PRINCETON UNIVERSITY

School of Engineering & Applied Science
Department of Mechanical & Aerospace Engineering
P.O. Box CN5263
Princeton, NJ 08544-5263

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Шнейдера Михаила Наумовича

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 исследования. Несмотря на многолетнюю историю изучения, низкотемпературная плазма, генерируемая электрическими разрядами, является объектом пристального внимания как с точки зрения фундаментальных исследований, так и с точки зрения возможностей создания практических приложений. В частности, газоразрядная плазма находит широкое применение в таких областях, как осаждение тонких пленок и синтез различных типов наноструктур, в устройствах подвода энергии в сверхзвуковые потоки газа, с целью управления обтеканием тел, в плазменных двигателях, в экологических задачах: обнаружении вредных веществ и их плазмохимической конверсии, в аддитивном производстве и микросварке, в биомедицинских приложениях. При этом необходимо отметить, что в последние годы вектор исследований сместился в сторону разработки приборов и устройств на основе газовых разрядов при средних и высоких давлениях (в частности, атмосферном). Это связано с возможностью создания конструктивно-компактных приборов и устройств. Однако здесь возникает следующая проблема. На практике для того или иного процесса чрезвычайно важно знать пространственно-временные параметры плазмы. Экспериментальная же диагностика разрядов при высоких давлениях является затруднительной задачей, поэтому возрастает роль теоретических методов исследования газоразрядной плазмы: создания самосогласованных моделей и проведение полномасштабных численных расчетов. Автор поставил перед собой задачу разработать гидродинамические и гибридные модели электрических разрядов при средних и высоких давлениях, применительно к разрядам постоянного тока и СВЧ-разрядам, провести полномасштабные численные расчеты и теоретически исследовать различные режимы рассматриваемых разрядов. Кроме того, особое внимание в работе уделено возможности применение плазмы коротких тлеющих разрядов в гелии с нелокальной функцией распределения электронов (ФРЭ) для анализа состава газовых примесей. Тема диссертационной работы, безусловно, актуальна.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы (объем 304 стр.). Она содержит 18 таблиц, и 106 рисунков. Список литературы включает 439 наименований. Во Введении сформулированы общие положения диссертации, такие, как актуальность работы, научная новизна, практическая значимость, цель и задачи исследования, апробация работы, положения, выносимые на защиту, вклад автора в выполненные исследования.

Первая глава содержит детальный обзор состояния исследований разрядов постоянного тока при атмосферном давлении, свободно-локализованных и сфокусированных СВЧ-разрядов,

приводится описание существующих подходов в моделировании газоразрядной плазмы. Особое внимание уделено лоренцовому двухчленному описанию электронной компоненты плазмы и последовательному выводу уравнений расширенной гидродинамической модели. Глава принципиально важна, поскольку определяет актуальность задач диссертации и место исследований автора в общем контексте исследований в этой области.

Вторая глава посвящена моделированию тлеющих и дуговых разрядов при атмосферном давлении в атомарных (на примере аргона) и молекулярных (на примере азота) газах с использованием расширенного гидродинамического описания плазмы. Важной особенностью сформулированных моделей является учет сопряженных процессов на границе «разрядный промежуток – электрод» и тем самым самосогласованного нагрева тела электродов, а также помимо вторичной электронной эмиссии учет и термоэлектронной эмиссии. В рамках численных расчетов автором продемонстрирован переход от различных режимов тлеющего разряда к дуговому по мере увеличения плотности тока (для одномерной геометрии) или силы тока (для двумерной геометрии) разряда. В диссертации было исследовано влияния граничных условий на внешних (не контактирующих с разрядом) поверхностях электродов на формирование режимов разряда. В частности, автором получено два режима дугового разряда – с диффузным токовым пятном и контрагированным. Кроме того, во второй главе представлены результаты, демонстрирующие переход от Таусендовского разряда к нормальному тлеющему с формированием пульсаций силы тока (или плотности тока) и напряжения на разрядном промежутке. Необходимо отметить, что электрофизические параметры разряда были сопоставлены с собственными измерениями, а также имеющимися в литературе экспериментальными данными.

Третья глава является логичным развитием второй главы и посвящена учету влияния испарения электродов на характеристики дугового разряда. Модель была сформулирована для аргоновой дуги с графитовыми электродами и помимо элементарных процессов в плазме аргона включала также процессы с участием атомарных и молекулярных частиц углерода. Наиболее важный результат, полученный в этой главе – это демонстрация смены плазмообразующего газа, при котором доминирующим сортом ионов становится атомарный ион углерода.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованиям прикатодной плазмы классического объекта – тлеющего разряда. Так, в первом параграфе главы обсуждается проблема знака объемного заряда в области отрицательного свечения и Фарадеева темного пространства. В рамках простых аналитических и двумерных численных расчетов на основе расширенной гидродинамической модели тлеющего разряда постоянного тока в цилиндрической трубке в гелии продемонстрировано, что плазменные области разряда имеют положительный заряд, включая и плазму отрицательного свечения с немонотонной зависимостью аксиального электрического поля. Во втором параграфе представлена гибридная модель короткого (без положительного столба) тлеющего разряда, в котором электронная компонента описывается с помощью кинетического уравнения Больцмана, записанного в Лоренцовом приближении, а тяжелая компонента плазмы с помощью диффузионно-дрейфовых уравнений. Электрическое поле в разряде определяется самосогласованно из уравнения Пуассона. Для разряда при средних и высоких давлениях модель дополняется уравнением баланса энергии для тяжелой компоненты плазмы. Численные расчеты проведены для разряда в гелии. Представлены результаты численных расчетов по распределению параметров плазмы в коротких (без положительного столба) тлеющих разрядах в гелии при низких, средних и высоких давлениях с учетом различных кинетических схем и нагрева газа. Показано формирование узких пиков на функции распределения электронов и дифференциальном потоке в зависимости от энергии от различных групп электронов, образованных в результате реакций Пенниговской ионизации атомов и

молекул примесного газа с метастабильными атомами гелия, а также сверхупругих столкновений.

Пятая глава диссертации посвящена валидации сформулированной в четвертой главе гибридной модели с помощью зондовой диагностики плазмы. При низких давлениях используется цилиндрический зонд Ленгмюра, а при высоких – кольцевой зонд-электрод. Автором диссертации показано хорошее согласие полученные расчетных данных с экспериментальными, как по температуре электронов, так и по концентрации электронов и концентрации возбужденных частиц. Кроме того, развит подход, позволяющий идентифицировать малые доли примеси в буферном инертном газе в коротком тлеющем разряде с нелокальной функцией распределения и низкой температурой основной группы электронов. Экспериментальные исследования по возможности идентификации примесей представлены как для сравнительно простых газов, так и для углеводородов (метана, этилена, этанола), аммиака и др.

Шестая глава диссертации посвящена моделированию сфокусированного СВЧ-разряда в молекулярном азоте. Представлены результаты численных расчетов по исследованию динамики формирования импульсного микроволнового разряда в реальной фокусирующей системе, представляющий цилиндрический параболоид и разработанной в газодинамической лаборатории СПбГУ, в активной фазе и в фазе послесвечения. В зависимости от вкладываемой мощности продемонстрировано формирование множественных плазмоидов в фокусирующей системе. Исследованы основные каналы нагрева газа в области образования плазмоида в главном фокусе системы. Показана важность учета нагрева газа в реакциях самотушения возбужденных молекул азота, как в активной фазе, так и в первые микросекунды фазы послесвечения. Показано, что основным механизмом на длительных временах фазы послесвечения является выделение энергии при колебательно-поступательной релаксации. Кроме того, в шестой главе представлены результаты численных расчетов по динамике вытягивания одиночного СВЧ-разряда и его филаментации в активной фазе. В частности, приведена динамика концентраций заряженных и возбужденных частиц, поступательной и колебательной температуры азота. Проведено сопоставление результатов численных расчетов с экспериментальными данными, полученными исследовательской группой Института прикладной физики РАН, и показано достаточно хорошее согласие результатов численных и экспериментальных исследований при наличии малой примеси кислорода и затравочных электронов в области формирования разряда.

Научная новизна работы заключается в следующем:
Впервые в рамках единого подхода описаны тлеющий и дуговой разряды, а также сценарии перехода от первого ко второму при увеличении вкладываемой мощности в разряд. Кроме того, численно исследовано влияние испарения материала электродов на характеристики разряда.

В рамках многоуровневой гибридной модели описана область отрицательного свечения (ОС) короткого тлеющего разряда. Проведена валидация и верификация модели при низких и высоких давлениях, продемонстрировано формирование узких пиков на функции распределения электронов (ФРЭ) в плазме ОС в чистом гелии и гелии с малыми примесями различных газов. В рамках зондовых исследований показана возможность регистрации примесей сложных молекул, в том числе и углеводородов в плазме ОС короткого тлеющего разряда в гелии.
В рамках расширенной гидродинамической модели подробно исследован СВЧ-разряд в фокусирующей системе и в пучности стоячей электромагнитной волны в молекулярном азоте применительно к задачам аэродинамики. Исследованы газодинамические и кинетические характеристики разрядов, переход из диффузной формы в контрагированную и механизмы быстрого нагрева газа.

Теоретическая и практическая значимость работы
Предложенные в работе гидродинамические и гибридные модели электрических разрядов в газах при средних и высоких давлениях являются фундаментальной основной для прогнозирования параметров плазмы в разрядах постоянного тока: тлеющем, дуговом, а также в сфокусированном СВЧ-разряде. Теоретические и экспериментальные (основанные на зондовой диагностике) исследования плазмы отрицательного свечения с нелокальной ФРЭ, являются чрезвычайно важным этапом в построении современных кинетических теорий разрядов при высоком, в том числе и атмосферном давлении.
Полученные в диссертации результаты могут служить фундаментальной основой для разработки новых и модернизации и оптимизации существующих плазмохимических реакторов для синтеза наноструктур в плазме тлеющего и дугового разрядов; миниатюрных анализаторов состава газовых смесей, а также плазменных детекторов для современных компактных хроматографов; реальных установок для исследования и управления сверхзвуковыми газодинамическими потоками с помощью неравновесной газоразрядной плазмы, генерируемой СВЧ электромагнитными полями.

Считаю, что диссертация А.И. Сайфутдинова выполнена на высоком научном уровне и содержит огромный объем полученных результатов. Стоит отметить ясную логику изложения. Тем не менее к работе имеются следующие **вопросы и замечания**:

1. Во второй и третьей главе представлены результаты моделирования дуговых разрядов с тугоплавкими электродами. Однако остался в стороне вопрос, насколько рассматриваемая модель будет универсальной в случае нетугоплавких электродов, например меди?

2.В четвертой главе диссертации приводится гибридная модель короткого тлеющего разряда и проводятся численные расчеты как при низких, так и высоких давлениях и рассматривается вопрос о возможности регистрации примесей по пикам на ФРЭ от быстрых электронов. Однако в коротком ТР имеется катодный слой, в котором Лоренцово приближение заведомо не выполняется. Хотелось получить обоснование применимости кинетического уравнения в Лоренцовом приближении для описания короткого разряда от катода до анода.

Однако, указанные замечания не влияют на общую высокую оценку диссертации и носят характер рекомендаций для дальнейших исследований.

Новизна представленных в диссертации результатов не вызывает сомнений, и они открывают перспективы для практического применения тлеющих и дуговых разрядов в реальных плазмохимических реакторах при высоких давлениях плазмообразующего газа, в анализе состава газовых смесей, а именно в разработке датчика для современных миниатюрных хроматографов, а также в устройствах для управления газодинамическими потоками с помощью СВЧ-разрядов. Результаты диссертационной работы могут использоваться в исследовательских лабораториях, работающих в области физики и механики газовых разрядов и применения низкотемпературной плазмы (ОИВТ РАН, ИНХС РАН, ИПМех РАН, МГУ, СПбГУ, КФУ, КНИТУ-КАИ, УУНТ, ИСЭ СО РАН и др.)
Результаты диссертации докладывали на многочисленных российских и международных конференциях и всероссийских семинарах и представлены в 65 публикациях в международных и российских журналах (в том числе индексируемых Scopus и WoS и входящих в перечень ВАК) и трех патентах.

Заключение
Диссертация Сайфутдинова Алмаза Ильгизовича представляет собой законченное научное исследование, содержащее решение актуальных задач. Полученные новые результаты имеют

существенное значение для науки и практических приложений. Выводы диссертации вполне обоснованы. Совокупность полученных автором результатов можно квалифицировать как значимое научное достижение в области физики и механики газовых разрядов и низкотемпературной плазмы.

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.

Mikhail Shneider

8 Мая, 2023

Член диссертационного совета
доктор физико-математических наук
Михаил Наумович Шнейдер (Mikhail N. Shneider)
Mikhail Shneider,
Ph.D., D.Sc. Senior Research Scholar (Research Professor)
The Department of Mechanical and Aerospace Engineering Princeton University D-418 Engineering Quad, Olden Street, Princeton, NJ 08544-5263
Tel: 1-609-258-1022
e-mail: shneyder@princeton.edu
m.n.shneider@gmail.com