ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Лебедева Юрия Анатольевича

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

Низкотемпературная плазма сейчас находит применение в различных областях науки и техники, что позволяет создавать уникальные передовые технологии, невозможные при использовании традиционных подходов. Области применения широки и простираются от создания новых материалов и решения задач газодинамики до плазменной медицины и применения в сельском хозяйстве. Для создания плазмы используются все известные типы электрических разрядов. Для успешной реализации и оптимизации плазменных процессов необходимо знать параметры плазмы разных разрядов и механизмы протекания кинетических процессов в них с учетом химических реакций. Применение экспериментальных методов для этих целей дает ограниченный набор информации, что связано, как с трудностью проведения измерений, так и интерпретаций полученных результатов. Решение проблемы возможно только при сочетании экспериментальных и расчетных методов, причем роль моделирования очень велика. Моделированию плазмы посвящено большое количество работ, однако количество задач, ждущих своего решения велико и постоянно появляются новые требования к разрабатываемым моделям и уровням их детализации.

В диссертации Сайфутдинова А.И. представлен цикл исследований по разработке широкого класса гидродинамических и гибридных моделей электрических разрядов в газах и их приложений. Тема диссертации, несомненно, актуальна.

Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из Введения, 6 глав, Заключения, списка литературы (объем диссертации 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, цели исследования, задачи исследования, апробация работы, положения, выносимые на защиту и личный вклад автора в выполненные исследования.

Первая глава содержит детальный обзор состояния экспериментальных исследований газовых разрядов в постоянных и сверхвысокочастотных полях при средних и высоких давлениях, включая приэлектродные явления, а также модели разрядов. Рассмотрены основные подходы к моделированию газовых разрядов, рассмотрен метод Монте-Карло, кинетическое уравнение Больцмана в двучленном Лоренцовом приближении, представлен достаточно подробный вывод уравнений переноса из кинетического уравнения Больцмана и др.

На основе анализа литературы представлены актуальные для решения задачи физики газовых разрядов, сформулированы основные задачи и подходы, которые будут реализоваться в работе.

Глава оставляет хорошее впечатление подробностью и широтой рассмотренной информации и важна для представления места проводимых автором исследований в ряду достижений и тенденций мировой науки.

Во **Второй главе** подробно описана разработанная автором самосогласованная физико-математическая одномерная и двумерная модели газовых разрядов постоянного тока в аргоне и азоте, единым образом описывающая процессы, протекающие в разрядном промежутке и электродах. Модель позволяет описать переход от режима тлеющего разряда к дуге, связать характер перехода с граничными условиями на электроде. Проведены расчеты. Результаты сопоставлены с расчетными результатами других научных коллективов и с экспериментами.

В главе подробно описаны используемые уравнения (уравнения баланса для всех частиц плазмы, уравнение баланса энергии электронов, уравнение баланса энергии тяжелых частиц, уравнение Пуассона). Компонентами плазмы были нейтральные и возбужденные частицы, ионы, электроны. В молекулярных газах система дополнялась уравнением для колебательной кинетики и балансными уравнениями для атомов. Ввиду сложности расчетов вместо поуровневого приближения была использована трехтемпературная модель, включающая уравнения баланса электронной, поступательной и колебательной энергии.

Для описания процессов в плазме использовались достаточно полные и широко используемы кинетические схемы процессов. Здесь нужно отметить, что автор выбрал правильный подход и не стремится использовать наиболее полные кинетические схемы (чем грешат многие авторы), поскольку при этом возникают большие технические трудности, а неопределенность в коэффициентах скоростей ведет к ненадежности результатов. Схема должна обеспечивать решение поставленной задачи.

Отдельный параграф описывает процессы, определяющие нагрев и протекание тока в электродах.

Из полученных в главе результатов хотелось бы выделить получение двух форм дугового разряда в зависимости от условий охлаждения электродов: с диффузным или контрагированным токовым пятном. Представлена динамика установления напряжения на разрядном промежутке и температуры поверхности катода в зависимости от силы тока в различные моменты времени для трех вариантов охлаждения внешних границ электродов.

В **Третьей главе** представлены результаты исследования испарения материала графитовых электродов на характеристики слаботочного дугового разряда в инертном газе. Содержание главы является естественным этапом построения самосогласованной модели разряда постоянного тока с учетом процессов на электроде. Дополнительно к описанному в главе 2 были включены уравнения неразрывности для нейтральных, возбужденных и заряженных частиц материала электродов, испаренных с поверхности последних. Детально рассмотрена кинетика процессов с участием атомов и молекул углерода. Это достаточно непростая задача, поскольку многие характеристики столкновений не известны. Задача решалась в одномерном приближении.

Проведены расчеты при давлении аргона 760 Торр и напряжении источника 5 кВ и разных расстояниях между электродами и разных балластных сопротивлениях. Показано, что ионный состав плазмы меняется при изменении плотности тока разряда, причем есть режимы, где основными ионами являются атомарный и молекулярный ионы углерода. Распределения частиц меняются по длине разряда и во времени.

Четвертая глава посвящена результатам исследования прикатодной области тлеющего разряда. Эта область является неотъемлемой часть разряда постоянного тока и до последнего времени физика явлений в ней ясна не до конца.

В главе содержится небольшой, но важный обзор исследований заряда прикатодных областей разряда. Рассмотрено существующее представление о том, что заряд отрицательный. Для решения этой проблемы было проведено 2D моделирование разряда в цилиндрической трубке в гелии при давлении 1 Торр. Расчеты показали, что положительный заряд существует во всей плазменной области, включая катодные области. В то же время, в одномерной интерпретации заряд становится отрицательным. Учитывая двумерность реальных разрядов, это интересный результат.

Во втором параграфе рассматривается модель короткого разряда (без положительного столба). На основе гибридной модели проведены численные расчеты (на основе пакета Comsol) для коротких разрядов при низких, средних и высоких давлениях в гелии. Продемонстрировано формирование характерных пиков – спектров быстрых

электронов, образованных в результате реакций пеннинговской ионизации и сверхупругих столкновений в плазме отрицательного свечения пространства на высокоэнергетической части функции распределения электронов.

Пятая глава экспериментальная и посвящена вопросам зондовой диагностики области отрицательного свечения разряда. Эта глава выпадает из общего направления исследований, тем более, что диссертация называется «Газодинамические и гибридные модели…». Глава имеет самостоятельное значение. Объединяет главы то, что результаты зондовых измерений сопоставляются с проведенными расчетами и, в какой-то степени служат для обоснования правильности расчетов.

Описана экспериментальная установка, использованная в исследованиях. Для регистрации сигналов с зондов и получения второй производной зондового тока использовались коммерческие системы. Кроме того, для исследований использовалась зондовая система собственной разработки. Источник зондового смещения использовал батарейное питание, гальваническая развязка осуществлялась посредством аналогового оптрона. Очистка зонда проводилась ионной бомбардировкой.

Анализ результатов, представленных в главе 5, показывает, что автором проведен огромный объем зондовых измерений, сопровождающийся их анализом. В результате не только получена детальная информация о разряде, но и разработан метод определения концентраций малых концентраций примесных веществ (включая органику) в плазме отрицательного свечения путем анализа высокоэнергетической части распределения электронов. Для этих целей предлагается использовать стеночный зонд. Получен и ряд других важных и интересных результатов.

В **Главе 6** описываются результаты моделирования СВЧ разряда в молекулярных газах, генерируемых для задач управления сверхзвуковыми потоками газа. Тематика важная и ей посвящено много экспериментальных работ. Задачей моделирования было описание известных экспериментов. Численные исследования проводились для двух случаев.

В первом случае рассмотрен импульсный СВЧ-разряд в специальной фокусирующей системе при выходной мощности в пределах 100 – 250 кВт и частоте 9.6 ГГц в азоте при давлениях от 40 до 80 Торр, начальной температуре 293К. Расчеты в 2D приближении проводились как для активной фазы, так и для послесвечения разряда. Рассчитаны процессы образования плазмоидов в такой системе и изменение параметров молекулярной плазмы во времени. Проведен сравнительный анализ механизмов нагрева газа.

Во втором случае рассмотрен СВЧ разряд в пучности стоячей электромагнитной волны. Представлены распределения концентрации электронов и среднеквадратичного

значения напряженности электрического поля, газовой и колебательной температур в расчетной области в различные моменты времени при давлении азота 40 Торр и частоте СВЧ поля 9.6 ГГц. Аналогичные расчеты проведены дл частоты 7.5 ГГц.

Результаты сопоставлены в данными экспериментов. Детально обсуждаются возможные причины отличия результатов расчетов и экспериментов.

Нужно сделать некоторые замечания по диссертации.

Замечания:

1. В перечне перечисленной литературы по низкотемпературной плазме было полезным бы упомянуть тома «Энциклопедию низкотемпературной плазмы» под ред. В.Е. Фортова, где рассмотрены многие проблемы физики плазмы.
2. Чем обусловлен выбор диапазона плотностей тока и токов в главе 2?
3. Как и в предыдущем, вопрос связан с выбором слаботочного дугового разряда и графитовых электродов в главе 3.
4. Автор ограничивается триммерами углерода для описания процессов с испаряющимися электродами. Почему не учитываются более крупные частицы?
5. На рис. 3.2. не помечены приведенные кривые.
6. Чем объясняется отрыв температур аргона и углеродных частиц (глава 3)?
7. В главе 3 получено много интересных результатов. Есть ли экспериментальные данные, которые могли бы быть сопоставлены с результатами расчетов?
8. В главе 5 было бы полезным привести исправленную на ионный ток характеристику электронной части и сравнение чувствительности метода обнаружения примесей по сравнению с традиционными методами.

Отмеченные замечания не снижают важности и достоверности полученных в диссертации результатов.

Диссертация свидетельствует о проведении огромной работы, в результате которой был получен большой объем новой информации о различных источниках низкотемпературной плазмы. Важно отметить, что автор работы успешно совместил исследования с помощью разработки различных моделей с экспериментальными исследованиями. Такое сочетание подходов к исследованию, проведенных на высоком уровне, встречается редко.

Новизна представленных в диссертации результатов не вызывает сомнений, они открывают перспективы для практического применения различных типов разрядов.

Результаты диссертационной работы могут использоваться в исследовательских, проектных и конструкторских организациях, работающих в области физики и применения

низкотемпературной плазмы (ОИВТ РАН, ИРЭ РАН, ИОФ РАН, ИСЭ РАН, МРТИ РАН, ФИ РАН, ИНХС РАН, МГУ, ИХФ РАН, МФТИ, МГТУБ ФГУП «Исток» и др.).

Результаты исследований по тематике диссертации опубликованы в 65 статьях в ведущих российских и зарубежных журналах, из которых 62 публикации в журналах, индексируемых в международных базах Scopus, WoS и входящих в ядро РИНЦ, а также имеется три патента. Результаты докладывались на многочисленных конференциях разного уровня. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы по следующим пунктам: Физико-химическая гидромеханика; Гидромеханика сред, взаимодействующих с гравитационным и электромагнитным полями. Динамика плазмы; Точные, асимптотические, приближенные аналитические, численные и комбинированные методы исследования уравнений континуальных и кинетических моделей однородных и многофазных сред

Можно выделить **некоторые из основных научных результатов:**

1. Самосогласованные модели разряда постоянного тока с учетом нагрева и процессов на электродах.
2. Демонстрация положительного заряда области отрицательного свечения в рамках 2D модели.
3. Результаты, связанные с влиянием испарения углеродных электродов на характеристики разряда.
4. Результаты по экспериментальному и численному исследованию по возможности идентификации примесей воздуха, аммиака, углеводородов (на примере метана, этилена и этанола) путем регистрации энергии быстрых электронов.
5. Результаты, связанные с моделированием сфокусированного СВЧ разряда.

Диссертация Сайфутдинова А.И. является законченной научно-квалификационной работой, в которой получены результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение важных научных проблем, связанных с исследованием фундаментальных свойств низкотемпературной плазмы, разработкой моделей различных типов разряда и получением результатов, которые могут иметь практическое применение.

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», 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 ИНХС РАН,
заведующий лабораторией «Плазмохимии
и физикохимии импульсных процессов»,
11 мая 2023 г.

Лебедев
Юрий Анатольевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН),

Почтовый адрес: 119991, Москва, Ленинский проспект, 29;

Тел.: +7(495)6475927 доб. 322;

Адрес электронной почты: lebedev@ips.as.ru

Подпись д.ф.-м.н. Ю.А. Лебедева заверяю.

Ученый секретарь ИНХС РАН
доктор химических наук

Ю.В. Костина

119991, Москва, Ленинский проспект, 29, +7 (495) 954-42-75, julia@ips.ac.ru
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН (ИНХС РАН), +7(495) 955-42-01, director@ips.ac.ru