

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА НА ДИССЕРТАЦИЮ

на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
Коковина Александра Олеговича

«Динамика электрического пробоя в газах повышенного давления в условиях высокой пространственной неоднородности электрического поля»

Специальность: 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки

Актуальность темы исследования.

Теоретическое моделирование различных форм коронного газового разряда с учетом сложной плазмохимической кинетики частиц представляет актуальную задачу современной физики газоразрядных процессов, на базе которых работает широкий круг электрофизических установок.

Структура и содержание работы.

Диссертация имеет структуру, соответствующую рекомендациям ВАК. Она состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и трёх приложений. Работа содержит 130 страниц, 54 рисунка и 7 таблиц. Список литературы содержит 179 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, формулируется цель и основные задачи, решаемые автором диссертации, а также научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен литературный 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 сформулирована физико-математическая модель низкотемпературной плазмы электрического разряда в газах высокого давления в условиях высокой пространственной неоднородности электрического поля. 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 модель правильно описывает процессы генерации и распространения волны ионизации.

В третьей главе проведено исследование пробоя высоковольтного искрового разрядника в воздухе высокого давления в различных конфигурациях газонаполненного промежутка. Показано, что в неоднородной конфигурации электрического поля реализуется классическая структура коронного разряда.

В четвёртой главе представлены результаты систематического теоретического исследования четырех различных режимов горения коронно-стримерного разряда в воздухе атмосферного давления, в котором выявлены условия перехода от одной моды горения к другой.

В пятой главе описана теоретическая модель недавно обнаруженного экспериментально нового вида импульсно-периодического разряда в форме длинной

тонкой нити, похожей на плазменную струю, но представляющего собой протяженный стримерный канал. Впервые представлены расчеты несимметричной формы такого разряда, в том числе с ростом множества каналов.

В Заключение сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и теме диссертации

Содержание диссертации полностью соответствует заявленной специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки и теме диссертации «Динамика электрического пробоя в газах повышенного давления в условиях высокой пространственной неоднородности электрического поля».

Соответствие автореферата диссертации её содержанию

Автореферат диссертации в полной мере отражает основное содержание диссертационной работы.

Личный вклад соискателя в получении результатов исследования

В получении результатов исследования личный вклад соискателя является определяющим. Автором лично были подготовлены вычислительные коды, проведены компьютерные расчёты, проанализированы полученные результаты, подготовлены материалы для научных публикаций, лично написан текст диссертации и сформулированы основные выводы. Численные алгоритмы обрабатывались 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.

Степень достоверности результатов исследования

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.

Результаты работы докладывались и обсуждались на 7 международных конференциях и опубликованы в 21 научных работах, в том числе в 7 статьях в журналах из перечня ВАК.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором диссертации результатов

Работа имеет реальное практическое значение, позволяя детально моделировать и исследовать пространственную структуру и динамику газовых разрядов повышенного давления в широкой области параметров и условий задач.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Разработанные численные модели могут быть применены при разработке и расчёте параметров газоразрядных систем. Полученные результаты могут быть полезны при разработке и усовершенствовании технических устройств на основе коронного разряда.

Новизна полученных результатов

Научные результаты, представленные в диссертации, являются новыми.

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.

Теоретически обосновано, что при увеличении скорости роста напряжения на промежутке «острие–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.

Доказан стримерный механизм зарождения тонкого светящегося филамента на изгибе плазменного канала (апокампического разряда), допускающий рост множественных стримерных каналов.

Замечания по диссертационной работе:

1. Есть вопросы по значительному сокращению схемы плазмохимических реакций в воздухе

В цитируемой статье, из которой взяты значения констант скорости реакций [А Kossyi, ets. Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures // Plasma Sources Sci. Technol. 1992, 1 p. 207] используется 450 реакций. При этом в статье А Kossyi, ets. отмечено, что «...в условиях, близких к пробое, реакции с электронно возбужденными молекулами азота радикально влияют на физико-химическую кинетику».

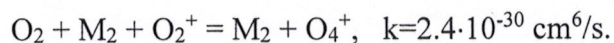
Положения, выносимые на защиту:

1. Сформирована и протестирована оптимальная схема плазмохимических реакций для искусственного воздуха ($N_2 : O_2 = 4 : 1$), которая содержит 25 элементарных реакций.

Кардинальное сокращение схемы плазмохимических реакций для воздуха вызвало корректировку констант скорости реакций. На стр. 34 диссертации отмечено «*Апробация кинетической схемы показала, что константа скорости диссоциации для азота, описанная в [96], оказалась сильно завышена*».

2. Есть вопросы по выбору элементарных реакций в схемах плазмохимических реакций

Например, в кинетической схеме для воздуха используется реакция 8



Однако реакция $N_2 + M_2 + N_2^+ = M_2 + N_4^+$, $k=5 \cdot 10^{-29} \text{ cm}^6/\text{s}$.

имеет константу скорости реакции в 20 раз больше, кроме того, концентрация молекул азота в воздухе в 4 раз больше, чем молекул кислорода.

В кинетической схеме для кислорода реакция 8 из кинетической схемы для воздуха не используется.

3. Есть вопросы по выбору значений констант скорости реакций

Например, для реакции 8 в схеме плазмохимических реакций для воздуха используется значение $k=2.4 \cdot 10^{-30} \text{ cm}^6/\text{s}$. В монографии [Б.М. Смирнов. Ионы и возбужденные атомы в плазме], на которую ссылаются авторы статьи [А Kossyi, ets. Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures // Plasma Sources Sci. Technol. 1992 1 207] приведены значения этой константы $k=(1.5-2.8) \cdot 10^{-30} \text{ cm}^6/\text{s}$ и при

температуре 310 К. Желательно использовать константы скорости реакций из базы данных NIST.

4. Отсутствует учет нагрева газа при моделировании плазмохимических реакций.

На стр. 124 диссертации указано «Константы скоростей даны при температуре фонового газа 300 К». В импульсно-периодическом режиме возможен нагрев газа в разряднике. Кроме того, это значительно сокращает возможность использования результатов диссертационного исследования для других режимов и типов разрядников.

5. Расхождение в составе искусственного воздуха

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.....

Стр. 34 диссертации: В результате оптимизации была получена минимальная кинетическая схема искусственного воздуха (75% N_2 – 25% O_2), которая представлена в таблице 4 Приложения А.

Все используемые в диссертации значения констант скорости реакций, взятые из в статьи [A Kossyi, et al. Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures // Plasma Sources Sci. Technol. 1992, 1 p. 207] справедливы для смеси ($N_2 : O_2 = 4 : 1$).

6. Некорректное использование терминов

Стр. 7 автореферата: *плазмохимическую кинетику* более правильно кинетику плазмохимических реакций

Стр. 9 автореферата Профиль тока разряда подчиняется соотношению $I \sim U^2$. Наверное, более корректно вольт-амперная характеристика разряда...

Стр. 124-125 диссертации, таблицы 4-7. Скорость реакции. Нужно константа скорости реакции.

Стр. 124-125 диссертации, таблицы 4-7. Скорости двухчастичных реакций. Нужно константы скорости реакций второго порядка.

Стр. 124-125 диссертации, таблицы 4-7. Скорости трехчастичных реакций. Нужно константы скорости реакций третьего порядка.

Отмеченные недостатки не затрагивают научных положений и выводов диссертации и не снижают научную и практическую значимость диссертационной работы.

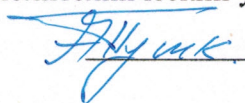
Заключение

Уровень решаемых задач и поставленная цель работы соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а диссертация – специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки.

Диссертация удовлетворяет требованиям ВАК, а её автор, Коковин Александр Олегович, заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13. Электрофизика, электрофизические установки.

Официальный оппонент

Профессор Отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (НИ ТПУ),


 Пушкарев Александр Иванович

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

телефон: +7(3822)606-260, +7(3822)701-777.

E-mail: aipush@tpu.ru

Подпись Пушкарева Александра Ивановича удостоверяю,
ученый секретарь Ученого совета Национального исследовательского Томского политехнического университета, кандидат технических наук

 Кулинич Екатерина Александровна

7 ноября 2023 г

М.П.

