

ОТЗЫВ

официального оппонента Кудряшова Николая Алексеевича 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 В.С. Коновалова посвящена решению важной проблемы, связанной с разработкой математических моделей и моделированием процессов в квазистационарных плазменных ускорителях, (КСПУ). Работа без сомнения является актуальной, поскольку напрямую связана с созданием новых электрореактивных плазменных двигателей (ЭРПД) на основе КСПУ для космических приложений, с решением ряда задач в области управляемого термоядерного синтеза и с развитием плазменных технологий. В последние годы разработки ЭРПД нового поколения ведутся наиболее интенсивно при наличии компактных атомных реакторов, производство которых было анонсировано Президентом РФ несколько лет назад. В диссертации исследованы как известные математические модели, так и новые, позволяющие проанализировать фундаментальные вопросы механики плазмы и взаимодействия излучения с веществом. Выбор и построение физически согласованных эволюционных моделей фазового перехода от газообразного состояния материи к плазме является актуальной задачей механики многофазных сред. Численные модели, разработанные при выполнении диссертационной работы, являются существенной модернизацией прежних математических моделей в рассматриваемой области плазмодинамики. Разработанные в диссертации В.С. Коновалова модели позволили определить новые подходы для исследования физических процессов, происходящих в плазменных ускорителях, а полученные результаты демонстрируют более адекватное описание процессов и явлений, происходящих в потоках ионизирующихся газов.

Научная и практическая ценность работы определяется не только разработкой новых физико-математических моделей течений ионизирующегося газа и переноса излучения, различающихся разным уровнем детализации физических процессов в КСПУ, но также тем, что представленные модели могут быть использованы для изучения широкого класса задач плазмодинамики. Модели, разработанные в ходе выполнения работы, дают возможность проводить численное моделирование в широком диапазоне

изменения параметров среды и установки КСПУ. Это демонстрируют результаты численного моделирования, изложенные в диссертации. Практическая значимость полученных результатов определяется также учетом различных диссипативных процессов и других факторов при моделировании процесса ионизации и переноса излучения. Следует отметить, что на основе многочисленных численных экспериментов, проведенных В.С. Коноваловым, было получено эмпирическое условие стационарности течения ионизирующегося газа. Это имеет важное прикладное значение при проектировании и разработке ЭРПД для космических аппаратов.

Новизна диссертационной работы заключается в разработке новых численных моделей радиационной магнитной газодинамики (РМГД) для изучения течений ионизирующегося газа и переноса излучения в каналах КСПУ и ЭРПД. Новые модели, адекватные современным представлениям о природе физических процессов, позволили рассмотреть особенности течений ионизирующегося газа, которые ранее в силу их сложности не были доступны для изучения с помощью прежних упрощенных математических моделей. При выполнении работы получен ряд новых результатов в области плазмодинамики. В результате численных исследований впервые представлена детальная картина поля излучения в канале КСПУ и сформулировано условие стационарности процесса ионизации. Новый результат связан с согласованным решением системы уравнений магнитной газодинамики, спектрального уравнения переноса излучения и системы уравнений поуровневой кинетики. Это позволило рассчитать неравновесные населенности возбужденных состояний атомов водорода и выявить эффект предионизации поступающего в канал газа. Кроме того, в приближении ЛТР получены распределения ионов разной кратности ионизации в процессе ионизации гелия и азота, также используемых в плазменных ускорителях. Тем самым, доказана возможность образования многозарядных ионов и плазмы сложного состава при использовании других газов помимо водорода.

Диссертация представлена на 157 страницах, включая 48 рисунков, и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во введении описывается принцип действия плазменного ускорителя, обосновывается актуальность темы и указаны цели исследований, отмечается научная новизна и практическая ценность результатов работы, формулируются основные положения, которые выносятся на защиту, а также представлены основные публикации В.С. Коновалова по теме диссертации.

В первой главе исследуется перенос излучения в канале КСПУ для заданном распределении плотности и температуры. Расчет

термодинамических параметров плазмы в канале ускорителя проводится на основе двумерной модели радиационной магнитной газодинамики (РМГД) для осесимметричных течений плазмы в предположении локального термодинамического равновесия (ЛТР). Поле излучения рассчитывается с помощью метода длинных характеристик в трехмерной постановке задачи. При этом для каждого узла двумерной координатной сетки строится угловая сетка с равномерным распределением лучей в полном телесном угле. Вдоль каждого луча решается стационарное уравнение переноса излучения в многогрупповом приближении для различных участков спектра и рассчитанных значений коэффициента поглощения и излучательной способности, определяемых в рамках известных механизмов излучения и поглощения. В данной главе представлены спектральные характеристики, плотность энергии излучения и плотность потока энергии излучения, которая присутствует в правой части уравнения переноса внутренней энергии среды.

Во второй главе основное внимание уделено изучению неравновесных процессов в окрестности фронта ионизации. Для этого модифицированная система МГД уравнений в квазиодномерном приближении дополнена уравнением, описывающим кинетику ионизации и рекомбинации водородной плазмы. При этом коэффициенты ионизации и рекомбинации определяются в рамках модифицированного диффузионного приближения для реальной структуры энергетических уровней атома, а перенос излучения моделируется в приближении лучистой теплопроводности. Расчеты демонстрируют неравновесную природу процессов на фронте ионизации, где наблюдается существенное отклонение от равновесия. В этой же главе представлены результаты сравнительного анализа трех моделей переноса излучения, включая метод характеристик и диффузионное приближение. В результате серии расчетов пульсирующих и квазистационарных течений ионизирующегося газа сформулировано эмпирическое условие стационарности процесса ионизации в рамках РМГД модели с учетом кинетики ионизации и рекомбинации.

В третьей главе рассматривается полноценная и наиболее сложная модель течений ионизирующегося газа в канале КСПУ. Неравновесный процесс ионизации в квазиодномерной модели исследуется с помощью системы МГД уравнений, дополненной системой уравнений поуровневой кинетики, с учетом диссипативных факторов и переноса излучения. Для расчета переноса излучения используется метод длинных характеристик, адаптированный автором диссертации для квазиодномерной модели течений. Рассмотрены особенности неравновесного процесса ионизации и распределения заселенностей атомных уровней, рассчитанных с учетом переноса излучения

и поуровневой кинетики. Один из важных результатов, представленных в этой главе, связан с выявленным эффектом предионизации поступающего газа за счет излучения, идущего от фронта ионизации.

Четвертая глава посвящена исследованию процесса ионизации в плазме сложного состава при наличии многозарядных ионов гелия и азота. Течения ионизирующегося гелия и азота рассмотрены в двумерной постановке задачи на основе МГД уравнений, дополненных системой уравнений ионизационного равновесия в ЛТР приближении, с учетом диссипативных факторов и потерь энергии на излучение. Показано, что в канале плазменного ускорителя практически отсутствуют ионы гелия с двукратной степенью ионизации. Сформулировано условие стационарности процесса ионизации гелия. Установлено, что в потоках ионизирующегося азота может присутствовать значительное количество ионов с различной кратностью ионизации.

В заключении приводятся основные результаты исследований.

Полученные результаты соответствуют высокому научному уровню проведенного исследования В. С. Коновалова. Результаты доложены на международных и всероссийских конференциях, опубликованы в ряде журналов, в том числе в статье опубликованной в журнале первого квартала.

Достоверность результатов обеспечивается использованием хорошо зарекомендовавших себя численных алгоритмов, проверкой расчетов на более подробных сетках и сравнением результатов, полученных с помощью разных РМГД моделей.

По диссертационной работе имеются следующие мелкие замечания:

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.

Работа В.С. Коновалова является самостоятельным и завершенным научным исследованием в области механики газа и плазмы. Диссертация работа, выполненная на высоком научном уровне, имеет теоретическую и практическую значимость.

Автореферат диссертации дает правильное и всестороннее представление о проделанной работе, содержит в кратком виде необходимую информацию, характеризующую полученные результаты, основные положения и выводы. Опубликованные работы отражают основное содержание диссертации.

На основании изложенного выше нет сомнения, что диссертационная работа В.С. Коновалова соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы. Автор работы Коновалов Вениамин Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук за разработку методов исследования и математического моделирования процессов ионизации и излучения в канале плазменного ускорителя.

Официальный оппонент

Кудряшов Николай Алексеевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ,
Лауреат Государственной премии СССР,
заведующий кафедрой прикладной математики
Института лазерных и плазменных технологий
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ»,
115409, Россия, г. Москва, Каширское ш., д. 31
Тел.: +7 495 788-56-99,
e-mail: nakudryashov@mephi.ru

Н.А. Кудряшов

30.11.2023

Подпись профессора Кудряшова Николая Алексеевича заверяю:



Подпись удостоверяю
Заместитель начальника отдела
документационного обеспечения
НИЯУ МИФИ

В.М. Самородова