

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Суржикова Сергея Тимофеевича
на диссертацию Сайфутдинова Алмаза Ильгизовича на тему: «**Гидродинамические и гибридные модели электрических разрядов в газах и их приложения**»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по
научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация Сайфутдинова Алмаза Ильгизовича, посвященная одному из интенсивно развивающихся направлений современной фундаментальной и прикладной физической механики, относящемуся к исследованию кинетических, газодинамических и электрофизических свойств разрядов различной физической природы. Основной метод исследования, развитый в диссертации, связан с разработкой и использованием современных цифровых технологий на основе гидродинамических и гибридных моделей электрических разрядов в газах. Диссертация является несомненно **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы, включающего 439 наименований. Она содержит 18 таблиц, и 106 рисунков.

По результатам автором опубликовано свыше 65 работ, большинство из которых содержатся в ведущих журналах, индексируемых международными базами данным и рекомендованными ВАК, а также в трех патентах. Результаты, представленные автором в диссертации апробированы в научном сообществе, многократно докладывались на ведущих международных и всероссийских конференциях и семинарах по физике и механике плазмы и газовых разрядов. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

В первой главе диссертации дан весьма подробный обзор и анализ фундаментальных и современных публикаций по теме диссертации. На основе указанного анализа показано, что остаются проблемными задачи исследования разрядных явлений при относительно высоких давлениях, а также требует дальнейших фундаментальных исследований плазма отрицательного свечения классических тлеющих разрядов. Обращено внимание на сложности описания плазмы газовых разрядов, поддерживаемых высокочастотными и сверхвысокочастотными электромагнитными полями, учитывающих не только электродинамические аспекты, но также детальные кинетические и газодинамические явления в области формирования разрядов.

Во этой же главе дан теоретический базис исследований: классифицированы теоретические модели газовых разрядов, дан вывод кинетического уравнения Больцмана в

двучленном приближении, дан вывод уравнений переноса из кинетического уравнения Больцмана.

Во второй главе диссертации дана формулировка самосогласованной модели разрядов постоянного тока в атомарных газах и в молекулярных газах, подробно рассмотрена кинетика элементарных процессов в плазме аргона и азота. К важным и несомненно новым результатам, представленным в данной главе можно отнести:

- Расчетные данные по самосогласованной задаче формирования параметров разрядов постоянного тока с вольфрамовыми электродами в аргоне и азоте при атмосферном давлении в широком диапазоне плотностей тока с различной длиной разрядного промежутка в одномерном приближении,
- Результаты изучения механизма нагрева газа в квазинейтральной области разряда посредством колебательно-поступательной релаксации с выделением энергии в реакциях диссоциации и тушения возбужденных молекул азота, а в катодном слое - посредством джоулева нагрева.
- Результаты анализа механизмов нагрева поверхности катода и анода и их зависимость от плотности разрядного тока.
- Исследование закономерностей формирования составляющих плотности тока электронов на катоде под действием термоэлектронной и вторично-электронной эмиссии, а также плотности тока обратных электронов в зависимости от плотности тока разряда.
- Демонстрация расчетным путем процесса перехода от тлеющего разряда к электрической дуге.
- Результаты численных исследований по воспроизведению пульсации тока и напряжения при переходе от Таунсендовского к тлеющему разряду.

Третья глава диссертации посвящена численным исследованиям процессов испарения атомов и молекул углерода с электродов в газоразрядный промежуток. Представленная плазмохимическая модель, описывающая процессы с участием атомов и молекул углерода позволяет описать интенсивное испарение атомов и молекул углерода в режиме дугового разряда.

В четвертой главе диссертации выполнены теоретические исследования плазмы прикатодной области тлеющего разряда. Представляют значительный интерес исследования автора в части изучения электродинамической структуры отрицательного свечения и Фарадеева темного пространства с использованием двухмерных плазменных моделей.

В этой же главе решается еще одна фундаментальная задача: описание приэлектродных областей разрядов, где традиционно ожидается проявление нелокальных

плазменных эффектов. С использованием гибридной модели короткого разряда, основанной на кинетическом уравнении Больцмана, сформулированным в двухчленном лоренцовом приближении, а также диффузионно-дрейфовых уравнений для описания тяжелой компоненты плазмы, автор проводит исследование в плазме гелия.

В пятой главе диссертации представлены результаты зондовых исследований плазмы отрицательного свечения короткого тлеющего разряда в гелии при низких, средних и высоких давлениях. Особенностью указанного типа разрядов является отсутствие положительного столба. Автор демонстрирует преимущества предлагаемой конструкции зонда Ленгмюра в части увеличения чувствительности измерений высокоэнергетической части функции распределения электронов по энергиям.

Шестая глава диссертации посвящена исследованию микроволновых разрядов в фокусирующей установке, разработанной в газодинамической лаборатории СПбГУ. Выполнены численные эксперименты в двумерном приближении по формированию активной фазы и фазы послесвечения микроволновых разрядов в азоте в фокусирующей системе. Даны примеры формирования от 1 до 4 плазмоидов. С использованием разработанной модели выполнено численное исследование нагрева газа в реакциях тушения возбужденных молекул азота, как в активной фазе, так и в первые микросекунды фазы послесвечения (до 6 мкс). На длительных временах фазы послесвечения (после 10 мкс) основным механизмом является выделение энергии в реакциях колебательно-поступательной релаксации. Представляют интерес результаты исследования по динамике вытягивания одиночного плазмоида в пучности СВЧ электромагнитной волны при давлениях от 40 до 100 Торр, частоте 9.6 ГГц и длительности импульса 3 мкс, а также для случая электромагнитной волны с частотой 7.5 ГГц и длительностью импульса 15 мкс. Важно, что результаты исследований сопоставлены с имеющимися в литературе экспериментальными данными, полученными в Институте Прикладной физики РАН.

Резюмируя анализ диссертационной работы по главам, можно сделать вывод о **новизне** полученных автором результатов:

1) В рамках гидродинамического описания разрядов постоянного тока представлен подход, учитывающий нагрев электродов за счет процессов, протекающих на границе «электрод – газоразрядная плазма», и влияющий обратно на характеристики разряда. Модель позволила впервые в рамках единого подхода исследовать все основные режимы разрядов постоянного тока от Таунсендовского и тлеющего к дуговому, а также учесть влияние испарения материала электродов на характеристики дугового разряда.

2) В рамках многоуровневой гибридной модели, основанной на кинетическом описании электронной компоненты и гидродинамическом описании тяжелой компоненты плазмы, проведены исследования кинетики быстрых электронов и параметров плазмы в области отрицательного свечения короткого тлеющего разряда в гелии в широком диапазоне давлений для различных кинетических схем и с учетом нагрева газа.

3) Результаты зондовых исследований плазмы отрицательного свечения короткого тлеющего разряда с нелокальным характером формирования функции распределения электронов (ФРЭ) в широком диапазоне давлений. Теоретически и экспериментально показано, что вторая производная тока быстрых электронов на стеночный зонд пропорциональна их спектру.

4) Результаты экспериментальных и численных (в рамках гибридной модели) исследований по возможности идентификации примесей воздуха, аммиака, углеводородов (на примере метана, этилена и этанола) путем регистрации энергии быстрых электронов, образованных в реакциях пенниговской ионизации в плазме отрицательного свечения короткого тлеющего разряда при низких, средних и высоких давлениях.

5) Новым результатом является формулировка самосогласованной физико-математической модели сфокусированного микроволнового разряда и проведены численные расчеты по формированию микроволнового разряда в азоте в реальной фокусирующей системе, представляющей цилиндрический параболоид в двумерной геометрии. Изучены пространственно-временные параметры плазмоида, формирующегося в основном фокусе системы, в активной фазе и в фазе послесвечения. Исследованы основные каналы нагрева газа в области образования плазмоида.

7) В рамках численных расчетов на основе сформулированной модели исследована динамика формирования диффузного СВЧ-разряда и его контракция в пучности стоячей электромагнитной волны. Проведены сравнения полученных результатов с экспериментальными данными, представленными в работах научной группы из Института прикладной физики РАН.

Диссертация Сайфутдинова А. И. написана грамотно и с соблюдением научного стиля изложения. Все материалы в тексте представлены подробно и понятно. Данная диссертация является серьёзным и завершённым научным исследованием в области физики и механики плазмы и газовых разрядов в постоянных и СВЧ электрических полях.

По тексту диссертации имеются следующие **замечания**:

1. Считаю, что автором недостаточно внимания уделено валидации разработанных моделей. Фактически, сравнение с данными других авторов демонстрируется только на трех рисунках (рис.2.6, 4.14 и 6.20).

2. То же замечание относится к необходимости в расчетных исследованиях демонстрировать степень влияния разработанных моделей к используемым кинетическим моделям разных авторов, а также степень влияния параметров численных расчетов на получаемые результаты.

3. Некоторым недостатком докторской диссертации, на мой взгляд, является получение значительного числа представленных численных результатов с использованием коммерческого кода Comsol Multiphysics. Довод о многочисленных свидетельствах тестирования этого кода другими авторами не убедителен. Единственным, на мой взгляд оправданием, служит то, что часть использованных в исследованиях компьютерных кодов созданы автором самостоятельно.

4. При изложении численных моделей автор не всегда тщательно предоставляет данные, использованные в расчетах. Даются лишь ссылки на цитируемые работы.

5. Вызывает недоумение использование англоязычных рисунков (например, рис.2.2-2.5, 2.18, 4.2-4.4, 4.14, 5.10, 5.18-5.20 и др.).

Указанные недостатки лишь несколько снижают впечатление от высокого научного уровня диссертационного исследования, представляющего законченную научно-исследовательскую работу, выполненную в актуальном направлении.

Интегральный анализ диссертационной работы Сайфутдинова Алмаза Ильгизовича позволяет сделать вывод о том, что в диссертации разработаны теоретические положения и решен ряд задач (развиты гидродинамические и гибридные подходы по моделированию электрических разрядов в газах при средних и высоких давлениях в разрядах постоянного тока - тлеющем, дуговом, а также в сфокусированном СВЧ-разряде), совокупность которых можно квалифицировать как **научное достижение в области физической механики газовых разрядов**.

Диссертация Сайфутдинова Алмаза Ильгизовича на тему «Гидродинамические и гибридные модели электрических разрядов в газах и их приложения» соответствует основным требованиям, установленным приказом от 19.11.2021 №11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Сайфутдинов Алмаз Ильгизович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.1.9. Механика

жидкости, газа и плазмы. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета
академик РАН,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник ФГБУН
«Институт проблем механики
им. А.Ю. Ишлинского» РАН.

Суржиков
Сергей
Тимофеевич

14 июня 2023 г.

Адрес: 119526, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1.
Веб-сайт: <http://ipmnet.ru>, тел.: +7 495 4340017, email: surg@ipmnet.ru

Подпись С.Т.Суржикова заверяю.
Зам. директора ИПМех им. А.Ю.Ишлинского РАН
Д.т.н. Ермолов И.Л.

