ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Нагнибеда Екатерины Алексеевны на диссертационную работу Сайфутдинова Алмаза Ильгизовича «Гидродинамические и гибридные модели электрических разрядов в газах и их приложения», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Проблемы, изученные в диссертационной работе А.И. Сайфутдинова, относятся к перспективному направлению, лежащему в области физики и механики низкотемпературной плазмы и кинетических процессов в ионизованных газах в широком диапазоне давлений. Особое внимание уделяется разрядам постоянного тока и СВЧ-разрядам при средних и высоких давлениях. Это направление активно развивается в последние десятилетия, что связано с потенциальной возможностью различных приложений в самых разнообразных областях современной технологии: от создания новых материалов до создания новых методов воздействия на поверхность тел, обтекаемых газовыми потоками. В связи с этим, диссертационная работа Сайфутдинова А.И. является **актуальной.**

В диссертации четко прослеживается связь между теорией и экспериментом. Практически, рассмотрение каждой проблемы, где это возможно, заканчивается сравнением теории с экспериментом. Основные **цели** диссертации заключаются в следующем:

1) создание единого подхода в моделировании тлеющих и дуговых разрядов атмосферного давления в рамках расширенного гидродинамического описания плазмы и сопряженных эффектов на границе «электрод-газоразрядный промежуток»;

2) формулировки многоуровневой гибридной модели плазмы отрицательного свечения и Фарадеева темного пространства, проведение численных расчетов и сопоставление полученных результатов с собственными экспериментальными данными и теоретическими расчетами в рамках подхода PIC/MCC других авторов, развитие методики анализа состава газовых смесей в плазме прикатодной области короткого тлеющего разряда;

3) создание двумерной модели сфокусированного СВЧ-разряда и разряда в пучности стоячей ЭМ волны в молекулярном газе применительно к задачам плазменной аэродинамики.

Остановимся на содержании диссертации. Материал диссертации изложен на 304

страницах машинописного текста. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Список цитируемой литературы включает 332 названий. В диссертации приведены 91 рисунок и 32 таблицы.

Во **Введение** обоснованы тема и цели диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена подробному описанию современного состояния в экспериментальных исследованиях тлеющих и дуговых разрядов, а также свободно-локализованных и сфокусированных микроволновых или СВЧ-разрядов. Представлены существующие подходы в моделировании низкотемпературной плазмы. Особое внимание уделено описанию электронной компоненты плазмы, поскольку именно она является основной при исследовании поведения газоразрядной плазмы. В частности, автором рассмотрено Лоренцово двухчленное приближение, представлен подробный вывод уравнений расширенной гидродинамической модели. Фактически первая глава определяет место исследований автора в рассматриваемой области.

Во второй главе автором представлено подробное описание моделей разрядов постоянного тока в рамках расширенного гидродинамического описания плазмы. При этом отличительной особенностью является тот факт, что самосогласованным образом рассматриваются разрядный промежуток и процессы, протекающие в электродах – нагрев и протекание тока. Особое внимание уделено сопряженным эффектам на границе между электродом и газоразрядной плазмой. Такой подход позволил автору диссертации на основе многочисленных расчетов воспроизвести множество явлений, наблюдаемых в эксперименте, таких как:

- переход из тлеющего разряда в дуговой (причем были выявлены различные варианты этого перехода в зависимости от условий охлаждения электродов);
- автоколебания, возникающие при переходе из Таунсендовского в тлеющий разряд с формированием характерных пульсаций тока и напряжения;
- формирование контрагированного и диффузного токовых пятен на катоде в дуговом разряде и другие эффекты.

Следует отметить, что расчеты были проведены как для атомарных, так и для молекулярных газов. Автором были рассмотрены соответствующие наборы элементарных процессов.

Интересные новые результаты содержатся в **третье главе**. Здесь в рассмотренной во второй главе модели дополнительно учитывается испарение материала электродов в разрядный промежуток, а также процессы с участием испаренного материала. В качестве электродов рассматривается графит. Автором показано, что в дуговом разряде

испаренный в разрядный промежуток материал может играть ключевую роль, в частности, ионы углерода в определенном диапазоне вкладываемой в разряд мощности становятся доминирующими.

Четвертая глава посвящена детальному рассмотрению процессов, протекающих в прикатодной плазме тлеющего разряда – наиболее сложном для описания объекте. В первом параграфе главы анализируется знак пространственного заряда на оси разряда в трубке в области отрицательного свечения. В частности, автором показано, что интерпретация отрицательного знака пространственного заряда характерна для одномерного рассмотрения разрядов от катода до анода. Реальные же разряды всегда, как минимум, двумерны, и аналитический анализ и численные расчеты показали, что в этом случае область отрицательного свечения имеет слабый положительный заряд.

В последующих параграфах главы формулируется самосогласованная многоуровневая гибридная модель короткого тлеющего разряда. Она основана на кинетическом (2D) описании электронной компоненты плазмы и гидродинамическом (1D) или диффузионно-дрейфовом описании тяжелой компоненты плазмы. Численные расчеты проведены для коротких тлеющих разрядов в широком диапазоне давлений. Наиболее важным результатом, полученным в этой главе, представляется корректное описание плазмы отрицательного свечения с низкой температурой основной группы электронов, а также демонстрация формирования узких пиков на высокоэнергетической части функции распределения электронов по энергиям (ФРЭ) от быстрых электронов, появившихся в реакциях пеннинговской ионизации и ударов второго рода.

В пятой главе проведена зондовая диагностика плазмы в области отрицательного свечения короткого тлеющего разряда при низких и высоких давлениях. Проведено сопоставление численных расчетов, полученных в 4 главе в рамках гибридной модели, с результатами зондовых измерений. Предложена и обоснована возможность измерения параметров плазмы с нелокальной ФРЭ с помощью стеночного зонда. Показана возможность регистрации спектров быстрых электронов с помощью стеночного зонда в плазме отрицательного свечения в гелии с малыми примесями и тем самым показана возможность определения состава газовых смесей. Методика апробирована на сложных примесях, включающих аммиак, воздух и органические соединения.

Шестая глава посвящена формулировке физико-математической модели СВЧ-разряда в фокусирующей установке и в пучности стоячей электромагнитной волны и проведению соответствующих численных расчетов в двумерной геометрии.

В частности, в работе показано, что в рассматриваемой фокусирующей системе в зависимости от давления газа и мощности СВЧ-излучения может формироваться от 1 до 4

плазмоидов, два из которых формируются вдоль оси рупора, а два, симметрично расположенных относительно оси рупора – вблизи отражающей поверхности параболического зеркала. Исследована динамика основных параметров плазмы этих разрядов в активной фазе и в фазе послесвечения. Кроме того, исследована динамика филаментации одиночного плазмоида в пучности стоячей электромагнитной волны.

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

Важно отметить, что проделанная автором работа и полученные им результаты имеют большую **практическую значимость**: они могут быть использованы при создании различных типов плазмохимических реакторов, что является востребованным в синтезе различных типов наноструктур и получении новых материалов; в создании компактных анализаторов состава газовых смесей, позволяющих проводить мониторинг на месте в режиме реального времени, а также в устройствах подвода энергии в сверхзвуковые потоки газа, для управления обтеканием аэродинамических тел.

Результаты исследований могут быть востребованы в ведущих научных центрах и образовательных учреждениях, работающих в области физики и механики газовых разрядов и низкотемпературной плазмы.

Достоверность и обоснованность основных выводов работы основаны на детальной проработке используемых методик и подтверждаются сопоставлениями с расчетными и экспериментальными значениями, полученными независимыми методами.

По работе имеются ряд **вопросов и замечаний**:

1. В главе 2 сформулирована достаточно сложная модель газовых разрядов постоянного тока и проведены расчеты как для атомарных, так и молекулярных газов. В частности, приведены расчеты для азота. При этом видно, что в режиме перехода от тлеющего разряда в дуге и в дуговом режиме колебательная температура азота в прикатодной области является несколько завышенной. Не вполне ясно, чем обусловлен этот эффект.
2. В главе 3 получила развитие рассмотренная в главе 2 модель, описывающая процессы как в разрядном промежутке, так и в электродах, применительно к дуговому разряду и с учетом испарения материала электродов в разрядный промежуток. Однако остались неясными следующие моменты:

   а) учитывалось ли изменение давления в разрядном промежутке;

   б) из каких соображений вводилась дополнительная температура для частиц углерода?

в) Каким образом вычислялись коэффициенты подвижности различных сортов ионов в модели, представленной в третьей главе?

Перечисленные замечания не снижают научной ценности работы в целом. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, вносящей заметный вклад в развитие методов моделирования низкотемпературной плазмы и газовых разрядов, а также разработке новых приложений на их основе.

Основные результаты, выносимые на защиту, опубликованы и прошли серьезную апробацию на международных и всероссийских конференциях. Всего по результатам исследования опубликовано 65 статей 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 автором получены три патента.

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,
профессор кафедры
гидроаэромеханики
Санкт-Петербургского
государственного университета

Нагнибеда Екатерина Алексеевна

1 июня 2023 г.

Подпись руки Нагнибеда Е.А.
УДОСТОВЕРЯЮ
Специалист по кадровой работе
«01» 06 2023 г.
Нестерова Л.И.