

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор ИИМ им. М.В. Келдыша РАН

Член-корреспондент РАН

А.И. Аптекарев

«июня» 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Диссертация Коновалова Вениамина Сергеевича «Исследование процесса ионизации и переноса излучения в канале плазменного ускорителя» выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

В период подготовки диссертации с 2007 г. и по настоящее время соискатель работает в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» в отделе № 6 в должности младшего научного сотрудника.

В 2007 г. соискатель окончил магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» по направлению подготовки прикладная математика и физика. Присвоена степень «Магистр». 16 октября 2007 года он поступил и 15 октября 2010 года окончил очную аспирантуру Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» по направлению подготовки 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы». Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2023 г. Федеральным государственным учреждением "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, Козлов Андрей Николаевич работает в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» в должности главного научного сотрудника отдела № 8.

По итогам обсуждения диссертации **принято следующее заключение:**

Тема диссертации является актуальной, поскольку исследования переноса излучения и процесса ионизации определяют актуальные направления в области современной фундаментальной и прикладной механики. В диссертации представлены численные модели и результаты вычислительных экспериментов для исследования

физических процессов в квазистационарных плазменных ускорителях (КСПУ), которые являются многофункциональными системами, предназначенными для генерации высокоскоростных потоков плазмы. В настоящее время установки КСПУ используются в различных технологических приложениях и термоядерных исследованиях. Кроме того, плазменные ускорители представляют интерес в качестве перспективных мощных электрореактивных плазменных двигателей (ЭРПД) для космических приложений.

Целью диссертационной работы является исследование процесса ионизации и переноса излучения в потоках ионизирующегося газа и плазмы в коаксиальных каналах плазменных ускорителей на основе новых численных моделей.

В диссертации решались следующие **задачи**:

1. Построение поля излучения на основе 3D модели переноса излучения в двумерных осесимметричных потоках ионизирующегося водорода, рассчитанных в канале КСПУ в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР).
2. Определение эмпирического условия стационарности течений ионизирующегося водорода в КСПУ на основе квазиодномерной МГД модели, дополненной уравнением кинетики ионизации и рекомбинации в рамках модифицированного диффузионного приближения (МДП) с учетом энергетической структуры атомов.
3. Численное исследование процесса ионизации и течения ионизирующегося газа в канале КСПУ на основе модифицированных МГД уравнений, дополненных системой уравнений поуровневой кинетики с учетом переноса излучения.
4. Проведение численных экспериментов для изучения течений ионизирующегося гелия и азота на основе двумерной МГД модели, дополненной системой уравнений ионизационного равновесия при условии возможного образования многозарядных ионов с различной кратностью ионизации. Определение условия стационарности течений ионизирующегося гелия в установке КСПУ.

Основные результаты диссертации:

1. Разработана трехмерная модель переноса излучения в потоках ионизирующегося газа в канале плазменного ускорителя. Выявлены особенности поля излучения в окрестности фронта ионизации для двумерных осесимметричных течений, рассчитанных на основе МГД модели в приближении ЛТР.
2. В результате вычислительных экспериментов сформулировано эмпирическое условие стационарности течений ионизирующегося газа на основе квазиодномерной МГД модели, дополненной уравнением кинетики ионизации и рекомбинации в рамках МДП с учетом переноса излучения.
3. Разработана модель радиационной магнитной газодинамики (РМГД) с учетом системы уравнений поуровневой кинетики и переноса излучения. Выявлены особенности неравновесного процесса ионизации в канале КСПУ, связанные с распределением населенностей атомных уровней. Установлено, что радиационные процессы оказывают существенное влияние на возбуждение атомных уровней и ионизацию среды перед фронтом.
4. Разработаны двумерные МГД модели осесимметричных течений ионизирующегося гелия и азота в КСПУ с учетом системы уравнений ионизационного равновесия при наличии многозарядных ионов с различной кратностью ионизации. Выявлены

особенности процесса ионизации азота и гелия с образованием многозарядных ионов. Сформулировано условие стационарности течений ионизирующегося гелия.

Все результаты, выносимые на защиту, получены соискателем лично.

Научная новизна. Впервые разработана РМГД модель для исследования физических процессов и двумерных осесимметричных течений ионизирующегося газа и плазмы в КСПУ в приближении ЛТР. На основе разработанной 3D модели переноса излучения получены спектральные и интегральные характеристики излучения в канале плазменного ускорителя. Эмпирическое условие стационарности течения ионизирующегося газа в КСПУ впервые сформулировано на основе квазиодномерной модели течения с учетом кинетики ионизации и рекомбинации в рамках модифицированного диффузионного приближения. Разработан новый упрощенный вариант модели переноса излучения в квазиодномерном приближении. Создана новая модель неравновесного процесса ионизации с учетом поуровневой кинетики и впервые проведены исследования в канале плазменного ускорителя на основе совместного решения системы МГД уравнений, системы уравнений поуровневой кинетики и решения задачи переноса излучения. С помощью РМГД моделей в КСПУ выявлен эффект предиионизации в потоке поступающего газа за счет излучения, идущего от фронта ионизации. Впервые исследовано влияние излучения на поуровневый и ионизационный состав среды в окрестности фронта.

Впервые получены расчетные спектры излучения в направлении лучей, выходящих из объема плазмы в канале КСПУ. Сопоставление расчетных и экспериментальных спектров открывает новый этап в развитии комплексного подхода для изучения процессов и определения термодинамических параметров в потоках ионизирующегося газа и плазмы.

Впервые проведено численное исследование осесимметричных течений ионизирующегося гелия и азота в канале КСПУ на основе модифицированных МГД уравнений, дополненных системой уравнений ионизационного равновесия при наличии многозарядных ионов с различной кратностью ионизации. Показано, что в КСПУ возможно образование многозарядных ионов в потоках ионизирующегося азота и гелия.

Теоретическая ценность. В работе представлены РМГД модели различного уровня сложности для описания течений ионизирующегося газа в канале КСПУ, включая различные способы описания процесса ионизации и переноса излучения. Представлены задачи разной размерности. МГД модели рассмотрены в 1D и 2D постановках. Модели переноса излучения основаны на 1D и 3D постановках, используя метод коротких и длинных характеристик, а также приближение лучистой теплопроводности и диффузионное приближение. Получены новые результаты, которые существенно уточняют прежние представления о физических процессах в плазменных ускорителях.

Практическая значимость. Ряд выявленных эффектов имеет практическое значение. Существенным элементом разрабатываемых ЭРПД на основе КСПУ является выявленная предиионизация поступающего нейтрального газа за счет излучения, идущего от фронта ионизации. Практическое значение имеет сформулированное эмпирическое условие стационарности течений ионизирующегося газа, а также стабилизация таких течений с помощью СВЧ нагрева. Кроме того, вычислительный код, разработанный на основе 3D

модели переноса излучения, позволяет получить спектры излучения в направлении любого луча, выходящего из объема плазмы. Это может быть использовано при разработке комплексного подхода и совместных теоретико-вычислительных и экспериментальных исследованиях для изучения плазмодинамических процессов в установке КСПУ.

Достоверность результатов основана на использовании современных подходов к моделированию физических процессов и применении апробированных вычислительных методов. Верификация моделей и решений проведена на основе сопоставления результатов расчетов, полученных на разных сетках и с помощью разных моделей. Контроль качества вычислительных экспериментов подтвердил применимость разработанных программных комплексов для изучения течений ионизирующегося газа и переноса излучения в установках КСПУ.

Материалы диссертации полно представлены в 41 печатных работах: 9 из них – статьи в рецензируемых изданиях, 8 из них – статьи, рекомендованные ВАК и индексируемые в базах данных Web of Science и Scopus, включая статью в издании первого квартиля Q1. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Kozlov A.N., Garkusha I.E., Konovalov V.S., Novikov V.G. The radiation intensity of the Lyman alpha line at the ionization front in the quasi-steady plasma accelerator. // Problems of Atomic Science and Tech. Ser.: Plasma Physics. 2013. No. 1. P. 128-130. (Scopus, ВАК)
2. Брушлинский К.В., Козлов А.Н., Коновалов В.С. Численные модели стационарных и пульсирующих течений ионизирующегося газа в каналах плазменных ускорителей. // ЖВМ и МФ. 2015. Т. 55, № 8. С. 1405-1416. (WoS, Scopus, ВАК)
3. Kozlov A.N., Konovalov V.S. Numerical study of the ionization process and radiation transport in the channel of plasma accelerator. // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2017. V. 51. P. 169-179. Q1 (WoS, Scopus, ВАК)
4. Kozlov A.N., Konovalov V.S. Radiation transport in the ionizing gas flow in the quasi-steady plasma accelerator. // J. of Physics: Conf. Ser. 2018. V. 946. 012165. (Scopus, ВАК)
5. Kozlov A.N., Konovalov V.S. Optimization of the radiation transport calculation for quasi-one-dimensional model of the ionizing gas flows. // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1336. 012003. (Scopus, ВАК)
6. Kozlov A.N., Klimov N.S., Konovalov V.S., Podkovyrov V.L., Urlova R.V. Study of the ionizing gas flow in the channel of plasma accelerator with different ways of gas inflow at the inlet. // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1394. 012021. (Scopus, ВАК)
7. Климов Н.С., Коваленко Д.В., Подковыров В.Л., Кочнев Д.М., Ярошевская А.Д., Урлова Р.В., Козлов А.Н., Коновалов В.С. Экспериментальное исследование интегральных характеристик потока плазмы и разряда квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя с собственным магнитным полем. // ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез. 2019. Т. 42, № 3. С. 52-63. (Scopus, ВАК)
8. Козлов А.Н., Коновалов В.С. Эмпирическое условие стационарности двумерных течений ионизирующегося водорода в канале плазменного ускорителя. // Математическое моделирование. 2023, том 35, №1, С. 13-33. (Scopus, ВАК)

9. Козлов А.Н., Коновалов В.С. Исследование процесса ионизации азота и образования многозарядных ионов в канале плазменного ускорителя. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 100. 32 с. (ВАК)
10. Козлов А.Н., Коновалов В.С. Модель неравновесного процесса ионизации с учетом поуровневой кинетики и переноса излучения в канале плазменного ускорителя. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 103. 28 с. (ВАК)
11. Коновалов В.С. Перенос излучения в квазиодномерной модели течений ионизирующегося газа в канале плазменного ускорителя. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 54, 24 с. (ВАК)
12. Коновалов В.С. Исследование устойчивости процесса ионизации гелия в канале плазменного ускорителя. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2021. № 108. 24 с. (ВАК)
13. Козлов А.Н., Коновалов В.С., Бахтин В.А., Захаров Д.А. Параллельная программа для численного исследования динамики потоков плазмы в каналах квазистационарных плазменных ускорителей. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 3 декабря 2018 года. № 2018665229.

Личный вклад соискателя состоит в том, что он самостоятельно разработал математические модели для описания кинетики ионизации и рекомбинации в потоках ионизирующихся газов, а также модели для изучения переноса излучения, в том числе на основе 3D постановки задачи. Кроме того, соискатель разработал новый численный метод для решения уравнения переноса излучения в квазиодномерном приближении. Им реализован ряд вычислительных комплексов и проведены расчетные исследования для изучения переноса излучения и процесса ионизации в канале КСПУ, используя ЛТР приближение и модифицированное диффузионное приближение, учитывая поуровневую кинетику в течениях ионизирующихся газов, а также решая систему уравнений ионизационного равновесия при условии образования многозарядных ионов с различной кратностью ионизации. В результате соискателем определены спектральные и интегральные характеристики излучения в окрестности фронта ионизации, который образуется в канале плазменного ускорителя. Проведя серии вычислительных экспериментов на основе разных моделей, соискатель сформулировал эмпирические условия стационарности течений ионизирующихся водорода и гелия в канале КСПУ. Им выявлен эффект предионизации поступающих газов за счет излучения, идущего от фронта ионизации. Используя разработанные программные комплексы, соискателем также выявлены особенности динамики многокомпонентной плазмы, включая течения ионизирующихся гелия и азота с образованием ионов различной кратности ионизации.

Соискатель совместно с научным руководителем анализировал численные эксперименты, активно участвовал в подготовке и оформлении публикаций, самостоятельно подготовил несколько печатных работ, выступал с докладами на конференциях.

Результаты исследований докладывались на следующих научных конференциях, семинарах и съезде:

- XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015);

- Международная конференция "Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество" (Эльбрус, 2009, 2017);
- Международ. конференция "Plasma Physics and Controlled Fusion" (Алушта, 2012);
- Научная школа-конференция "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики" (Алушта, 2007, 2008);
- International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics (Москва, ОИВТ РАН, 2015, 2016, 2018, 2019, 2020, 2021);
- Всероссийская конференция "Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов решения задач математической физики" (Дюрсо, 2014);
- Международная конференция "Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность" (Звенигород, 2016);
- Международная конференция "Забабахинские научные чтения" (Снежинск, 2017);
- Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: methods, tools, and outcomes (Новосибирск, 2018, 2019, 2021, 2022).

Диссертация соответствует требованиям, установленным в пп. 9-14 Положения «О присуждении ученых степеней», которое утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к кандидатским (докторским) диссертациям, и является законченной научно-квалификационной работой.

Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертация «Исследование процесса ионизации и переноса излучения в канале плазменного ускорителя» Коновалова Вениамина Сергеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Заключение принято на расширенном заседании научного семинара отдела № 15 «Математическое моделирование» ИПМ им. М.В. Келдыша РАН под руководством член-корр. РАН, д.ф.-м.н., зав. отделом № 15 В.Ф. Тишкина и д.ф.-м.н., г.н.с. А.А. Кулешова.

На заседании присутствовало 24 человека, из них 7 докторов наук и 7 кандидатов наук.

Результаты голосования: «за» - 24 человек, «против» - 0 человек, «воздержалось» - 0 человек. Протокол № 3 от 6 апреля 2023 г.



Тишкин Владимир Федорович
член-корр. РАН, д.ф.-м.н., зав. отд. № 15



Кулешов Андрей Александрович
д.ф.-м.н., г.н.с. отд. № 15