



UNIVERSIDADE da MADEIRA

Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia  
Departamento de Física  
Mikhail Benilov, Professor Catedrático Emérito

Departamento de Física  
Universidade da Madeira  
Largo do Município  
9000-082 Funchal, Portugal  
Tel. +351 291 705256  
Fax +351 291 209410  
e-mail [benilov@staff.uma.pt](mailto:benilov@staff.uma.pt)  
<https://fisica.uma.pt/>

## Отзыв

**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**

В современной науке о газовых разрядах построение теоретических моделей является важнейшим инструментом исследования, даже несмотря на то, что большинство теоретических моделей в силу своей математической сложности не имеют точных аналитических решений. В частности, такова ситуация в исследованиях приэлектродных процессов, а также быстропротекающих процессов, характерных для СВЧ-разрядов, когда экспериментальных данных бывает просто недостаточно для выявления ключевых закономерностей.

В связи с вышесказанным, диссертация Сайфутдинова А.И., посвященная совершенствованию методик моделирования газовых разрядов и построению гидродинамических и гибридных моделей, учитывающих все существенные физические процессы, является весьма актуальной.

В диссертации автором проведены работы по трем направлениям:

- 1) исследование тлеющего и дугового разрядов постоянного тока атмосферного давления в атомарных и молекулярных газах;
- 2) исследование прикатодной плазмы короткого тлеющего разряда при низких и высоких давлениях с нелокальным формированием функции распределения электронов (ФРЭ), с целью развития плазменной электронной спектроскопии для анализа состава газовых смесей;
- 3) моделирование сфокусированных СВЧ-разрядов для существующих экспериментальных установок, описанных в научной литературе.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 304 страницы, включая 106 рисунков и 18 таблиц. Список литературы включает 439 наименований, в том числе и самые свежие публикации по данной тематике, датированные 2022 годом. Основные результаты диссертации изложены в 65 работах, в том числе 62 публикациях в журналах, индексируемых Scopus и WoS и входящих в список журналов ВАК. По результатам диссертации зарегистрированы 3 патента.

Во введении автором обосновывается актуальность темы исследований, формулируется цель и задачи исследований, теоретическая и практическая значимость работы, приводятся защищаемые положения.

В первой главе приведен литературный обзор экспериментальных исследований рассматриваемых типов разрядов, а также современных

математических моделей. Кроме того, представлен вывод расширенной гидродинамической модели.

Во второй главе рассматриваются вопросы, связанные с единым подходом к описанию различных режимов разрядов постоянного тока при атмосферном давлении. Представлены результаты, демонстрирующие различные сценарии перехода от Таунсендовского и тлеющего режимов в дугу.

В третьей главе численно исследуется влияние испарения материала электродов на характеристики дугового разряда в аргоне с графитовыми электродами. В рамках одномерной модели продемонстрирован эффект смены доминирующего иона с  $Ar^+$  на ион углерода  $C^+$ .

В четвертой главе исследуется плазма в прикатодной области тлеющего разряда, в частности, рассматривается вопрос о знаке заряда в области отрицательного свечения. Формулируется многоуровневая гибридная модель короткого тлеющего разряда и проводится моделирование разряда в гелии в широком диапазоне давлений.

В пятой главе описывается зондовая диагностика плазмы отрицательного свечения. Результаты измерений сопоставляются с расчетами в рамках гибридной модели. Обсуждается использование плазмы отрицательного свечения короткого тлеющего разряда в качестве рабочей среды для анализа состава газовых примесей в гелии методом плазменной электронной спектроскопии.

В шестой главе представлена расширенная гидродинамическая модель сфокусированного СВЧ-разряда в молекулярном азоте. Проведено численное исследование СВЧ-разряда в реальной фокусирующей установке, разработанной в СПбГУ и предназначенной, по-видимому, для исследования возможностей управления сверхзвуковыми потоками газа посредством плазменных актуаторов. Исследована филаментация СВЧ-разряда в пучности стоячей электромагнитной волны.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Диссертационная работа написана ясным языком и четко структурирована, что облегчает понимание материала. Каждая глава содержит содержательные выводы. Видно, что автор провел весьма значительную работу, в результате которой был получен большой объем новой информации о трех типах газовых разрядов: тлеющего, дугового и СВЧ-разряда.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается строгостью постановок задач и формулировок моделей. Результаты расчетов подтверждаются сравнением с результатами моделирования и экспериментальными данными, приведенными в литературе, а также с собственными измерениями.

Теоретическая значимость работы определяется, в первую очередь, высоким уровнем и фундаментальным характером проведенных исследований. Предложенные в работе гидродинамические и гибридные модели электрических разрядов в газах при средних и высоких давлениях могут использоваться для прогнозирования параметров плазмы в тлеющем и дуговом разрядах постоянного тока, а также в сфокусированном СВЧ-разряде. Теоретические исследования плазмы отрицательного свечения с нелокальной ФРЭ, а также зондовые измерения в такой плазме, являются важным этапом в построении современных кинетических моделей разрядов при высоком, в том числе и атмосферном, давлении.

Практическая значимость работы определяется важностью полученных результатов для понимания физики процессов, протекающих в тлеющих и дуговых разрядах, а также в СВЧ-разрядах. Результаты работы могут быть использованы для прогнозирования и оптимизации параметров плазменных реакторов, устройств сильноточной электроники, устройств для плазменной аэродинамики, газоаналитических детекторов и т.п.

Диссертация в целом представляет собой научный труд, содержащий решение задачи, имеющей существенное значения для физики и механики газового разряда, физики плазмы и плазменных технологий.

Диссертация Сайфутдинова А.И. «Гидродинамические и гибридные модели электрических разрядов в газах и их приложения» соответствует требованиям, установленным приказом от 19.11.2021 №11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», <https://spbu.ru/openuniversity/documents/o-poryadke-prisuzhdeniya-uchenyh-stepeney-v-spbgu>, 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.

Отзыв составил: Бенилов Михаил Семенович (*Mikhail Benilov*), доктор физико-математических наук (специальности 01.04.08 - Физика и химия плазмы и 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы), почетный полный профессор (*Professor Catedrático Emérito*)

Кафедра физики, Факультет точных наук и инженерии, Университет Мадейры, Ларгоду-Мунисипиу, 9000-082 Фуншал, Португалия (*Departamento de Física, Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Largo do Município, 9000-082 Funchal, Portugal*)

Группа плазмы высокого давления, Институт плазмы и ядерного синтеза, Высший технический институт, Лиссабонский университет, 1049-001 Лиссабон, Португалия (*High-Pressure Plasmas Group, Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001 Lisbon, Portugal*)



15 июня 2023 г.