

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.237.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ  
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 26.12.2023 № 14

О присуждении **Коновалову Вениамину Сергеевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование процесса ионизации и переноса излучения в канале плазменного ускорителя» по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 29 августа 2023 года (протокол заседания №14/пз) диссертационным советом 24.1.237.01, созданным на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), 125047, Москва, Миусская пл., д. 4. Диссертационный совет утвержден 03.06.2021 г. приказом Минобрнауки РФ от 24 февраля 2021 г. № 118. На своем заседании 26 октября 2023 г. диссертационный совет принял решение о переносе даты защиты на 26.12.2023 г. в связи со служебной необходимостью.

Соискатель Коновалов Вениамин Сергеевич родился 1 мая 1984 года.

В 2007 году соискатель окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» с

присвоением квалификации магистр по направлению подготовки прикладная математика и физика.

В 2010 году он окончил очную аспирантуру ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по направлению подготовки 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

В настоящее время соискатель работает младшим научным сотрудником в лаборатории «Большие данные и интеллектуальные системы» ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Диссертация выполнена в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

**Научный руководитель** - доктор физико-математических наук, Козлов Андрей Николаевич, главный научный сотрудник отдела № 8 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

**Официальные оппоненты:**

**Кудряшов Николай Алексеевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики Института лазерных и плазменных технологий ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

**Рыжков Сергей Витальевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теплофизики ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» в своем **положительном** отзыве, подписанном **Надирадзе Андреем Борисовичем**, доктором технических наук, заведующим кафедрой 208 Московского авиационного института (национального исследовательского университета) и **Дьяконовым Григорием Александровичем**, кандидатом технических наук, ведущим научным сотрудником Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики Московского авиационного

института (национального исследовательского университета) указала, что работа посвящена актуальным исследованиям плазмодинамических процессов в каналах квазистационарных плазменных ускорителей (КСПУ). Представленные исследования связаны с разработкой электрических ракетных двигателей (ЭРД) нового поколения на основе КСПУ для космических приложений при наличии компактных атомных реакторов. Работа вносит существенный вклад в разработку новых моделей процесса ионизации и переноса излучения, которые расширяют возможности для изучения сложных физических процессов в КСПУ, ЭРД и других установках. Диссертация В.С. Коновалова выполнена на высоком научном уровне, содержит решение актуальных задач плазмодинамики и механики плазмы и является законченным научным исследованием. Содержание и результаты работы соответствуют паспорту научной специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы» и требованиям п. 9 Постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней». Автор В.С. Коновалов заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Соискатель имеет 41 опубликованную работу по теме диссертации, в том числе 8 статей в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, 12 публикаций – в изданиях, входящих в перечень ВАК, из них 2 работы без соавторов. Основные публикации по теме диссертации:

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 Technology. Series: Plasma Physics. 2013. No. 1. P. 128-130. **(Scopus)**
2. Брушлинский К.В., Козлов А.Н., Коновалов В.С. Численные модели стационарных и пульсирующих течений ионизирующегося газа в каналах плазменных ускорителей. // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2015. Т. 55, № 8. С. 1405-1416. (Brushlinskii K.V.,

- Kozlov A.N., Konovalov V.S. Numerical models of steady-state and pulsating flows of self-ionizing gas in plasma accelerator channels. // *Comp. Math. and Math. Physics*, 2015. V. 55, No. 8. P. 1370–1380.) **(WoS, Scopus, BAK)**
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. **(WoS, Scopus, Q1)**
  4. Kozlov A.N., Konovalov V.S. Radiation transport in the ionizing gas flow in the quasi-steady plasma accelerator.// *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 946. 012165. **(Scopus)**
  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)**
  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)**
  7. Козлов А.Н., Коновалов В.С. Эмпирическое условие стационарности двумерных течений ионизирующегося водорода в канале плазменного ускорителя. // *Математическое моделирование*. 2023. Т. 35, № 1. С. 13-33. (Kozlov A.N., Konovalov V.S. Empirical stationary condition of two-dimensional flows of ionizing hydrogen in the plasma accelerator channel. // *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2023, V. 15, No. 4, P. 630-642.) **(BAK, Scopus)**
  8. 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. **(BAK)**
  9. Коновалов В.С. Исследование устойчивости процесса ионизации гелия в канале плазменного ускорителя. // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2021. № 108. 24 с. **(BAK)**

10. 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 гос. регистрации программы для ЭВМ от 03.12.2018. № 2018665229.

Личный вклад соискателя в публикации заключается в разработке моделей процесса ионизации и переноса излучения, создании программных комплексов для численного моделирования течений ионизирующегося газа в КСПУ, а также проведении расчетов и визуализации результатов численного моделирования процессов в плазменных ускорителях с использованием представленных подходов и численных методов.

Научные статьи отражают основные результаты диссертационной работы. Сведения об опубликованных соискателем работах достоверны.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы ведущей организации и оппонентов, а также 3 отзыва на автореферат. Все отзывы положительные. В отзывах содержится ряд замечаний.

*Замечания в отзыве ведущей организации МАИ:*

1. Во всех представленных МГД моделях предполагается равенство температур электронов и тяжелых частиц. Во-первых, это вызывает сомнения, поскольку обычно температура электронов в относительно разреженной плазме превышает температуру тяжелых частиц. Во-вторых, насколько оправдано данное предположение с учетом того, что в описании процесса ионизации в различных приближениях участвует температура электронной компоненты плазмы?
2. В диссертационной работе не приведены оценки, позволяющие использовать предположение о равенстве скоростей всех компонент. Скорость нейтральных атомов может быть заметно меньше. В то же время в работе предполагается, что скорости всех трех компонент равны в достаточно плотной среде.
3. Корректно ли говорить о трехмерной модели переноса излучения, представленной в первой главе диссертации, учитывая азимутальную

симметрию течений плазмы в канале ускорителя? Терминологически более корректно эту модель называть квазидвумерной.

4. Наличие металлических электродов может привести к тому, что поле излучения будет изотропным в результате большого количества отражений от стенок. Насколько сильно могут измениться результаты исследования переноса излучения при учете его отражения от электродов?
5. В работе отсутствует анализ влияния ультрафиолетовой области спектра излучения на перенос энергии в канале ускорителя, что может быть существенным фактором.

*В отзыве официального оппонента, д.ф.-м.н. Кудряшова Н.А. указано:*

1. Не представлено объяснение того, что при моделировании переноса излучения в главе 1 почему-то не учитывается рассеяние.
2. В главе 2 представлены формулы (2.29) и (2.30) для вычисления коэффициентов ионизации и рекомбинации в одном из уравнений (2.5), описывающем скорость рождения электронов, но отсутствует описание метода, с помощью которого решается указанное дифференциальное уравнение для моделирования процесса ионизации. В то же время в главе 1 подробно рассмотрены методы, использованные для решения гиперболической и параболической части системы МГД уравнений.
3. В главе 3 отсутствует описание метода решения системы уравнений поуровневой кинетики, которая по своей природе относится к классу жестких систем дифференциальных уравнений.
4. В главе 4 учитываются потери энергии на излучение с помощью известных конечных соотношений (4.3)-(4.5). В то же время на рис. 42г представлены распределения плотности энергии излучения и векторного поля плотности потока энергии излучения как результат решения задачи о переносе излучения методом длинных или коротких характеристик, но об этом ничего не сказано в тексте диссертации.

*В отзыве официального оппонента, д.ф.-м.н. Рыжкова С.В. отмечено:*

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.

*Отзыв на автореферат* от д.ф.-м.н. **Асташинского Валентина Мироновича**, заведующего отделением физики плазмы и плазменных технологий, заведующего лабораторией физики плазменных ускорителей Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, члена-корреспондента НАН Республики Беларусь не содержит замечаний.

*Отзыв на автореферат* от д.ф.-м.н. **Куликова Игоря Михайловича**, ведущего научного сотрудника лаборатории суперкомпьютерного моделирования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН содержит следующие замечания:

1. В автореферате не приведены численные методы решения уравнений магнитной газодинамики и методы решения уравнений с теплопроводным термом в рамках динамики замагниченной плазмы.
2. Ничего не сказано о верификации разработанной численной методики, например, как для кода ATHENA (Stone et al., ApJS, 2008).
3. В рукописи опущены детали программной реализации в части архитектуры кода, используемых языков программирования и библиотек, а также средств параллельного программирования и анализа производительности кода.

*Отзыв на автореферат* от к.ф.-м.н. **Гуторова Константина Михайловича**, научного консультанта проекта по созданию ЭРД на основе КСПУ в АО "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований" содержит следующие замечания:

1. В работе показано, что учет кинетики ионизации и рекомбинации в рамках модифицированного диффузионного приближения и при решении системы поуровневой кинетики существенно влияет на распределение термодинамических параметров в канале ускорителя. Однако, в автореферате не указано, как использование продвинутых моделей влияет на расчетные спектры излучения.
2. На рисунке 4 наблюдается снижение плотности в потоке существенно раньше фронта ионизации, что не пояснено в тексте автореферата.
3. В качестве примера расчета во второй главе выбрана постановка с начальной температурой 4000 К, что сильно отличается от 750–1000 К в остальных примерах. Обоснования такого выбора не приведены в автореферате.
4. В автореферате не поясняется причина возникновения пульсирующего режима течения, реализующегося в численных моделях.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации связан с их широкой известностью и высоким уровнем компетентности по всем



основным вопросам диссертации, включая численное моделирование задач радиационной магнитной газовой динамики, разработку и реализацию вычислительных алгоритмов в виде программных комплексов, применение методов и средств математического моделирования для решения сложных научных и практических задач. Это подтверждается списком публикаций официальных оппонентов и сотрудников ведущей организации.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований в рамках построенной иерархической структуры:**

1. **Разработана** 3D модель переноса излучения в потоках ионизирующегося газа в канале КСПУ. На основе вычислительных экспериментов **определены** характеристики поля излучения в окрестности фронта ионизации для двумерных осесимметричных течений, рассчитанных на основе модели радиационной магнитной газодинамики (РМГД) в приближении локального термодинамического равновесия. **Создан** программный комплекс, предназначенный для численного решения задач радиационной магнитной газодинамики, включая параллельные вычисления на суперкомпьютерах.

2. В серии вычислительных экспериментов **определена** граница между пульсирующими и стационарными течениями, а также **сформулировано** эмпирическое условие стационарности течений ионизирующегося газа в рамках квазиодномерной РМГД модели с учетом переноса излучения и кинетики ионизации и рекомбинации на основе модифицированного диффузионного приближения.

3. **Разработана** РМГД модель течений ионизирующегося газа в КСПУ, дополненная уравнениями поуровневой кинетики с учетом переноса излучения. В вычислительных экспериментах **выявлены** особенности неравновесных процессов, связанные с распределением населенностей атомных уровней в окрестности фронта ионизации. **Установлено**, что

радиационные процессы оказывают существенное влияние на возбуждение атомных уровней и ионизацию поступающего газа перед фронтом.

4. Впервые **реализована** двумерная РМГД модель осесимметричных течений ионизирующихся газов в КСПУ с учетом системы уравнений ионизационного равновесия при наличии многозарядных ионов с различной кратностью ионизации. В вычислительных экспериментах **установлено**, что процесс ионизации азота и гелия сопровождается образованием многозарядных ионов в канале плазменного ускорителя. **Определено** условие стационарности течений ионизирующегося гелия.

**Теоретическая значимость исследования** состоит в том, что разработаны РМГД модели различного уровня сложности и на их основе численно исследован фазовый переход от газообразного состояния материи к плазме на фронте ионизации, формирующемся в потоках ионизирующегося газа в канале КСПУ. Представлена иерархия моделей процесса ионизации и переноса излучения, включая постановку и решение задач разной размерности. Результатом исследований, представленных в диссертации, является детальная картина физических процессов в КСПУ.

**Практическое значение результатов исследования** заключается в том, что на основе представленных РМГД моделей разработаны программные комплексы, позволяющие проводить исследования процесса ионизации и переноса излучения в различных установках, включая ЭРД и КСПУ. Практическое значение имеет формулировка эмпирического условия стационарности течений ионизирующегося газа как результат серии численных экспериментов. Применение разработанной 3D модели переноса излучения для расчета спектров излучения в направлении любого луча, выходящего из объема плазмы, открывает новые возможности для комплексных экспериментальных и теоретико-вычислительных исследований, включая диагностику потоков плазмы на основе спектроскопии.

**Достоверность** научных положений и выводов диссертации обеспечивается использованием современных моделей для изучения

физических процессов, применением апробированных вычислительных методов, верификацией различных этапов исследований, сравнением численных результатов моделирования, полученных с помощью разных моделей и на последовательности сгущающихся сеток, а также сравнением с экспериментальными данными.

**Личный вклад соискателя** состоит в разработке и программной реализации РМГД моделей для изучения течений ионизирующегося газа в канале КСПУ, проведении и визуализации расчетов, а также анализе результатов численных экспериментов. Материалы из совместных публикаций, включенные в диссертацию, непосредственно принадлежат соискателю. Им самостоятельно подготовлено несколько печатных работ.

В ходе защиты диссертации вопросы соискателю задали члены совета Гасилов В.А., Змитренко Н.В., Меньшов И.С., Аристова Е.Н.; заместитель председателя совета Тишкин В.Ф.; старший научный сотрудник отдела №6 ИПМ им. М.В Келдыша РАН к.ф.-м.н. Шильков А.В.

Существенных замечаний по диссертации высказано не было. Соискатель Коновалов В.С. содержательно ответил на все заданные ему в ходе заседания вопросы и замечания, приведенные в письменных отзывах.

Во время дискуссии в поддержку диссертации выступили члены совета: Мажукин В.И., Аристова Е.Н., Орлов Ю.Н., Змитренко Н.В., Тишкин В.Ф.

На заседании 26 декабря 2023 года диссертационный совет принял решение за **разработку** моделей радиационной магнитной газодинамики, **исследование** течений ионизирующегося газа и переноса излучения в каналах квазистационарных плазменных ускорителей, в том числе с учетом кинетики населенностей атомных уровней, которые вносят существенный вклад в развитие магнитной газодинамики, присудить Коновалову Вениамину Сергеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

