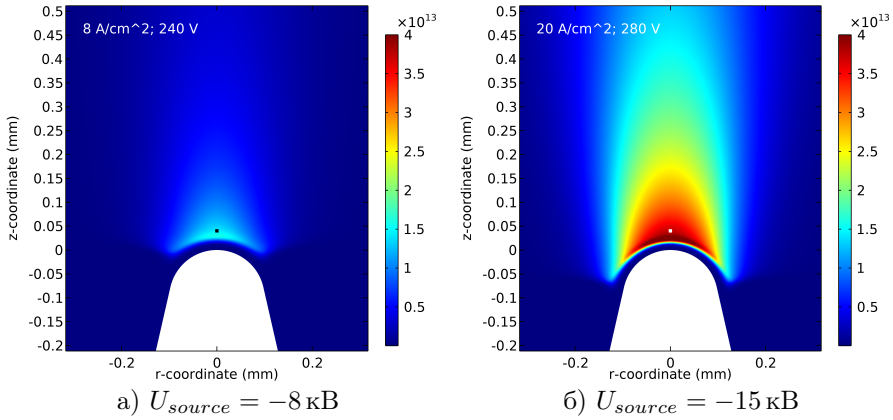


Рис. 3 — Структура прикатодного слоя тлеющего разряда

Увеличение скорости роста напряжения на промежутке приводит к росту тока коронного разряда и резко изменяет механизм формирования плазмы у острия с лавинный на стримерный. При скорости роста  $\sim 3,0 \text{ В} \cdot \text{нс}^{-1}$  в коронном разряде может реализоваться режим с образованием двух последовательных разнонаправленных стримеров. При формировании первого катодонаправленного стримера происходит образование положительного выброса тока субнаносекундной длительности, за которым следует отрицательный выброс тока, характеризующий анодонаправленный стример (рисунок 4).

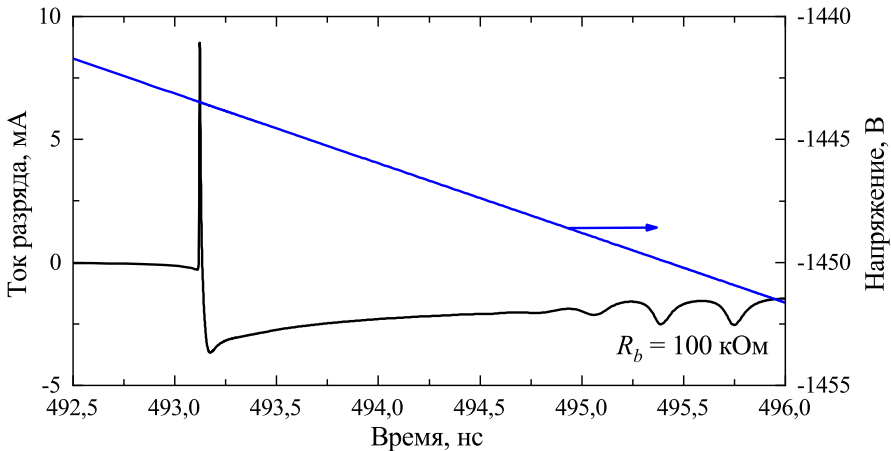


Рис. 4 — Коммутационные характеристики коронного разряда при скорости роста напряжения  $\sim 3,0 \text{ В} \cdot \text{нс}^{-1}$

В **пятой главе** детально исследован механизм зарождения и распространения апокампиического разряда в электроотрицательных газах атмосферного давления [18–21]. Результаты показали, что тонкий филамент на изгибе плазменного канала представляет собой положительный стример, растущий от неоднородности плазменной границы, вблизи которой электрическое поле превышает пробивные значения (рисунок 5). 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. В этом случае образуется структура множественных отростков, стремящихся к плоскому аноду (рисунок 6). Наличие нескольких отростков, расположенных близко друг к другу, приводит к их взаимному отталкиванию. 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.

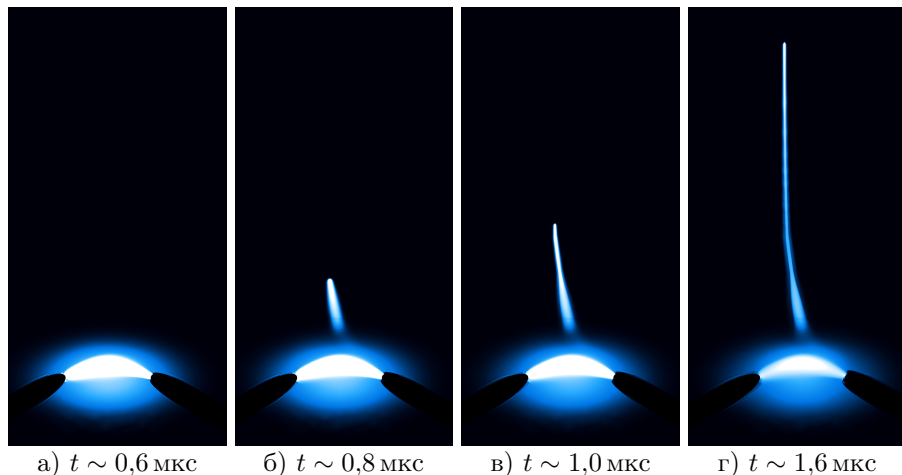
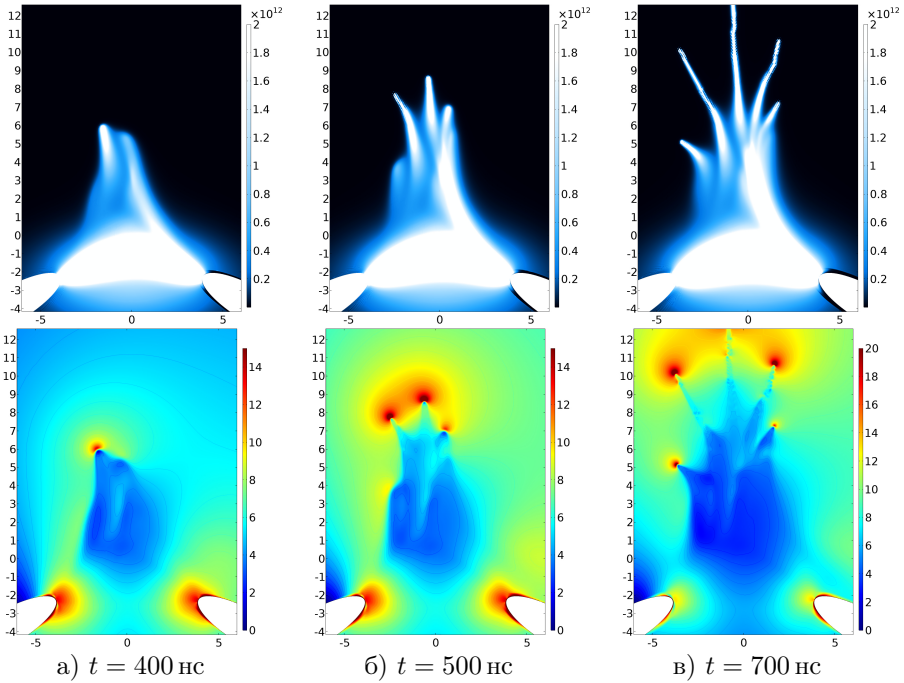


Рис. 5 — Проращивание плазменного филамента с изгиба канала



Верхняя строка: распределения концентрации плазмы в  $\text{см}^{-3}$ , нижняя строка: распределения модуля электрического поля в  $\text{kV} \cdot \text{см}^{-1}$

Рис. 6 — Формирование множественных апокампов в хлоре

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. В диссертационной работе представлена физико–математическая модель нестационарного слаботочного газового разряда в условиях сильно неоднородных электрических полей. В рамках гидродинамического подхода к описанию неравновесной многокомпонентной газоразрядной плазмы удалось описать эволюцию быстроразвивающихся стримерных разрядов в неоднородных геометриях промежутка, последовательные режимы горения коронного разряда в воздухе повышенного давления, а также формирование и распространение тонких плазменных струй из плазменного канала дугового разряда.
2. На базе современных представлений физической кинетики об элементарных процессах в многокомпонентной плазме была сформулирована оптимальная схема плазмохимических реакций в воздухе высокого давления. Показана обоснованность данной кинетической схемы для описания нестационарного газового разряда с

- высокой неоднородностью электрического поля. Для реакции диссоциации электронным ударом была скорректирована константа скорости.
3. Моделирование динамики быстроразвивающегося стримера в неоднородной геометрии «острие–плоскость» показало, что задержка между переключением канала и минимумом спада напряжения и появление вторичных волн ионизации обуславливается неоднородной пространственной структурой разряда.
  4. Моделирование пробоя искрового разрядника в воздухе высокого давления с неоднородным электрическим полем у потенциального электрода продемонстрировало формирование структуры классического стационарного коронного разряда. Данный режим характеризуется самоограничением тока разряда и ионной проводимостью плазмы в зоне дрейфа. Показано, что данный разрядник может работать в ограниченном диапазоне скорости роста напряжения на промежутке.
  5. При плавном росте напряжения на промежутке, обеспечиваемом малой балластной ёмкостью, формирование отрицательного коронного разряда проходит через четыре последовательные стадии: запаздывание пробоя, режим импульсов Тричела, переходная стадия и формирование стационарного тлеющего разряда. Длительность импульсно–периодического режима определяется скоростью роста напряжения в промежутке, переход в тлеющий разряд происходит при достижении критической средней напряжённости поля в промежутке, достаточной для поддержания стационарной плазмы по всей длине промежутка.
  6. Увеличение скорости роста напряжения на промежутке приводит к росту тока коронного разряда и резко изменяет механизм формирования плазмы у острия с лавинного на стримерный. В коронном разряде реализуется режим с образованием двух последовательных разнонаправленных стримеров. При формировании первого катодонаправленного стримера происходит образование положительного выброса тока субнаносекундной длительности, за которым следует отрицательный выброс тока, характеризующий анодонаправленный стример.
  7. Моделирование апокампического разряда в электроотрицательных газах атмосферного давления доказывает стримерный механизм формирования тонкой плазменной струи на изгибе плазменной канала. Рост филамента происходит от неоднородности плазменной границы, вблизи которой электрическое поле превышает пороговые значения. Асимметрия апокампа обусловлена не геометрией электродов, а несимметрией электрического поля: начало «струи» всегда

растёт с потенциального электрода (что также наблюдается в эксперименте). Несимметрия стартовой струи, как следствие, порождает асимметрию распределения электрического поля на плазменной границе, что со временем даёт старт новым отросткам. Скорость роста плазменного канала сильно зависит от приложенного напряжения, поэтому с ростом амплитуды напряжения количество ветвей, успевающих вырасти за один импульс, также будет расти.

Результаты проведённых исследований могут найти применение в разработке и конструировании электротехнических приборов на основе коронного разряда. Дальнейшая разработка темы может быть связана с исследованием динамики разряда в различных условиях (сорт газа, приложенное напряжение, геометрия промежутка), а также с исследованием других режимов зажигания нестационарного газового разряда высокого давления.

## Публикации автора по теме диссертации

1. Theoretical Simulation of Nanosecond High Pressure Gas Discharge in the Pin-to-Plate Gap / V. Y. Kozhevnikov [et al.] // 2018 26th Telecommunications Forum (TELFOR). — 2018. — P. 1—4. — DOI: 10.1109/TELFOR.2018.8611902.
2. Submicrosecond atmospheric electric discharge from the non-uniform electrode (tip) towards the plane electrode / V. Y. Kozhevnikov [et al.] // *Vojnotehnički glasnik*. — 2019. — Vol. 67, no. 3. — P. 601—613. — DOI: 10.5937/vojtehg67-20796.
3. Numerical Simulation of Fast Atmospheric Electric Discharge in the Tip-to-Plane Configuration. / V. Y. Kozhevnikov [et al.] // *Proceedings of the 4th International Conference on Modern Approaches in Science, Technology & Engineering*. — Acavent, 2019. — DOI: 10.33422/4ste.2019.02.09.
4. Hybrid Numerical Simulation of the Nanosecond Discharge in Gas-Filled Diode with Plane-Grid Cathode / V. Y. Kozhevnikov [et al.] // 2018 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Vol. 2. — IEEE, 2018. — P. 483—486. — DOI: 10.1109/DEIV.2018.8537155.
5. Numerical simulation of fast atmospheric pressure discharge in gas diode with plane-grid cathode system / V. Y. Kozhevnikov [et al.] // *XI International Conference on Computational Heat, Mass and Momentum Transfer (ICCHMT 2018) : Mathematical Modeling in the Energy and Industrial Processes*. Vol. 240. — EDP Sciences, 2018. — P. 05040. — DOI: 10.1051/mateconf/201824005040.



6. Simulation of the Subnanosecond Runaway Electron Source for Low-Dose Industrial Radiography / V. Y. Kozhevnikov [et al.] // 2018 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive. — IEEE, 2018. — P. 1—5. — DOI: 10.23919/EETA.2018.8493232.
7. Theoretical Modelling of Fast Atmospheric Pressure Discharge in Gas Diode with Plane-Grid Cathode System / A. O. Kokovin [et al.] // 2018 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE). — IEEE, 2018. — DOI: 10.1109/ishce.2018.8521189.
8. Теория высоковольтного импульсного разряда в газе высокого давления: гидродинамический и кинетический подходы / В. Ю. Кожевников [и др.] // Известия вузов. Физика. — 2018. — Т. 61, № 4. — С. 603—610. — DOI: 10.1007/s11182-018-1439-x.
9. Numerical Simulation of the High-Voltage Switch Operating in a Self-Breakdown Mode / V. Y. Kozhevnikov [et al.] // 2018 26th Telecommunications Forum (TELFOR). — 2018. — P. 420—425. — DOI: 10.1109/telfor.2018.8612167.
10. Triggered gas switch with a sharply non-uniform electric field at the electrode with negative potential / V. M. Alexeenko [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Vol. 1393, no. 1. — P. 012067. — DOI: 10.1088/1742-6596/1393/1/012067.
11. Atmospheric pressure corona discharge in the needle-plane electrode system: Influence of field peaking on electrophysical parameters / V. S. Kuznetsov [et al.] // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2020). — Institute of Electrical, Electronics Engineers Inc., 2020. — P. 369—373. — DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9241965.
12. *Kokovin, A. O.* Simulation of negative corona discharge in atmospheric air: from mode of Trichel pulses to stationary discharge / A. O. Kokovin, A. V. Kozyrev, V. Y. Kozhevnikov // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2064, no. 1. — P. 012024. — DOI: 10.1088/1742-6596/2064/1/012024.
13. Characteristics of stationary negative corona discharge in atmospheric air / A. O. Kokovin [et al.] // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2022). — Institute of Electrical, Electronics Engineers Inc., 2022. — P. 550—553. — DOI: 10.56761/efre2022.s5-p-019502.
14. О механизме генерации импульсов Тричела в воздухе атмосферного давления / В. Ф. Тарасенко [и др.] // Письма в ЖЭТФ. — 2022. — Т. 115, № 11. — С. 710—716. — DOI: 10.31857/S1234567822110064. — Переводная версия: DOI: 10.1134/S0021364022600689.

15. Смена механизма формирования коронного разряда в атмосферном воздухе при отрицательном острие / А. В. Козырев [и др.] // Известия вузов. Физика. — 2022. — Т. 65, № 10. — С. 138–140. — DOI: 10.17223/00213411/65/10/138. — Переводная версия: DOI: 10.1007/s11182-023-02827-1.
16. Эволюция отрицательной короны в режиме ограничения тока разряда: переход от импульсно–периодического режима к стационарному горению / А. В. Козырев [и др.] // ЖЭТФ. — 2023. — Т. 163, № 2. — С. 284–292. — DOI: 10.31857/S004445102302013X.
17. Key Modes of Ignition and Maintenance of Corona Discharge in Air / V. Y. Kozhevnikov [et al.] // Energies. — 2023. — Vol. 16, no. 13. — P. 4861. — DOI: 10.3390/en16134861.
18. Апокамписческий разряд: условия образования и механизмы формирования / Э. А. Соснин [и др.] // Известия вузов. Физика. — 2019. — Т. 62, № 7. — С. 182–190. — DOI: 10.17223/00213411/62/7/182. — Переводная версия: DOI: 10.1007/s11182-019-01846-1.
19. Electrodynamic Nature of the Convectionless Atmospheric Plasma Jets / V. Y. Kozhevnikov [et al.] // 2019 27th Telecommunications Forum (TELFOR). — 2019. — P. 420–425. — DOI: 10.1109/telfor48224.2019.8971344.
20. Электрополевой механизм формирования тонкой плазменной струи в открытом атмосферном разряде / В. Ю. Кожевников [и др.] // Известия вузов. Физика. — 2019. — Т. 62, № 11. — С. 55–58. — DOI: 10.17223/00213411/62/11/55. — Переводная версия: DOI: 10.1007/s11182-020-01939-2.
21. Apokamp–type gas discharge phenomenon: Experimental and theoretical backgrounds / V. Y. Kozhevnikov [et al.] // EPL (Europhysics Letters). — 2020. — Vol. 129, no. 1. — P. 15002. — DOI: 10.1209/0295-5075/129/15002.