

ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Рябинина Анатолия Николаевича 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 специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Тема диссертационной работы является актуальной в связи с разработкой технических устройств, в которых присутствует газоразрядная плазма. В частности, газовые разряды используются в поиске новых эффективных методов снижения лобового сопротивления летательных аппаратов, способов управления движением аппаратов и тепловыми потоками у поверхности. Экспериментальные методы исследования электрических разрядов различного типа нуждаются в дополнении математическими моделями, желательно универсальными. Создание математических моделей в виде систем кинетических и газодинамических уравнений, учитывающих разнообразные явления в газовых разрядах, а также разработка методов решения систем уравнений является основным методом исследования в диссертации. Основной метод удачно дополняется сравнением с результатами экспериментов, как своих, так и полученных другими авторами. Такое совместное применение теоретических и экспериментальных методов является сильной стороной диссертации.

Работа имеет хорошо продуманную структуру, состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы, текст изложен на русском и английском языках на 592 страницах. Список цитируемой литературы содержит 439 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы, достоверность результатов, раскрывается научная новизна, практическая значимость, формулируются основные положения, выносимые на защиту. Описаны цели диссертации. Указан личный вклад автора диссертации.

Первая глава посвящена обзору исследований газовых разрядов при постоянных и СВЧ полях при средних и высоких давлениях.

Во второй главе излагаются теоретические исследования газовых разрядов постоянного тока в атомарных и молекулярных газах. Рассмотрен широкий диапазон газовых разрядов от тлеющих разрядов до дуговых. Для всего диапазона сформулирована модель, единым образом описывающая процессы, проходящие в разрядном промежутке и в электродах. Модель основана на уравнениях гидродинамического описания процессов в плазме, учете эмиссии электронов с катода, уравнениях теплового баланса в электродах, уравнениях для плотности тока в электродах. Для решения уравнений предлагается и реализуется численный метод.

В третьей главе исследуется испарение материала электродов, происходящее при дуговом разряде, влияние этого явления на дуговой разряд. Представлены результаты численного исследования на примере разряда между графитовыми электродами.

В четвертой главе изучается плазма в прикатодной области тлеющего разряда. Обосновывается положительность знака заряда в области отрицательного свечения, которое в реальности всегда не является однородным в поперечном направлении. Этот результат подтверждается численным исследованием. Формулируется гибридная модель короткого разряда (без положительного столба) на основе кинетического описания

электронной компоненты и гидродинамического описания тяжелой компоненты. Проведено численное исследование короткого разряда для широкого диапазона давлений.

Пятая глава посвящена описанию экспериментальных зондовых исследований отрицательного свечения. Результаты экспериментов сравниваются с результатами численных исследований. Приложением зондовых исследований является регистрация газовых примесей в буферном газе (гелии) в плазме отрицательного свечения в широком диапазоне давлений.

В шестой главе изучаются условия возникновения плазмы под влиянием СВЧ излучения, сформированного фокусирующей системой. Сформулирована детализированная модель СВЧ-разряда в среде азота, учитывающая распределение энергии между электронами, нейтральными частицами, в том числе между колебательными степенями свободы азота. Численно исследованы различные стадии активной фазы и послесвечения импульсного СВЧ-разряда.

В заключении перечислены основные результаты работы.

Достоверность результатов обеспечивается воспроизводимостью результатов численного решения систем уравнений, воспроизводимостью результатов эксперимента и удовлетворительным согласием между расчетом и экспериментом, а также с данными других авторов. Расчеты по собственным программам автора диссертации согласуются с расчетами с использованием распространенных коммерческих программ пакета Comsol Multiphysics.

Результаты, полученные в диссертации, являются новыми.

Диссертация содержит большое количество хорошо выполненных иллюстраций. Изложение ведется понятным языком.

Замечания по диссертации:

1. В описании расчетов ничего не сказано об исследовании сеточной независимости результатов. Создается впечатление, что такого исследования не проводилось. Правда, в главе 6 приводится обоснование выбранного размера ячейки расчетной сетки в одном конкретном случае. Работа бы в целом выиграла, если бы на рисунках были представлены расчетные сетки или их фрагменты.
2. На рис. 5.19 на странице 221 катод изображен между анодом и сенсором. Таким образом, сенсор располагается вне разряда.
3. На стр. 202 утверждается, что температура основной группы электронов определялась по прямолинейной части логарифма второй производной зондовой вольтамперной характеристики по подаваемому потенциалу в соответствии с формулой (5.3). Это утверждение противоречиво, поскольку в формуле (5.3) температура пропорциональна производной логарифма тока по потенциальному.
4. На странице 40 вместо ссылок на формулы (1.4) и (1.5) должны быть ссылки на формулы (1.1) и (1.2). На страницах 211, 219 и 222 вместо ссылок на формулу (5.1) должна быть ссылка на формулу (5.3), и на странице 212 вместо ссылки на формулу (5.3) должна быть ссылка на формулу (5.5).
5. На странице 235 вместо ссылки на работы [A30-A32] должна быть ссылка на работы [A59-A65]. В переводе на английский ссылка правильная.
6. В разных частях диссертации давление приводится в разных единицах, то в торрах, то в паскалях. Это создает некоторые неудобства при чтении.

Однако, указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации, большинство перечисленных недостатков свидетельствует лишь о некоторой небрежности автора.

Основные результаты диссертации опубликованы в 62 статьях и в 3 патентах, указанные статьи входят в базы данных Web of Science Core Collection или Scopus. Результаты диссертации докладывались на большом количестве международных конференций.

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение.

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 специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Председатель диссертационного совета

Доктор физико-математических наук, с.н.с.,
профессор каф. гидроаэромеханики СПбГУ



Рябинин А. Н.

13.06.2023