

«УТВЕРЖДАЮ»

И. о. проректора МАИ

по научной работе

д. т. н. профессор

Ю. А. Равикович



«04» декабря 2023 г.

### Отзыв ведущей организации

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»

Диссертационная работа Коновалова В.С. посвящена исследованию плазмодинамических процессов в каналах квазистационарных плазменных ускорителей (КСПУ). Данные многофункциональные установки обеспечивают генерацию высокоскоростных потоков плазмы. Их используют в различных технологических приложениях и термоядерных исследованиях. На основе КСПУ разрабатываются также перспективные электроракетные плазменные двигатели с энергопитанием от ядерной энергоустановки.

**Актуальность избранной темы.** Актуальность исследований связана с разработкой новых моделей в области современной механики и плазмодинамики. Модели процесса ионизации и переноса излучения, представленные в диссертации, расширяют возможности изучения сложных физических процессов в КСПУ и других установках. Полученные результаты способствуют разработке электрических ракетных двигателей (ЭРД) нового поколения с электромагнитным механизмом ускорения достаточно плотной плазмы. Плазменные двигатели на основе КСПУ, обладая высоким КПД, будут иметь тягу, пропорциональную квадрату разрядного тока. В то же время расход газа линейно зависит от разрядного тока. Большие скорости потока плазмы на выходе обеспечивают эффективное использование плазмообразующего вещества, например, водорода.



**Связь работы с планами соответствующих отраслей науки и народного хозяйства.** Исследования, представленные в диссертационной работе, направлены на совершенствование установок типа КСПУ. Потoki плазмы различного состава, генерируемые данными установками, используются для обработки поверхностей различных материалов с целью изменения их свойств и последующего использования в различных отраслях народного хозяйства. Установки КСПУ рассматриваются как инжекторы высокоэнергетичных потоков плазмы для перспективных термоядерных установок. Модификация КСПУ в качестве ЭРД открывает новые возможности для космических приложений и может обеспечить эффективное перемещение космических аппаратов в околоземном пространстве и на большие расстояния в межпланетных перелетах. Учитывая использование новых мощных и компактных ядерных энергоустановок, разработка ЭРД на основе КСПУ, включая моделирование различных процессов, проводится в рамках программы "Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации".

**Новизна исследования и полученных результатов.** В диссертационной работе представлены новые численные модели радиационной магнитной газодинамики (РМГД) для исследования плазмодинамических процессов в КСПУ, а также ряд новых результатов. В частности, получены эмпирические условия стационарности двумерных осесимметричных течений ионизирующегося водорода и гелия в канале плазменного ускорителя. Определены спектральные, интегральные и угловые характеристики излучения в канале КСПУ. Рассчитан поуровневый состав атомов водорода в потоке ионизирующегося газа. Выявлен эффект предионизации плазмы за счет излучения, идущего от формирующегося фронта ионизации. Выявлена возможность образования многозарядных ионов в потоках ионизирующегося гелия и азота. Расчет спектров излучения в направлении лучей, выходящих из канала плазменного ускорителя, и их сопоставление с экспериментальными данными открывают новые возможности для комплексного изучения физических процессов в потоках ионизирующихся газов и плазмы.

**Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов.** Разработанные РМГД модели течения ионизирующегося газа и соответствующие вычислительные комплексы образуют иерархическую структуру. Представлены также различные модели переноса излучения с использованием методов длинных и коротких характеристик, а также в приближении лучистой теплопроводности и диффузионном приближении. Все это позволяет исследовать процесс ионизации и переноса излучения в разных приближениях и для различных установок. Многие результаты, представленные в диссертации, также являются практически значимыми. К ним относится эффект предионизации поступающего в канал нейтрального газа, условие стационарности течений ионизирующихся водорода и гелия, стабилизация течения с помощью СВЧ нагрева. Разработанные модели позволяют получить спектры излучения, которые используются для



диагностики плазмы и могут быть сопоставлены с экспериментальными данными в рамках комплексных исследований плазодинамических процессов. Моделирование процессов в плазменных ускорителях и ЭРД на основе КСПУ проводится в тесном взаимодействии с экспериментальными исследованиями в соответствии с рядом публикаций.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений.** Научные положения, выводы и заключения обоснованы. Автор диссертационной работы использовал современные подходы при моделировании физических процессов и хорошо зарекомендовавшие себя вычислительные методы. Проведена верификация моделей. Сопоставлены результаты расчетов, полученных на разных сетках и с помощью разных моделей. Основные результаты работы доложены на всероссийских и международных конференциях. По теме диссертации опубликована 41 работа, включая 9 статей в журналах из перечня рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и входящих в системы цитирования Web of Science и Scopus.

**Общая характеристика диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации составляет 157 страниц, включая 48 рисунков. Библиография содержит 153 наименования.

Во введении представлено современное состояние исследований, обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, представлены положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание диссертационной работы.

В главе 1 представлена расчетная модель двумерных осесимметричных течений ионизирующегося газа. Модель основана на МГД уравнениях с учетом электропроводности, теплопроводности и переноса излучения. Процесс ионизации моделируется в приближении локального термодинамического равновесия для трехкомпонентной среды, состоящей из атомов, ионов и электронов. Рассмотрена модель переноса излучения с учетом основных механизмов излучения и поглощения в широком спектральном диапазоне. Решение уравнения переноса излучения в многогрупповом приближении производится методом длинных характеристик в трехмерной постановке задачи. Один из основных результатов первой главы связан с построением поля излучения, включая спектральные, угловые и интегральные характеристики излучения.

В рамках иерархической структуры в исследовании процесса ионизации в главе 2 рассмотрена квазиодномерная МГД модель с учетом дополнительного уравнения кинетики ионизации и рекомбинации. Соответствующие коэффициенты ионизации и рекомбинации определены на основе модифицированного диффузионного приближения. Правая часть уравнения кинетики ионизации и рекомбинации определяет отклонение от ионизационно-рекомбинационного равновесия и неравновесную природу процессов на фронте ионизации. В этой же главе сопоставлены три модели переноса излучения,



включая метод характеристик, приближение лучистой теплопроводности и диффузионное приближение. Одним из основных результатов данной главы является сформулированное эмпирическое условие стационарности течений ионизирующегося газа с учетом кинетики ионизации и рекомбинации.

Следующее звено в иерархической структуре по изучению процесса ионизации представлено в главе 3, где МГД модель рассмотрена совместно с системой уравнений поуровневой кинетики и уравнением переноса излучения. Решение указанных систем уравнений позволило выявить новые особенности неравновесного процесса ионизации, связанные с распределением населенностей атомных уровней и влиянием излучения на процесс ионизации. Таким образом, последовательный переход к более сложным моделям в исследовании течений ионизирующегося газа дал возможность рассмотреть процессы, недоступные для изучения с помощью более простых моделей.

Наконец, в главе 4 рассмотрена еще одна модель процесса ионизации в многокомпонентной плазме гелия и азота с возможным образованием многозарядных ионов с различной кратностью ионизации. В данной главе представлены исследования двумерных осесимметричных течений ионизирующихся газов в канале КСПУ. При этом МГД уравнения с учетом электропроводности, теплопроводности и потерь энергии на излучение дополнены системой уравнений ионизационного равновесия в приближении локального термодинамического равновесия. В результате данных исследований показано, что в процессе ионизации в канале плазменного ускорителя могут образовываться ионы с различной кратностью ионизации. Кроме того, сформулировано эмпирическое условие стационарности течений ионизирующегося гелия и проведено сопоставление с аналогичным условием для водородной плазмы.

**Оценка содержания диссертации.** Диссертационная работа Коновалова Вениамина Сергеевича выполнена на высоком научном уровне и содержит решение сложных и актуальных задач плазмодинамики и механики плазмы, связанных с разработкой ЭРД на основе КСПУ.

**Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.**

В ходе выступления В.С. Коновалова в МАИ и ознакомления с текстом диссертации возникли следующие **вопросы и замечания, отражающие возможные недостатки работы:**

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 верно эту модель называть квазидвумерной.

4. Наличие металлических электродов может привести к тому, 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.

Указанные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертационной работы В.С. Коновалова.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.** Диссертация Коновалова Вениамина Сергеевича 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», а ее автор, В.С. Коновалов, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв рассмотрен и одобрен на расширенном научном семинаре Кафедры 208 МАИ «Электроракетные двигатели, энергетические и энергофизические установки» под руководством доктора технических наук Надирадзе Андрея Борисовича и Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики МАИ (НИИ ПМЭ МАИ) под руководством академика РАН Попова Гарри Алексеевича 16 ноября 2023 года (протокол № 1).

Отзыв подготовили:

Заведующий Кафедрой 208 Московского  
авиационного института (национального  
исследовательского университета),  
доктор технических наук



29.11.2023

Надирадзе  
Андрей  
Борисович

Ведущий научный сотрудник Научно-  
исследовательского института прикладной  
механики и электродинамики Московского  
авиационного института (национального  
технического университета),  
кандидат технических наук



29.11.2023

Дьяконов  
Григорий  
Александрович

### **Данные об организации**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)»

Почтовый адрес: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Электронная почта: [mai@mai.ru](mailto:mai@mai.ru)

Адрес в сети Интернет: [www.mai.ru](http://www.mai.ru)