

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Титова Валерия Александровича
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

Актуальность темы. Газоразрядная плазма является объектом интенсивных фундаментальных и прикладных исследований. В частности, газовые разряды привлекают внимание исследователей в области физической кинетики, неравновесной термодинамики и синергетики как примеры открытых самоорганизующихся систем. С другой стороны, неравновесная плазма с температурой электронной подсистемы, значительно превышающей поступательную температуру газа, обеспечивает высокие скорости протекания физико-химических процессов, что определяет многочисленные применения плазменных технологий в задачах синтеза перспективных материалов, переработки углеводородов, обработки поверхностей, в экологическом мониторинге и аналитической химии, а также в задачах стерилизации и плазменной обработки биологических объектов и в ряде других направлений.

Разработка систем, в которых используется газоразрядная плазма, требует детальной информации как о свойствах плазмы в целом, так и об отдельных протекающих в ней процессах. Далеко не вся информация может быть получена на основе натурных экспериментов, поэтому возрастает роль вычислительных моделей для описания плазмы, с помощью которых можно прогнозировать ее параметры и протекающие в ней процессы. В связи с этим диссертация Сайфутдинова Алмаза Ильгизовича, посвященная разработке гидродинамических и гибридных моделей электрических разрядов в газах, а также выработке рекомендаций для реализации некоторых приложений плазмы, является актуальной.

Структура и содержание диссертации. Диссертация включает в себя введение, 6 глав, заключение и список литературы. Она изложена на 304 страницах, включая 18 таблиц и 106 рисунков. Список цитированной литературы состоит из 439 источников.

Введение дает достаточно лаконичную и в то же время исчерпывающую общую характеристику работы. Здесь охарактеризована актуальность темы диссертации, выделены научная новизна и практическая значимость полученных результатов и выводов, сформулированы цель и задачи исследования, а также положения, выносимые на защиту. Приведена информация о публикациях по теме диссертации и об апробации ее

результатов и выводов. Выделен вклад автора в выполненные исследования. В отдельных параграфах кратко изложена методология исследования, обоснована достоверность результатов и выводов, перечислены гранты и программы, в рамках которых были выполнены исследования.

Первая глава – обзор литературы, в котором достаточно подробно отражены исследования тлеющих и дуговых разрядов при атмосферном давлении, а также свободно-локализованных и сфокусированных СВЧ-разрядов. Автор использовал более 300 литературных источников, включая как ставшие уже классическими монографии и обзоры, так и самые современные публикации вплоть до 2022 года. Описаны современные подходы, которые реализуются при моделировании газоразрядной плазмы. Основное внимание уделено расширенному гидродинамическому приближению для описания плазмы. Завершается глава кратким обобщением изложенного материала, из которого логично вытекают цель и частные задачи диссертационного исследования.

Во второй главе изложены результаты расчетов основных параметров тлеющих и дуговых разрядов постоянного тока в рамках единого подхода, который основан на гидродинамическом приближении и учитывает нагрев электродов и сопряженные эффекты на поверхности электродов. Представленный подход позволил автору диссертации впервые описать в рамках единой модели для одномерной и двумерной геометрии все основные режимы разрядов постоянного тока: таусендовский и тлеющий, а также дуговой разряд в атомарном (аргон) и молекулярном (азот) газах.

Третья глава является логичным продолжением второй главы. В ней основное внимание сосредоточено на развитии моделей, в которых учитывается испарение материала графитовых электродов в разрядный зазор. Проанализировано влияние этого процесса на основные параметры разряда, инициированного в аргоне, как при переходе от тлеющего режима к дуговому, так и в дуговом режиме. В набор элементарных процессов включены процессы с участием продуктов эрозии электродов: атомов C и молекул C₂ и C₃. Впервые показано, что при определенных условиях происходит смена доминирующих ионов, то есть баланс зарядов определяется уже не ионизацией исходного плазмообразующего газа, а продуктов эрозии электродов. Это, безусловно, очень интересный результат, а подобное явление может иметь место в самых различных системах, где состав плазмы определяется инициированными ее действием гетерогенными процессами. Это, например, плазма пониженного давления, используемая для обработки полимерных материалов, при большой площади обрабатываемой поверхности и высокой концентрации газообразных продуктов реакций. Другим примером является плазма,

контактирующая с жидкостью (с водными растворами), когда перенос компонентов раствора сильно изменяет состав плазмы, а как следствие, и ее параметры.

Четвертая глава диссертации посвящена описанию в рамках гибридной модели короткого (без положительного столба) тлеющего разряда, в котором электронная компонента описывается с помощью нелокального кинетического уравнения, а ионы, возбужденные и нейтральные частицы – в рамках диффузионно-дрейфового приближения. Численные расчеты проведены для разряда в гелии при низком (300 Па) и высоком (30, 60 кПа) давлении. Показано, что гибридная модель достаточно хорошо описывает параметры плазмы в области отрицательного свечения. В частности, найдено, что температура электронов в области отрицательного свечения составляет десятые доли эВ, тогда как расчет по гидродинамической модели дает завышенную температуру. Наряду с этим продемонстрировано, что в области отрицательного свечения формируются пики на функции распределения электронов по энергии, которые обусловлены образованием быстрых электронов в процессах пеннигговской ионизации и в результате соударений второго рода. Для разряда при средних и высоких давлениях проведена верификация модели.

Пятая глава посвящена развитию зондовой диагностики плазмы в области отрицательного свечения в коротких тлеющих разрядах при средних и высоких давлениях. Проведена валидация гибридной модели. Представлены результаты, которые демонстрируют возможности регистрации примесей сложных молекул (аммиака, углеводородов, этанола) в области отрицательного свечения короткого тлеющего разряда как при низких, так и при высоких давлениях. Показана возможность измерения параметров плазмы отрицательного свечения тлеющего разряда при средних и высоких давлениях с помощью стеночного электрода. В отличие от традиционного ленгмюровского зонда использование стеночного электрода позволило увеличить его собирающую поверхность и, следовательно, чувствительность измерений высокоэнергетической части ФРЭ.

Шестая глава отражает методологию и результаты численных исследований СВЧ-разряда в фокусирующей системе. Представленные здесь расчеты были стимулированы экспериментальными исследованиями ввода энергии в сверхзвуковые потоки газа, которые выполнены рядом научных групп. В главе сформулирована детализированная модель СВЧ-разряда на основе расширенного гидродинамического описания плазмы с учетом распределения энергии между электронами, нейтральными частицами и колебательно-возбужденными состояниями азота, достаточно полной кинетики элементарных процессов в азотной плазме, а также газодинамического расширения газа в

двумерной постановке. Численные исследования выполнены как для активной фазы, так и для фазы послесвечения импульсного СВЧ-разряда. Кроме того, представлены результаты анализа динамики вытягивания плазмоида и его перехода из диффузной формы в контрагированную.

Заключение содержит основные результаты и выводы диссертации.

Диссертация имеет продуманную структуру, логично и ясно изложена, характеризуется внутренним единством.

Новизна полученных результатов и выводов не вызывает сомнений. Отметим лишь наиболее важные моменты.

В рамках расширенного гидродинамического описания разрядов постоянного тока реализован подход, при котором учитывается нагрев электродов за счет процессов на границе «электрод – плазма». Разработанная модель позволила впервые в рамках единого подхода исследовать все основные режимы разрядов постоянного тока от Таунсендовского и тлеющего до дугового. Кроме того, модель позволила учесть влияние испарения материала электродов на характеристики дугового разряда.

На основе аналитических и двумерных численных расчетов в рамках расширенной гидродинамической модели тлеющего разряда в гелии показано, что плазменные области разряда имеют положительный заряд, включая и область отрицательного свечения с немонотонной зависимостью аксиального электрического поля.

С использованием многоуровневой гибридной модели, основанной на кинетическом описании электронной компоненты и гидродинамическом описании тяжелой компоненты, исследована кинетика быстрых электронов и параметры плазмы в области отрицательного свечения короткого тлеющего разряда в гелии в широком диапазоне давлений с учетом нагрева газа.

Результаты экспериментальных и численных исследований в рамках гибридной модели показали возможности идентификации примесей ряда молекулярных газов путем регистрации энергии быстрых электронов, образованных в реакциях пенниговской ионизации в области отрицательного свечения короткого тлеющего разряда при низких, средних и высоких давлениях.

Разработана детализированная физико-математическая модель сфокусированного микроволнового разряда и впервые проведены численные расчеты формирования микроволнового разряда в азоте в реальной фокусирующей системе, включая формирование диффузной формы СВЧ-разряда и его контрагированной формы.

Теоретическая значимость диссертации определяется разработкой самосогласованных моделей, учитывающих неравновесную кинетику и динамику плазмы

газовых разрядов, а также совокупностью новых знаний о параметрах неравновесной плазмы тлеющих, дуговых и СВЧ-разрядов, которые получены с использованием развитых автором моделей.

Практическая ценность работы заключается в выявлении возможностей управления различными режимами разрядов постоянного тока и СВЧ-разрядов, а также в возможности использования разработанных вычислительных моделей для расчетов характеристик плазмы в реальных плазменных приборах и устройствах на основе тлеющих и дуговых разрядов, в частности, в плазмохимических реакторах, а также для решения задач плазменной аэродинамики и аналитической химии.

Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть полезны специалистам, работающим в области физики и механики низкотемпературной плазмы и газовых разрядов, а также их применения, в частности, в МГУ, СПбГУ, КФУ, КНИТУ-КАИ, ОИВТ РАН, ИНХС РАН, ИПМех РАН, ИХР РАН, ИСЭ СО РАН, ИПФ РАН и др,

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается использованием современных методов теоретического исследования, учетом ключевых процессов, протекающих в неравновесной плазме разрядов постоянного тока и микроволновых разрядов, использованием надежных данных для коэффициентов скоростей физико-химических процессов. Следует отметить, что для большей части результатов выполнено качественное и количественное сравнение как с экспериментальными данными, полученными автором, так и с результатами численных расчетов или экспериментов других авторов.

Диссертация полностью соответствует специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

В качестве **замечаний** можно высказать следующее:

1. В третьей главе диссертации интересным результатом является смена плазмообразующего газа при испарении частиц углерода с графитового электрода в разрядный промежуток, заполненный аргоном. На мой взгляд, подобные исследования можно было бы провести и в разряде в гелии. Можно ожидать, что влияние продуктов эрозии электродов проявлялся бы ярче, поскольку энергии ионизации и возбуждения для гелия и углерода отличаются значительно сильнее, чем для пары газов аргон – углерод.
2. В четвертой главе диссертации представлены результаты регистрации примесей углеводородов в области отрицательного свечения разряда. Однако автор не приводит данных, которые позволили бы оценить как нижний, так и верхний пределы обнаружения примесей.

3. Автор для зондовых измерений использовал три схемы: две коммерческие Multifunctional Plasma Probe Analyzer MFPA и Impedance Langmuir probe system, а также схему собственной разработки. Естественным было бы дать сравнительную характеристику этих схем, указать их достоинства и недостатки.
4. Известно, что в присутствии паров органических соединений в плазме возможно осаждение твердых пленок на поверхности зонда. Наблюдалось ли такое явление в описанных в работе экспериментах и влияло ли оно на результаты регистрации зондовых характеристик?
5. В диссертации встречаются, хотя и редко, опечатки, орфографические и пунктуационные ошибки.

Представленные вопросы и замечания не снижают высокой научной ценности работы в целом и не ставят под сомнение сформулированные в ней основные результаты и выводы. Диссертация А.И. Сайфутдинова является законченной научно-квалификационной работой, которая вносит заметный вклад в развитие теоретических методов исследования газоразрядной плазмы, содержит новые результаты, представляющие научный и практический интерес.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем. Основные результаты, выносимые на защиту, прошли серьёзную апробацию на международных и всероссийских конференциях и семинарах и полностью опубликованы. Всего по теме диссертации опубликовано в 65 научных работ, из которых 62 публикации в журналах, индексируемых в международных наукометрических базах Scopus, Web of Science, РИНЦ и входящих в перечень ВАК. Кроме того, получено три патента.

Личный вклад автора в получение результатов, изложенных в диссертации, несомненно, является определяющим. Диссертация написана автором лично. Он внёс основной вклад в создание теоретической базы работы, в проведение расчётов, подготовку и выполнение экспериментов, обработку экспериментальных результатов, а также в подготовку публикаций по теме диссертации. Все программные коды для численного решения систем дифференциальных уравнений в частных производных теоретических моделей в одномерном приближении написаны автором самостоятельно. Реализация одномерных и двумерных моделей разрядов постоянного тока и СВЧ-разрядов проведена автором лично.

На основании изложенного можно заключить, что диссертация Сайфутдинова Алмаза Ильгизовича «Гидродинамические и гибридные модели электрических разрядов в

газах и их приложения» является законченным научным исследованием, в котором решены задачи, имеющее существенное значение в области физики и механики газовых разрядов, 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
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник Научно-
исследовательского отдела №3
ФГБУН Институт химии растворов
им. Г.А. Крестова РАН, Россия,
Иваново



Титов Валерий
Александрович



30 мая 2023 г.
Адрес: Россия 153045, г. Иваново, ул. Академическая, д.1;

Веб-сайт: <http://www.isc-ras.ru/>

email: tva@isc-ras.ru, titov25@gmail.com;

Тел.: +7-915-8499215