

ОТЗЫВ

официального оппонента Рыжкова Сергея Витальевича
на диссертационную работу Коновалова Вениамина Сергеевича
«Исследование процесса ионизации и переноса излучения в канале
плазменного ускорителя», представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность темы диссертации

Представленная диссертационная работа В.С. Коновалова посвящена разработке математических моделей для квазистационарного плазменного ускорителя (КСПУ), на основе которого в настоящее время создается электрореактивный двигатель с двухступенчатой схемой ускорения. Основными преимуществами данного типа двигателя являются высокие показатели тяги и КПД, возможность использования различных газов в качестве рабочего тела, а также квазистационарный режим работы при условии, что время пролета частиц в канале ускорителя много меньше длительности разряда конденсаторной батареи. Высокая надежность и низкая себестоимость разрядов позволяет с высокой степенью эффективности использовать КСПУ в различных вакуумно-плазменных технологиях. Такого типа плазменные ускорители используются также для изучения процессов взаимодействия плазмы с различными материалами в термоядерных исследованиях. С помощью моделей различного уровня сложности В.С. Коновалов решил ряд актуальных задач механики многофазных сред, исследовав процесс ионизации газа и перенос излучения в малых коаксиальных плазменных ускорителях, обеспечивающих ионизацию и первоначальное ускорение плотной низкотемпературной плазмы в первой ступени двухступенчатой установки.

Научная и практическая ценность

Соискатель разработал несколько моделей радиационной магнитной газодинамики (РМГД), провел детальные исследования течений ионизирующегося газа в канале плазменного ускорителя и получил новые результаты. Рассмотрены различные модели процесса ионизации. Особый интерес вызывает исследование переноса излучения и сравнительный анализ результатов, полученных с помощью разных моделей, основанных на методах длинных и коротких характеристик в трехмерной и квазиодномерной постановке задач, а также используя приближение лучистой теплопроводности и диффузионное приближение.

Практическое значение имеет ряд результатов диссертации, включая выявленный эффект предиионизации поступающего в канал газа за счет излучения от фронта ионизации, а также эмпирическое условие стационарности течений ионизирующегося газа, сформулированное в терминах разрядного тока и расхода газа. В.С. Коновалов представил еще один практический результат о том, что СВЧ нагрев может стабилизировать процесс ионизации.

Существует весьма ограниченное количество работ для изучения сложного процесса переноса излучения. Соискатель разработал и представил трехмерную модель переноса излучения, в рамках которой можно рассчитать спектры излучения в направлении любого луча, выходящего из плазменного объема. Получено хорошее совпадение с экспериментальными данными. Это можно использовать для совместного расчетного и экспериментального анализа термодинамических характеристик потоков плазмы.

Практическое значение имеет также один из программных комплексов, на которое оформлено свидетельство о государственной регистрации результатов интеллектуальной деятельности.

Степень обоснованности и достоверности

Соискатель использовал современные подходы для физической постановки задач и хорошо апробированные численные методы. Достоверность и обоснованность результатов подтверждаются верификацией расчетов на разных сетках по пространству и по спектру излучения, а также сравнением результатов расчетов с экспериментальными данными.

Содержание диссертационной работы

Диссертация содержит 157 страниц, включая 48 рисунков, введение, четыре главы, заключение, список литературы, в котором 153 наименования.

Во введении обосновывается актуальность рассматриваемой темы, излагается принцип работы простейшего плазменного ускорителя, кратко описывается иерархия моделей, используемых для моделирования потоков ионизирующегося газа и плазмы в канале КСПУ. Введение также содержит описание предмета исследований, целей и задач диссертационной работы, основных положений, выносимых на защиту.

В первой главе представлена двумерная МГД модель осесимметричных течений ионизирующегося газа в канале КСПУ в предположении локального термодинамического равновесия с учетом электропроводности, теплопроводности и переноса излучения. Рассмотрено решение уравнения переноса излучения методом длинных характеристик в 3D постановке задачи. Приведены формулы для вычисления спектрального коэффициента поглощения и излучательной способности. Проведен анализ решений.

Во второй главе рассмотрена квазиодномерная МГД модель, дополненная уравнением кинетики ионизации и рекомбинации, коэффициенты которого определяются в рамках модифицированного диффузионного приближения (МДП). С помощью данной модели исследован неравновесный процесс ионизации газа с образованием узкого фронта ионизации. Проведен сравнительный анализ различных моделей переноса излучения, включая метод характеристик, приближение лучистой теплопроводности и диффузионное приближение. В результате расчетов сформулировано условие стационарности течений ионизирующегося газа.

В третьей главе представлена квазиодномерная РМГД модель с учетом системы уравнений поуровневой кинетики и уравнения переноса излучения.

Метод длинных характеристик в расчетах поля излучения адаптирован для квазиодномерной модели течения. Рассчитаны населенности уровней атома в отсутствие и при наличии поля излучения. Выявлено влияние излучения плазмы, которое приводит к предварительной ионизацию потока газа, поступающего на фронт ионизации в исследуемой установке проточного типа. Проведен сравнительный анализ процесса ионизации в разных моделях.

В четвертой главе исследуется процесс ионизации гелия и азота с образованием плазмы сложного состава, включая ионы с различной кратностью ионизации. МГД модель описывает двумерные осесимметричные течения ионизирующегося газа с учетом системы уравнений ионизационного равновесия в приближении локального термодинамического равновесия. Для учета потерь энергии на тормозное, рекомбинационное и линейчатое излучение в правую часть уравнения баланса энергии добавлены слагаемые, описывающие эти потери в приближении прозрачной плазмы.

В заключении суммированы результаты проведенных исследований, которые определяют новизну и значимость работы.

Можно выделить следующие результаты:

- разработана трехмерная модель переноса излучения и рассчитано поле излучения в канале плазменного ускорителя в канале КСПУ;
- определено условие стационарности течений ионизирующегося газа в квазиодномерной РМГД модели с учетом кинетики ионизации и рекомбинации в рамках МДП для неравновесной плазмы;
- рассчитаны населенности уровней атома в окрестности фронта ионизации при учете системы уравнений поуровневой кинетики;
- получены распределения многозарядных ионов гелия и азота с различной кратностью ионизации в потоках плазмы сложного состава.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. В диссертации не представлены оценки, на основании которых можно было бы сделать вывод о равенстве скоростей и температур различных компонент среды. В то же время предположение о равенстве скоростей и температур используется для всех представленных МГД моделей течений ионизирующегося газа.
2. В главе 1 не дано описание спектральных линий вдали от центра.
3. В главе 3 перечисляется ряд столкновительных и радиационных процессов, учтенных при моделировании поуровневой кинетики, но некоторые процессы не рассматриваются. Почему не учитывается, например, трехчастичная и диэлектронная рекомбинация?
4. В главе 4 исследуется перенос излучения в гелиевой плазме, но отсутствует детальное описание коэффициентов поглощения и излучательной способности гелия, представленных на рис. 40. В частности, какие сечения ионизации использовались для вычисления коэффициентов поглощения и излучательной способности гелия?

5. В названии п. 2.7 правильнее было использовать словосочетание не "критерии подобия", а безразмерные параметры, тем более что автор коэффициенты ню и бета дальше так и называет.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Диссертационная работа Коновалова В. С. выполнена на высоком научном уровне и имеет несомненную теоретическую и практическую ценность. Результаты работы полноценно представлены в публикациях соискателя. Автореферат верно и полно отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертация В.С. Коновалова удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы», и требованиям п. 9 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 года № 842 «О порядке присуждения ученых степеней». Ее автор Коновалов Вениамин Сергеевич заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент

Рыжков Сергей Витальевич

доктор физико-математических наук, профессор,

профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)»,

ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)»,

105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Тел.: +7(499)263-65-70, e-mail: svryzhkov@bmstu.ru

С.В. РЫЖКОВ

29.11.2023

Подпись д.ф.-м.н., профессора Рыжкова Сергея Витальевича заверяю



ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ

П.В. РЫЖКОВ

8-499-263-60-48