

На правах рукописи

Коновалов Вениамин Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИОНИЗАЦИИ И ПЕРЕНОСА  
ИЗЛУЧЕНИЯ В КАНАЛЕ ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ**

специальность 1.1.9 - Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Научный руководитель: **Козлов Андрей Николаевич**,  
доктор физико-математических наук, главный  
научный сотрудник ФГУ ФИЦ 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)»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»

Защита диссертации состоится «21» декабря 2023 г. в «14» час. «00» мин. на заседании диссертационного совета 24.1.237.01, созданного на базе ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, расположенного по адресу: 125047, г. Москва, Миусская пл., д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН и на сайте [www.keldysh.ru](http://www.keldysh.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.237.01  
кандидат физико-математических наук

Корнилина М.А.

## Общая характеристика работы

**Объект исследования и актуальность темы.** Процесс ионизации, отвечающий фазовому переходу от газообразного состояния среды к плазме, определяет одно из актуальных направлений исследований в области современной фундаментальной и прикладной механики. Данный процесс, сопровождаемый излучением, наблюдается в природе и различных установках для генерации плазмы. Одной из таких перспективных установок является квазистационарный плазменный ускоритель (КСПУ) <sup>1</sup>. В данной диссертации представлены различные модели и результаты численных исследований течений ионизирующегося газа и переноса излучения в канале КСПУ. Процесс ионизации рассмотрен с помощью трех моделей: в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР), с учетом кинетики ионизации и рекомбинации в рамках модифицированного диффузионного приближения (МДП), а также на основе системы уравнений поуровневой кинетики. Тем самым в диссертации представлены основные подходы в иерархии моделей процесса ионизации. Исследование переноса излучения также проведено с помощью различных моделей, включая наиболее полноценную 3D модель для расчета интегральных характеристик излучения, к которым относятся плотность энергии излучения и плотность потока энергии излучения.

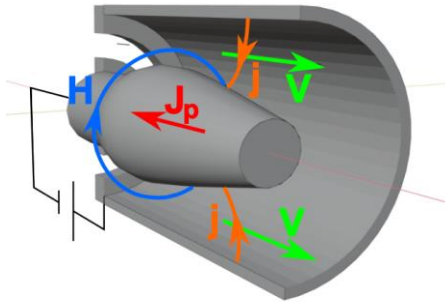


Рис. 1. Схема коаксиального плазменного ускорителя

На рис. 1 схематично представлен простейший плазменный ускоритель, состоящий из двух коаксиальных электродов, подсоединенных к электрической цепи. При наличии разности потенциалов между электродами происходит пробой нейтрального газа и образуется фронт ионизации, отвечающий фазовому переходу от газообразного состояния материи к плазме. За фронтом образовавшаяся плазма ускоряется вдоль оси канала за счет силы Ампера  $\mathbf{F}_A = \frac{1}{c} \mathbf{j} \times \mathbf{H}$ , где  $\mathbf{j}$  – ток в плазме, протекающий от одного электрода к другому и имеющий преимущественно радиальное направление. В простейших системах процессы происходят при наличии единственной азимутальной компоненты магнитного поля  $H = H_\varphi$ , которое генерируется электрическим током  $J_p$ , проходящим вдоль внутреннего электрода.

<sup>1</sup> Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. М.: Физматлит, 2-е изд., 2008.

Установки КСПУ являются многофункциональными системами и предназначены для генерации высокоскоростных потоков плазмы. Они используются в различных технологических приложениях и термоядерных исследованиях<sup>2-4</sup>. Плазменные ускорители представляют интерес в качестве перспективных электрореактивных плазменных двигателей для космических приложений, а также могут быть использованы как источники излучения и функциональные элементы в ряде прикладных областей.

Изучение течений ионизирующегося газа проводится с помощью моделей различного уровня сложности. Для трехкомпонентной среды, состоящей из атомов, электронов и ионов, была разработана и до сих пор используется физически содержательная модель, основанная на предположении о локальном термодинамическом равновесии и соотношении Саха. Достаточно узкий фронт ионизации в соответствии с экспериментальными данными удалось получить с помощью численной модели, в которой система модифицированных МГД уравнений для описания динамики трехкомпонентной среды дополнена уравнением кинетики ионизации и рекомбинации. Соответствующие коэффициенты ионизации и рекомбинации определяются в рамках модифицированного диффузионного приближения с учетом энергетических уровней водородоподобного атома. Наиболее полноценная модель течений ионизирующегося газа, также представленная в диссертации, включает систему уравнений поуровневой кинетики и перенос излучения, что отвечает наиболее сложному звену в иерархии моделей процесса ионизации. Теоретические и численные исследования процесса ионизации, переноса излучения и динамики плазмы связаны со многими актуальными научными направлениями (см., например,<sup>1,5-11</sup>).

<sup>2</sup> Klimov N., Podkovyrov V., Zhitlukhin A., Kovalenko D., et al. Experimental study of PFCs erosion under ITER-like transient loads at plasma gun facility QSPA. // Journal of Nuclear Materials. 2009. V. 390-391. P. 721-726.

<sup>3</sup> Astashynski V.M., Ananin S.I., et al. Materials surface modification using quasi-stationary plasma accelerators. // J. Surface and Coating Technology. 2004. V. 180-181. P. 392-395.

<sup>4</sup> Garkusha I.E., Chebotarev V.V., Herashchenko S.S., Makhraj V.A., et al. Novel test-bed facility for PSI issues in fusion reactor conditions on the base of next generation QSPA plasma accelerator. // Nuclear Fusion. 2017. V. 57. No. 11. 116011.

<sup>5</sup> Брагинский С.И. Явления переноса в плазме. // Вопросы теории плазмы. Под ред. М. А. Леонтовича. М.: Атомиздат, 1963, вып. 1. С. 183-272.

<sup>6</sup> Михалас Д. Звездные атмосферы (1 часть). М.: Мир, 1982.

<sup>7</sup> Четверушкин Б.Н. Математическое моделирование задач динамики излучающего газа. М.: Наука, 1985.

<sup>8</sup> Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982.

<sup>9</sup> Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.

<sup>10</sup> Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Уваров В.Б. Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы. М.: Физматлит, 2000.

<sup>11</sup> Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. М.: Мир, 1990.

**Предметом исследований** в диссертационной работе являются перенос излучения, процесс ионизации и особенности течений ионизирующегося газа в каналах плазменных ускорителей. Одна из таких особенностей связана с неравновесной природой процесса ионизации, что может быть обусловлено несколькими факторами, например, наличием больших градиентов термодинамических параметров на фронте ионизации и взаимодействием вещества с излучением. Эта и другие особенности течений ионизирующегося газа являются предметом изучения в диссертационной работе.

Система МГД уравнений формирует базовую модель течений ионизирующегося газа и плазмы. В этой модели степень ионизации среды может быть найдена, например, в приближении ЛТР по известным значениям плотности и температуры. Однако, как показывает практика, предположение о наличии ЛТР не позволяет получить достаточно узкий фронт ионизации, наблюдаемый в экспериментах. Узкий фронт наблюдается в рамках моделей, учитывающих кинетику ионизации и рекомбинации в неравновесных процессах. В этих моделях рассматривается многоступенчатый процесс трансформации атомов под воздействием окружающих частиц и поля излучения, учитывается структура электронных оболочек атома и последовательные переходы атома из основного состояния в более высокие возбужденные состояния с последующим образованием ионов. Скорость трансформации частиц определяется столкновениями с другими частицами и излучением. Спектральное поле излучения, в свою очередь, также формируется частицами среды в различных состояниях. Таким образом, возникает необходимость согласованного расчета поля излучения и поуровневого состава или населенности уровней частиц среды.

Решение задачи о течении ионизирующегося газа предполагает использование данных о внутренней структуре атомов <sup>12</sup>, включая современные базы данных <sup>13</sup> в области атомной физики. Данная информация необходима при моделировании спектрального поля излучения и поуровневого состава. В открытом доступе имеются также компьютерные коды для расчета характеристик среды (см., например, <sup>14,15</sup>).

Современный уровень диагностики плазмы позволяет провести спектральный анализ излучения, выходящего из канала плазменного ускорителя, и одновременно определить локальные значения плотности, температуры и скорости среды. Совместное использование и сопоставление результатов численного моделирования и экспериментальных данных открывает новые возможности для проведения комплексных исследований.

---

<sup>12</sup> Вайнштейн Л.А., Собельман И.И., Юков Е.А. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. М.: Наука. 1979.

<sup>13</sup> Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J. and NIST ASD Team. NIST Atomic Spectra Database. // National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 2016.

<sup>14</sup> Gu M.F. The flexible atomic code. // Canadian Journal of Physics. 2008. V. 86. P. 675-689.

<sup>15</sup> Thermos: комплекс программ... URL: <https://keldysh.ru/cgi/thermos/navigation.pl?ru,home>

Исследования КСПУ (см., например, рис. 2) ведутся в Троицком институте инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ), в Институте тепло и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, в Институте Физики Плазмы ННЦ ХФТИ, а также в других научных центрах.



Рис. 2. Фотографии одной из экспериментальных установок и потока плазмы из КСПУ

В современных экспериментах наиболее часто в качестве рабочей среды используют такие газы как водород, гелий и аргон. Возможная в будущем модификация КСПУ в качестве мощных электрореактивных плазменных двигателей для использования в атмосферных условиях означает, что рабочей средой может быть воздух, который примерно на 78% состоит из азота. Моделирование процесса ионизации и расчет поля излучения в канале КСПУ представлены в диссертации в основном для водорода, но также отражены результаты исследований для азота и гелия.

**Цель диссертационной работы** заключается в исследовании процесса ионизации и переноса излучения в потоках ионизирующегося газа и плазмы в коаксиальных каналах плазменных ускорителей с помощью новых численных моделей.

#### **Задачи диссертационной работы**

Перед соискателем были поставлены следующие задачи:

1. Определение поля излучения на основе 3D модели переноса излучения в двумерных осесимметричных потоках ионизирующегося водорода, рассчитанных в канале плазменного ускорителя в приближении 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 с учетом реальной энергетической структуры атома.
3. Исследование процесса ионизации и течения ионизирующегося газа в канале КСПУ на основе модифицированных МГД уравнений, дополненных системой уравнений поуровневой кинетики и уравнением переноса излучения.

4. Изучение течения ионизирующегося гелия и азота в канале плазменного ускорителя на основе МГД модели с учетом системы уравнений ионизационного равновесия при условии возможного образования многозарядных ионов с различной кратностью ионизации. Определение условия стационарности течений ионизирующегося гелия.

### **Научная новизна**

Впервые разработана полноценная модель радиационной магнитной газодинамики (РМГД) 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 в результате вычислительных экспериментов на основе квазиодномерной модели течения с учетом кинетики ионизации и рекомбинации в рамках модифицированного диффузионного приближения, использованного для изучения неравновесного процесса ионизации. Разработан новый упрощенный вариант модели переноса излучения в квазиодномерном приближении и создана новая модель неравновесного процесса ионизации с учетом поуровневой кинетики. Впервые проведены исследования на основе совместного решения системы МГД уравнений, системы уравнений поуровневой кинетики и решения задачи переноса излучения. Данная модель позволила выявить эффект предиионизации в потоке поступающего газа за счет излучения, идущего от фронта ионизации, а также позволила изучить влияние излучения на поуровневый и ионизационный состав среды в окрестности фронта.

Впервые рассчитаны спектры излучения в направлении лучей, выходящих из объема плазмы в КСПУ. Расчет спектров и их сопоставление с соответствующими экспериментальными данными, полученными на основе спектроскопии потоков, открывают новый этап в развитии комплексного подхода для изучения процессов и определения термодинамических параметров в потоках ионизирующегося газа и плазмы.

Впервые разработаны двумерные модели осесимметричных течений ионизирующегося гелия и азота в канале плазменного ускорителя на основе модифицированных МГД уравнений, дополненных системой уравнений ионизационного равновесия при наличии многозарядных ионов с различной кратностью ионизации. На основе численных экспериментов впервые рассмотрены особенности процесса ионизации гелия и азота в канале КСПУ и выявлена возможность образования многозарядных ионов в потоках ионизирующегося гелия и азота.

### **Теоретическая и практическая значимость**

В диссертации представлены разработанные РМГД модели различного уровня сложности для описания течений ионизирующегося газа в канале КСПУ. Иерархическая структура моделей включает различные способы описания

процесса ионизации и переноса излучения, а также определяется решением задач разной размерности. В МГД моделях использованы 1D и 2D постановки задач. Модели переноса излучения основаны на 1D и 3D постановках, используя метод коротких и длинных характеристик, а также приближение лучистой теплопроводности и диффузионное приближение. В результате вычислительных экспериментов получены новые результаты, которые привели к более глубокому пониманию физических процессов в КСПУ.

Установленные факты имеют практическое значение. К ним относится выявленная предиионизация поступающего нейтрального газа за счет излучения, идущего от фронта ионизации, а также эмпирическое условие стационарности течений ионизирующегося газа и стабилизация пульсирующих течений с помощью СВЧ нагрева. Вычислительный код, разработанный на основе 3D модели переноса излучения, позволяет получить расчетные спектры излучения в направлении любого луча, выходящего из канала КСПУ. Данное обстоятельство может быть использовано при экспериментальном изучении плазмодинамических процессов и разработке комплексного подхода, основанного на теоретико-вычислительных данных и физических экспериментах.

Исследования, представленные в диссертации, являются составной частью проектов, реализованных в рамках Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 12-02-90427, 15-01-03085) и Российского научного фонда (грант № 16-11-10278). Один из разработанных программных комплексов зарегистрирован в федеральной службе по интеллектуальной собственности Российской Федерации.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

Разработаны модели различного уровня сложности для исследования течений ионизирующегося газа и переноса излучения в канале КСПУ. Представлена иерархия моделей процесса ионизации.

1. Впервые 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 МГД модели 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 МГД модели с учетом переноса излучения и кинетики ионизации и рекомбинации на основе модифицированного диффузионного приближения.



3. Впервые разработана МГД 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 МГД 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.

**Обоснованность и достоверность результатов** обеспечивается использованием современных подходов к моделированию физических процессов и применением апробированных вычислительных методов. Успешная верификация моделей и решений проведена на основе сопоставления результатов расчетов, полученных на разных сетках и с помощью разных моделей. Проверки, включая средства внутреннего контроля, подтвердили применимость разработанных программных комплексов при изучении течений ионизирующегося газа и переноса излучения в каналах КСПУ на основе достоверных вычислительных экспериментов.

#### **Апробация работы**

Результаты работы докладывались на семинарах Института прикладной математики им. М.В. Келдыша, а также на конференциях, школах 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);
- Международная 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, Москва, 2018, 2019, 2021, 2022)

**Публикации.** По материалам диссертации опубликованы 8 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, включая статью в издании первого квартиля Q1, 10 препринтов, 12 статей в сборниках трудов конференций и тезисы докладов, а также свидетельство о государственной регистрации результатов интеллектуальной деятельности.

**Личный вклад.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают личный вклад автора в представленные исследования. Соискатель принимал непосредственное участие в разработке моделей и соответствующих программных комплексов, проводил расчеты и обрабатывал полученные результаты. 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.

**Объем диссертации** составляет 157 страниц, включая 48 рисунков и 3 таблицы. Список литературы содержит 153 наименования.

### **Содержание работы**

Во **введении** обосновывается актуальность работы, формулируются цели, задачи и положения, выносимые на защиту, обсуждается научная новизна и практическая значимость проведенных исследований.

В **первой главе** представлено исследование переноса излучения в потоках ионизирующегося газа в канале КСПУ. МГД модель для двумерных осесимметричных течений ионизирующегося газа основана на уравнениях переноса трехкомпонентной среды<sup>5,16,17</sup>, состоящей из атомов, ионов и электронов, а также на уравнении диффузии магнитного поля, которое является следствием уравнений Максвелла и закона Ома при условии пренебрежения инерцией электронов и током смещения. Процесс ионизации газа, отвечающий фазовому переходу с образованием фронта ионизации, исследован в приближении ЛТР для водорода, часто используемого в экспериментах. 3D модель переноса излучения в разработанной РМГД модели включает основные механизмы излучения и поглощения фотонов для различных участков спектра<sup>6-10</sup>.

<sup>16</sup> Брушлинский К.В., Морозов А.И. Расчет двумерных течений плазмы в каналах. // Вопросы теории плазмы./ Под ред. М.А. Леонтовича. М.: Атомиздат. 1974, Т. 8. С.88-163.

<sup>17</sup> Брушлинский К.В. Математические и вычислительные задачи магнитной газодинамики. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009.

Согласно экспериментальным данным, на фронте ионизации температура возрастает до уровня  $1 \div 3$  эВ. Концентрация газа, поступающего в канал, предполагается достаточно высокой  $n = 10^{16} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Для таких параметров можно считать, что среда является квазинейтральной  $n_i = n_e$ , а скорости компонент среды равны между собой  $\mathbf{V}_i = \mathbf{V}_e = \mathbf{V}_a = \mathbf{V}$ . Эксперименты и оценки показывают также, что можно ограничиться случаем однотемпературной смеси. С учетом указанных предположений имеем следующую систему модифицированных МГД уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V}) = 0, \quad \rho \frac{d \mathbf{V}}{d t} + \nabla P = \frac{1}{c} \mathbf{j} \times \mathbf{H}, \quad \frac{d}{d t} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{V}, \nabla), \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \text{div}(\rho \varepsilon \mathbf{V}) + P \text{div} \mathbf{V} = \frac{\mathbf{j}^2}{\sigma} - \text{div} \mathbf{q} - \text{div} \mathbf{W}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \text{rot}(\mathbf{V} \times \mathbf{H}) - c \text{rot} \frac{\mathbf{j}}{\sigma}, \quad \mathbf{j} = \frac{c}{4\pi} \text{rot} \mathbf{H}, \quad (3)$$

$$P = P_a + P_i + P_e = (1 + \alpha)(c_P - c_V) \rho T, \quad \varepsilon = (1 + \alpha) c_V T + \varepsilon_I,$$

$$k_B / m = R = c_P - c_V = c_V (\gamma - 1), \quad \alpha = n_e / (n_a + n_i), \quad \mathbf{q} = -\kappa_{e \rightarrow a} \nabla T.$$

Здесь  $m = m_a = m_i$  - масса атомов и ионов,  $\rho = m n$  - плотность тяжелых частиц, где  $n = n_a + n_i$ . Принятые обозначения являются стандартными и подробно описаны в тексте диссертации. В предположении ЛТР концентрации всех трех компонент среды и электронная температура связаны соотношением Саха:

$$\frac{n_i n_e}{n_a} = K_1(T) = \frac{2 \Sigma_i}{\Sigma_a} \left( \frac{m_e k_B T}{2 \pi \hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left( -\frac{I}{k_B T} \right),$$

где  $\Sigma_i$  и  $\Sigma_a$  - статистические суммы ионов и атомов,  $I$  - энергия ионизации,  $K_1$  - константа ионизационного равновесия. При условии ионизационного равновесия прямой процесс ионизации атома в результате электронного удара локально уравновешен обратным процессом тройной рекомбинации  $A + e \leftrightarrow A^+ + e + e$ . Учитывая, что  $n_e = n_i = \alpha n$  и  $n_a = n - n_i = (1 - \alpha) n$ , для степени ионизации получим  $\alpha = -K_1(T) / 2n + \sqrt{(K_1(T) / 2n)^2 + K_1(T) / n}$ .

В безразмерных переменных уравнения содержат такие безразмерные параметры как отношение характерного газового давления к магнитному  $\beta = 8 \pi P_o / H_o^2$  ( $P_o = k_B n_o T_o$ ) и магнитную вязкость  $\nu_m = c^2 / 4 \pi L V_o \sigma$ , которая обратно пропорциональна магнитному числу Рейнольдса  $\text{Re}_m$ :

$$\nu_m = \frac{1}{\text{Re}_m} = \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2}, \quad \sigma_1 = \frac{\alpha \sigma_{10}}{(1 - \alpha) \sqrt{T}}, \quad \sigma_2 = \sigma_{20} T^{3/2}.$$

Величины  $\sigma_{10}$  и  $\sigma_{20}$  выражаются через исходные параметры и константы.

Граничные условия завершают постановку МГД задачи. Полагаем, что на входе в канале ускорителя подается газ с известными значениями плотности и температуры. Электроды, образующие стенки канала, являются эквипотенциальными ( $E_\tau = 0$ ) и непроницаемыми ( $V_n = 0$ ).

Для расчета гиперболической части МГД уравнений используется разностная схема с коррекцией потоков<sup>11</sup>. Магнитная вязкость и теплопроводность учитываются с помощью метода потоковой прогонки<sup>18</sup>.

Плотности энергии излучения  $U$  и потока энергии излучения  $\mathbf{W}$  в уравнении (2) определяются через интенсивность излучения  $I_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{\Omega})$  с частотой  $\nu$  вдоль направления телесного угла  $\mathbf{\Omega}$  с помощью соотношений

$$U(\mathbf{r}) = \frac{1}{c} \int_0^\infty \int_0^{4\pi} I_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{\Omega}) d\Omega d\nu, \quad \mathbf{W}(\mathbf{r}) = \int_0^\infty \int_0^{4\pi} I_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{\Omega}) \mathbf{\Omega} d\Omega d\nu.$$

Интенсивность излучения является решением стационарного уравнения переноса излучения в многогрупповом приближении:

$$\mathbf{\Omega} \cdot \nabla I_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{\Omega}) = \eta_\nu(\mathbf{r}) - \kappa_\nu(\mathbf{r}) \cdot I_\nu(\mathbf{r}, \mathbf{\Omega}),$$

где излучательная способность  $\eta_\nu(\mathbf{r})$  и коэффициент поглощения вещества  $\kappa_\nu(\mathbf{r})$  являются известными функциями температуры и плотности<sup>6,12</sup>.

На рис. 3 представлен пример зависимости коэффициента поглощения и излучательной способности водородной плазмы для указанных значений концентрации и температуры. Здесь отмечены  $\alpha$ - и  $\beta$ -линии серии Лаймана. Было показано, что эти линии переносят значительную долю энергии. Поэтому профили этих линий описываются более детально, используя формулу Фойгта так, что на ширину линий приходится несколько спектральных групп, подробно описывающих форму их ядра и крыльев. В то же время линии в остальной части спектра рассматриваются в рамках одной группы. Весь спектр разбивается более чем на 300 спектральных групп.

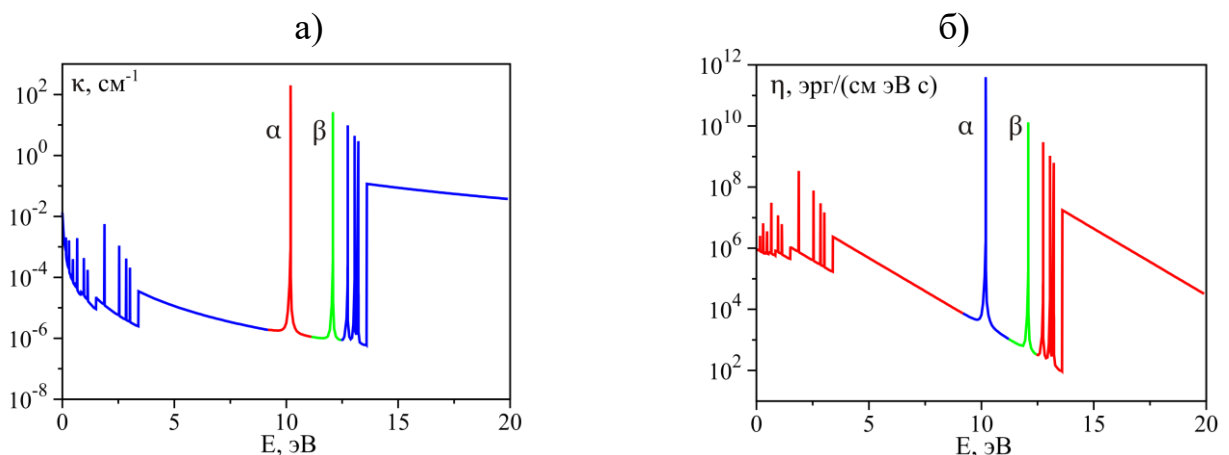


Рис. 3. Зависимость а) коэффициента поглощения и б) излучательной способности от энергии излучения для концентрации  $n = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и температуры  $T = 1 \text{ эВ}$

<sup>18</sup> Дегтярев Л.М., Фаворский А.П. Поточный вариант метода прогонки для разностных задач с сильно меняющимися коэффициентами. // ЖВМ и МФ. 1969. Т. 9, № 1. С. 211-218.

На рис. 4 представлен вариант расчета квазистационарного течения ионизирующегося газа для следующих характерных параметров:  $T_0 = 750 \text{ }^\circ\text{K}$ ,  $n_0 = 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , разрядный ток  $J_p = 50 \text{ кА}$ , длина канала  $L = 10 \text{ см}$ . Масштаб векторов на рис. 4б определяется величиной  $V_* = 1.03 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ .

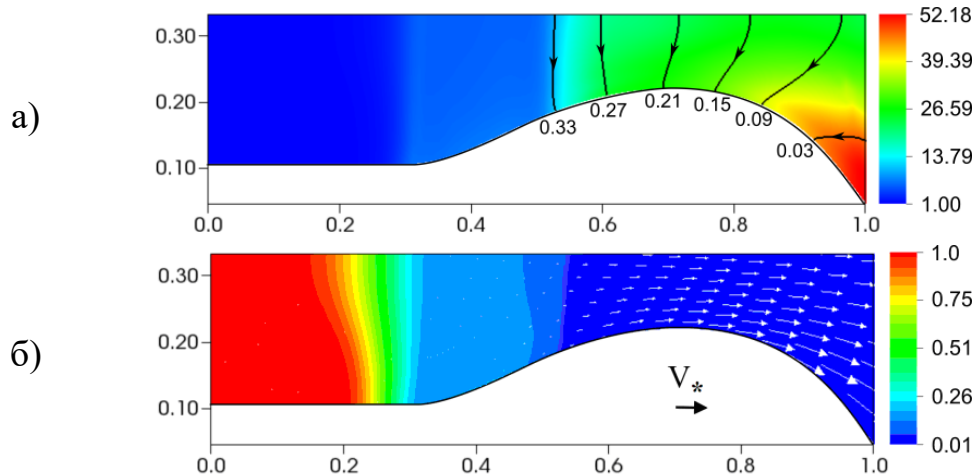


Рис. 4. Распределения а) температуры, тока в плазме и б) плотности, векторного поля скоростей  $\mathbf{V}$  в потоке ионизирующегося газа

В сужающейся части канала формируется фронт ионизации, в окрестности которого происходит резкое увеличение температуры и степени ионизации. За фронтом благодаря силе Ампера происходит ускорение плазмы. Ток в основном протекает в объеме ионизованной среды.

Задача о переносе излучения решается в трехмерной постановке для нахождения поля излучения в канале с осесимметричным течением. Сетка для 3D задачи о переносе излучения представлена на рис. 5 и получена поворотом исходной координатной сетки вокруг оси канала с заданным шагом.

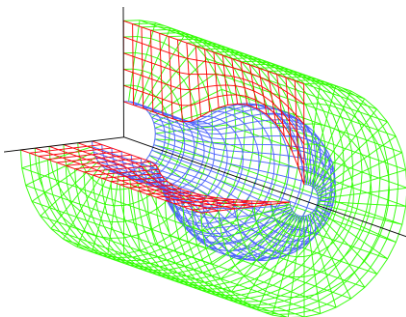


Рис. 5. Элементы сетки в 3D модели

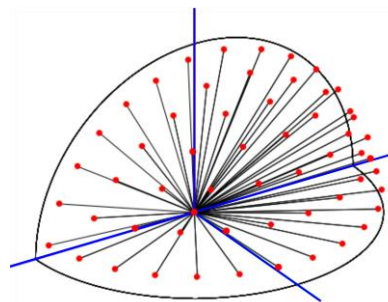


Рис. 6. Угловая сетка и направление лучей

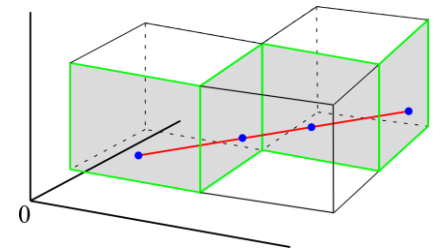


Рис. 7. Трассировка луча сквозь ячейки 3D сетки

Интенсивность излучения определяется по разным направлениям для дальнейшего вычисления интегральных значений плотности энергии и потока энергии излучения в любом узле или ячейки координатной сетки. С этой целью строится угловая сетка по азимутальному и полярному углу (см. рис. 6). Разбиение телесного угла на элементы угловой сетки производится методом, обеспечивающим равномерное распределение по направлениям.

В соответствии с методом длинных характеристик<sup>6,7</sup> осуществляется трассировка каждого луча для того, чтобы определить точки его пересечения с гранями ячеек трехмерной сетки и место падения луча на одну из границ трехмерной области. На рис. 7 схематично изображена трассировка одного из лучей на элементах 3D сетки.

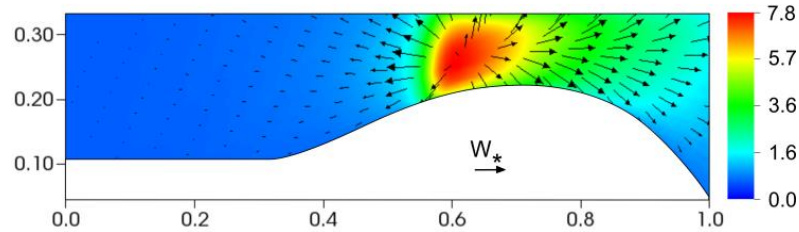


Рис. 8. Плотность энергии и векторное поле плотности потока энергии излучения в потоке ионизирующегося газа

На рис. 8 представлено поле излучения в квазистационарном потоке ионизирующегося газа, изображенном на рис. 4. Масштаб векторов  $\mathbf{W}$  определяется величиной  $W_* = 1.08 \cdot 10^8 \text{ эрг} / \text{см}^2 \text{ сек}$ . Видно, что в окрестности фронта ионизации расположена область с относительно высокими значениями плотности энергии излучения  $U$ . Поток энергии излучения  $\mathbf{W}$  направлен во все стороны от данной области, в том числе в направлении набегающего потока слабоионизованного газа, что, естественно, приводит к его предварительной ионизации перед фронтом.

Важным элементом комплексных исследований является сопоставление расчетных и экспериментальных данных, включая спектроскопию потоков. На рис. 9 в направлении радиального луча на выходе из канала представлены экспериментальные и расчетные спектры излучения в диапазоне частот и длин волн, отвечающих серии Бальмера для водородной плазмы.

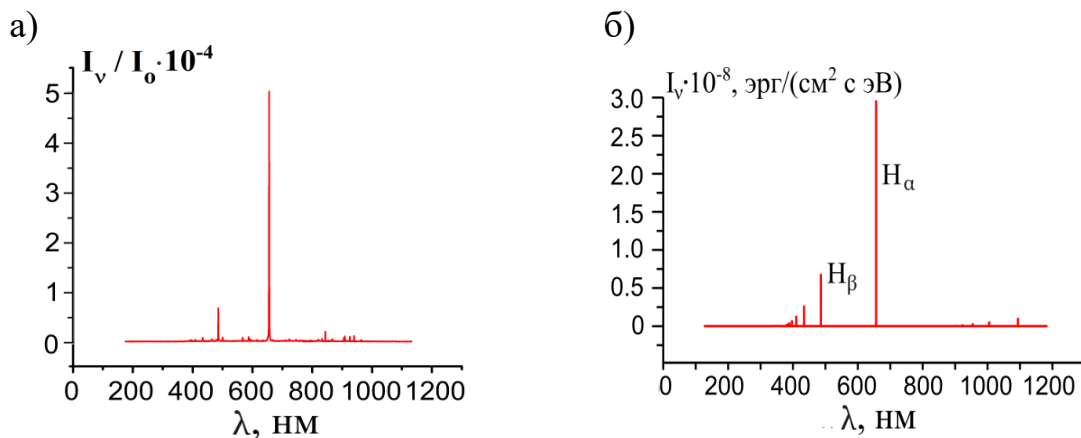


Рис. 9. Спектры излучения для серии Бальмера в направлении радиального луча на выходе из канала КСПУ, отвечающие а) экспериментам и б) расчетам

В первой главе представлены также диаграммы направленности излучения для разных точек канала и проведен анализ вкладов различных участков спектра в общее поле излучения, что может быть использовано для экономии расчетов при учете участков спектра, вносящих наибольший вклад.

Таким образом, разработана 3D модель переноса излучения и впервые в деталях определено поле излучения, включая спектральные и интегральные характеристики излучения в потоках ионизирующегося газа в канале КСПУ.

Во **второй главе** представлено исследование неравновесного процесса ионизации на основе МГД уравнений, дополненных уравнением кинетики ионизации и рекомбинации в рамках МДП<sup>8</sup>, используя квазиодномерное приближение<sup>16,17</sup>, поскольку изменение переменных в радиальном направлении несущественно.

В квазиодномерной модели введем обозначения:  $V = V_z$  и  $H = H_\varphi$ , а площадь поперечного сечения канала зададим следующим образом:  $f(z) = 0.3 - 0.8z(1-z)$ , если  $z \leq 1$ , и  $f(z) = 0.8z - 0.5$ , если  $1 \leq z \leq z_{out} = 3$ , т.е. канал представляет собой сопло, надстроенное линейно расширяющимся раструбом. В безразмерных переменных имеем следующую систему модифицированных МГД уравнений для трехкомпонентной среды:

$$\frac{\partial n_e f}{\partial t} + \frac{\partial n_e V f}{\partial z} = f \tilde{\Gamma}_e, \quad \tilde{\Gamma}_e = n_a n_e \tilde{\beta}_{ion} - n_e^2 n_i \tilde{\alpha}_{rec} + \tilde{\beta}_\omega n_a - n_e n_i \tilde{\alpha}_\omega,$$

$$\frac{\partial \rho f}{\partial t} + \frac{\partial \rho V f}{\partial z} = 0, \quad \rho = n_a + n_i,$$

$$\frac{\partial \rho V f}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V f) V}{\partial z} = -f \frac{\partial}{\partial z} \left( P + \frac{H^2}{2} \right), \quad P = \frac{\beta}{2} (1 + \alpha) \rho T,$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon f}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon f) V}{\partial z} = -P \frac{\partial V f}{\partial z} + f v \left( \frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial f q}{\partial z} - \frac{\partial f W}{\partial z},$$

$$\frac{\partial H f}{\partial t} + \frac{\partial H V f}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( v f \frac{\partial H}{\partial z} \right),$$

$$\varepsilon = \frac{\beta (1 + \alpha) T}{2(\gamma - 1)} + \frac{\beta}{2} \zeta \alpha T^*, \quad n_e = n_i, \quad \alpha = \frac{n_e}{\rho}, \quad n_a = (1 - \alpha) \rho, \quad q = -\tilde{\kappa} \frac{\partial T}{\partial z},$$

$$v = 1/\sigma_o = 1/\sigma_1 + 1/\sigma_2, \quad \sigma_1 = \alpha \sigma_{10} / (1 - \alpha) \sqrt{T}, \quad \sigma_2 = \sigma_{20} T^{3/2},$$

$$z = 0: \quad \rho = 1, \quad T = 1, \quad H = 1, \quad \alpha = \alpha_{in}.$$

В рамках МДП диффузия связанного электрона рассматривается в энергетическом пространстве атома с учетом дискретности его уровней, а коэффициент ступенчатой рекомбинации  $\alpha_{cm}$  определяется соотношением<sup>8</sup>

$$\alpha_{cm} = \frac{h^3 e^4}{2\pi (m_e k_B T_e)^2 \sum_i E_i} \left[ \sum_{k \geq 1} \frac{(2k+1) \exp(-E_{k+1}/k_B T_e)}{k^3 (k+1)^4 \Lambda_k} \right]^{-1}, \quad \text{где}$$

$E_k = E_1 / k^2$  и  $E_1 = I = 13.6 \text{ эВ} = 2.16 \cdot 10^{-11} \text{ эрг}$  для водорода. Коэффициенты ступенчатой рекомбинации и ионизации связаны через константу ионизационного равновесия  $\beta_{cm} = K_1 \alpha_{cm}$ .

Суммарные коэффициенты включают прямой процесс ионизации из основного состояния и обратный процесс рекомбинации:  $\beta_{ioniz} = \beta_{cm} + \beta_{np}$ ,  $\alpha_{recom} = \alpha_{cm} + \alpha_{np}$ , где  $\alpha_{np} = (W_{e,1} + A_{e1})/n_e$  и  $\beta_{np} = W_{1,e}/n_e$ , а коэффициент Эйнштейна  $A_{e1}$  определяет вероятность спонтанного излучения. В расчетах кинетики ионизации и рекомбинации используются методы, разработанные для решения жестких систем дифференциальных уравнений<sup>19,20</sup>.

В отличие от ЛТР решение уравнения ионизационного баланса в МДП позволяет учесть неравновесную природу процесса ионизации. На рис. 10 представлен пример расчета для следующих значений исходных размерных и безразмерных параметров:  $T_o = 4000^{\circ}K$ ,  $n_o = 2.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $L = 6 \text{ см}$ ,  $r_o = L/3$ ,  $J_p = 50 \text{ кА}$ ,  $T^* = 39.1$ ,  $\beta = 0.14$ ,  $\sigma_{10} = 700$ ,  $\sigma_{20} = 0.46$ ,  $\alpha_{in} = 1.5 \cdot 10^{-7}$ ,  $V_o = 2.18 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ . Ступенчатая ионизация и рекомбинация вносят основной вклад. При этом наблюдается узкий фронт ионизации в соответствии с экспериментами. Рис. 10е демонстрирует неравновесную природу процессов в окрестности фронта, где наблюдается четко выраженное отклонение от ионизационно-рекомбинационного равновесия. Это существенно меняет прежнее представление о наличии ЛТР.

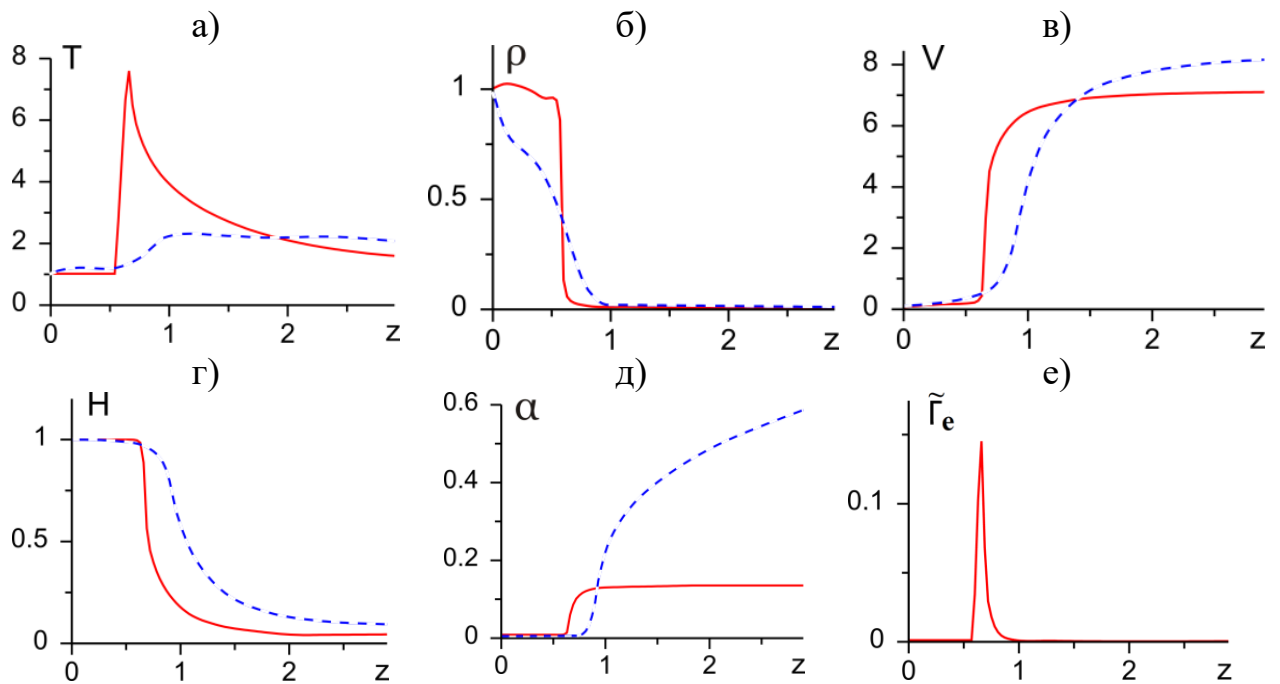


Рис. 10. Распределение термодинамических параметров в канале плазменного ускорителя: а) температура, б) концентрация, в) скорость, г) магнитное поле, д) степень ионизации и е) отклонение от равновесия. Сплошные линии отвечают расчету, выполненному в МДП, штриховые линии – в приближении ЛТР

<sup>19</sup> Hairer E., Wanner G. Solving ordinary differential equations. II. Stiff and differential-algebraic problems. Springer. 1996.

<sup>20</sup> Калиткин Н.Н., Пошивайло И.П. Решение задачи Коши для жестких систем с гарантированной точностью методом длины дуги. // Мат. Моделирование. 2014. Т.26, №7. С.3–18.



Рис. 11 показывает изменение плотности энергии  $cU$  и плотности потока энергии излучения  $W_z$  вдоль канала для варианта расчета, который отвечает МДП на рис. 10. Интегральные параметры излучения получены на основе метода характеристик и с помощью двух других известных приближений.

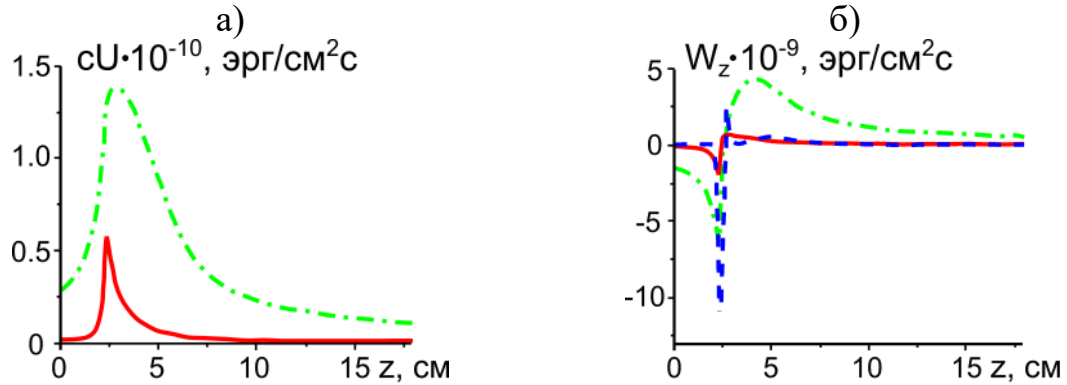


Рис. 11. Распределения плотности а) энергии и б) потока энергии излучения вдоль канала, полученные методом характеристик (сплошные кривые), в диффузионном приближении (штрихпунктирные кривые) и с помощью лучистой теплопроводности (штриховая кривая)

Видно, что метод характеристик и приближение лучистой теплопроводности дают качественно близкие результаты и соответствуют физической картине процессов. В то же время использование диффузионного приближения нецелесообразно при наличии больших градиентов на фронте.

В экспериментах<sup>1</sup> наблюдаются стационарные и пульсирующие режимы течения в зависимости от параметров. В модели с учетом кинетики ионизации и рекомбинации также реализуются два режима течения. В частности, при уменьшении разрядного тока происходит переход от стационарного течения к пульсирующим режимам. На рис. 12 для  $n_0 = 2.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $T_0 = 500^\circ \text{ K}$  представлены графики зависимости температуры и степени ионизации от времени на выходе из канала для пульсирующего режима при  $J_p = 55 \text{ kA}$  и квазистационарного течения ионизирующегося водорода при  $J_p = 85 \text{ kA}$ .

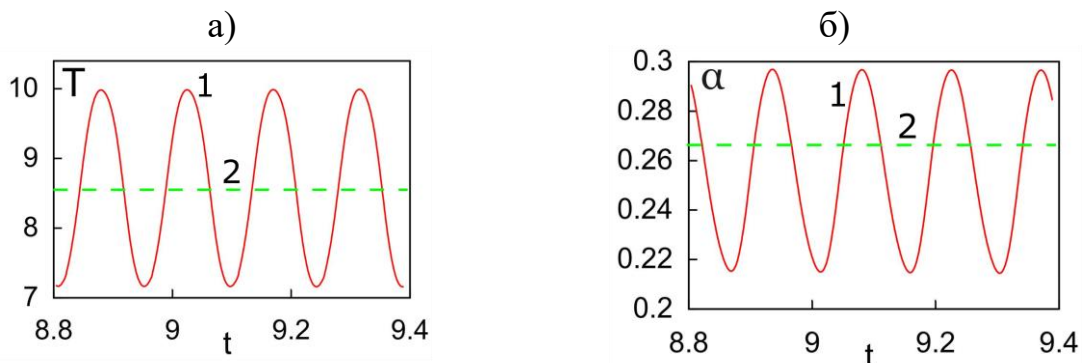


Рис. 12. Изменение а) температуры и б) степени ионизации с течением времени в пульсирующем (кривые 1) и стационарном (линии 2) потоке ионизирующегося водорода

Численные эксперименты показали, что границе перехода от пульсирующих режимов к стационарным течениям ионизирующегося водорода

отвечает линейная зависимость в плоскости переменных  $(\ln J_{\dot{m}}, \ln J_p)$ , где  $J_{\dot{m}} = e \dot{m} / m_i$  (kA) - расход, выраженный в токовых единицах. Условие стационарности течений формулируется с помощью неравенства  $J_p^2 / J_{\dot{m}} > K$ , где константа  $K$  зависит от геометрии канала ускорителя.

Таким образом, в результате серии расчетов в рамках квазиодномерной МГД модели с учетом кинетики ионизации и рекомбинации сформулировано эмпирическое условие стационарности течений ионизирующегося водорода. Показано также, что это условие является следствием законов подобия.

В третьей главе рассмотрена еще одна модель течений ионизирующегося газа, которая включает систему уравнений поуровневой кинетики и перенос излучения. Данная модель является наиболее полноценным и сложным звеном в иерархии моделей процесса ионизации. Сложность модели обусловлена многообразием составляющих ее частей и связей между ними. Как и ранее, система РМГД уравнений содержит диссипативные факторы, обусловленные электропроводностью и теплопроводностью, интегральную величину плотности потока энергии излучения, а также потери энергии на ионизацию. В данном случае модифицированные уравнения (1)-(3) дополнены системой уравнений поуровневой кинетики:

$$\frac{\partial n_k}{\partial t} + \text{div}(n_k \mathbf{V}) = \sum_{j \neq k} n_j w_{jk} - n_k \sum_{j \neq k} w_{kj}, \quad k = 1, \dots, K, \quad (4)$$

Здесь  $n_k$  - населенность  $k$ -го энергетического состояния,  $w_{jk}$  - вероятность перехода из  $j$ -го в  $k$ -е состояние,  $K$  - число конфигураций атома. При этом

суммарная концентрация атомов равна  $n_a = \sum_{k=1}^K n_k$ , суммарное давление -

$$P = P_e + P_i + \sum_{k=1}^K P_k = (1 + \alpha)(c_p - c_v) \rho T, \quad \text{где } \rho = m n \text{ и } n = n_i + n_a -$$

плотность и концентрация тяжелых частиц.

Коэффициент поглощения и излучательная способность в уравнении переноса излучения для различных диапазонов частот фотонов зависят как от параметров среды, ее плотности и температуры, так и от населенности уровней энергии. В свою очередь система уравнений поуровневой кинетики (4), определяющая населенности уровней, включает вероятности различных процессов  $w_{kj} = C_{kj} + R_{kj}$ , которые также зависят от параметров среды и характеристик излучения. Суммарные вероятности переходов определяются вероятностями процессов, которые обусловлены столкновениями  $C_{kj}$ , в первую очередь с электронами, и взаимодействием с излучением  $R_{kj}$ . Все указанные уравнения необходимо решать совместно в рамках единой эволюционной задачи. Исследование проведено для водородной плазмы. Течение ионизирующегося газа рассмотрено в квазиодномерном приближении.

На рис. 13 представлен вариант расчета квазистационарного течения ионизирующегося газа для следующих параметров:  $T_o = 750 \text{ } ^\circ\text{K}$ ,  $J_p = 40 \text{ кА}$ ,  $n_o = 1.6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $L = 60 \text{ см}$ . Здесь изображены: а) суммарная концентрация тяжелых частиц, б) температура, в) скорость, г) степень ионизации, д)  $n_a$ ,  $n_k$  и  $n_e$  - относительные концентрации атомов в основном состоянии, атомов в возбужденных состояниях и электронов, а также е) отклонение от равновесия.

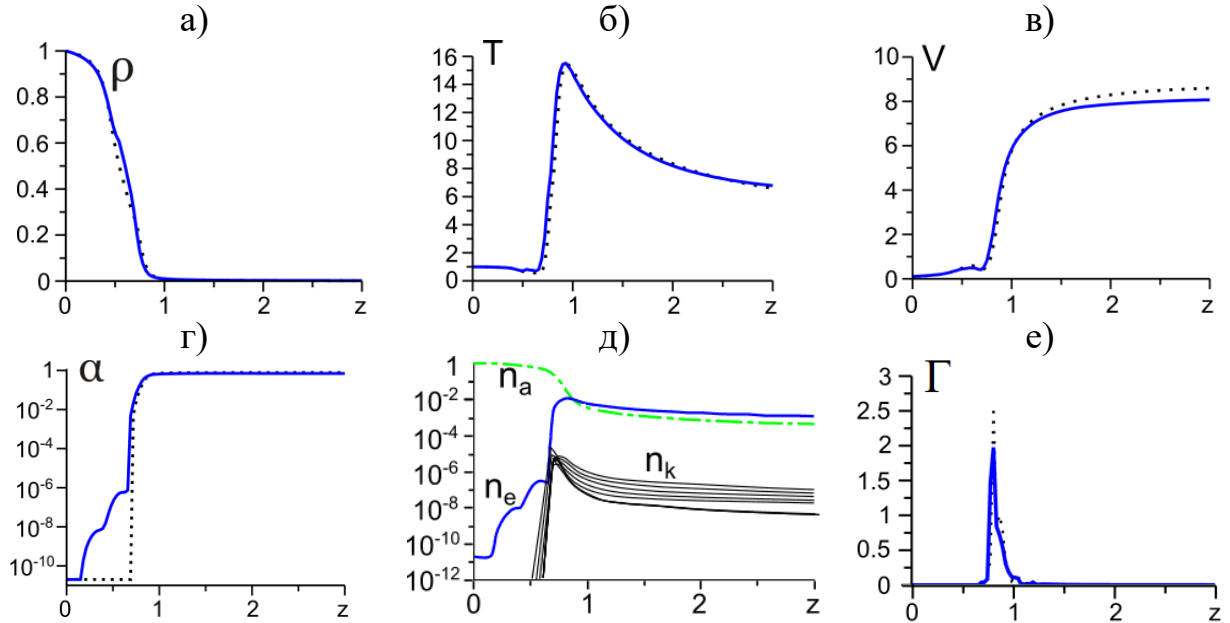


Рис. 13. Распределения МГД переменных вдоль канала ускорителя при учете поуровневой кинетики и переноса излучения в потоке ионизирующегося газа. Пунктирные кривые отвечают модифицированному диффузионному приближению

Численные эксперименты на основе РМГД модели с учетом поуровневой кинетики позволили получить детальную картину процессов в окрестности фронта ионизации, включая распределение населенностей атомных уровней в потоке ионизирующегося водорода. Представленная модель позволила изучить влияние поуровневой кинетики на перенос излучения и в то же время получить поле излучения, согласованное с населенностью атомных уровней. Расчеты течений с учетом поуровневой кинетики согласуются с результатами, полученными при учете кинетики ионизации и рекомбинации в рамках МДП.

Таким образом, разработана полноценная РМГД модель и реализован программный комплекс, который позволяет решить задачу о течении ионизирующегося газа в канале КСПУ с учетом уравнений поуровневой кинетики. В результате исследованы процессы, которые ранее не были доступны для глубокого изучения с помощью прежних моделей. Показано, что радиационные процессы оказывают существенное влияние на возбуждение атомных уровней и приводят к значительному росту концентрации электронов и степени ионизации перед фронтом ионизации. Тем самым, доказан эффект предионизации, когда излучение от фронта распространяется в область набегающего потока и частично ионизует поступающий нейтральный газ.

В четвертой главе представлены численная модель и результаты расчетов двумерных осесимметричных течений ионизирующегося гелия и азота в ЛТР приближении для плазмы сложного состава, включая ионы с разной кратностью ионизации. Наличие многозарядных ионов предполагает решение системы уравнений ионизационного равновесия. Течения ионизирующихся газов рассмотрены в рамках общего случая многокомпонентной среды. По-прежнему считаем, что скорости всех компонент равны между собой для однотемпературной смеси. Следствием исходных уравнений переноса является система (1)-(3), дополненная новыми уравнениями связи:

$$P = P_a + \sum_{i=1}^Z P_i + P_e = \left(1 + \frac{n_e}{n}\right) (c_P - c_V) \rho T, \quad \rho = m \left( n_a + \sum_{i=1}^Z n_i \right),$$

$$n_e = \sum_{i=1}^Z Z_i n_i, \quad \varepsilon = \left(1 + \frac{n_e}{n}\right) c_V T + \varepsilon_I, \quad \alpha = \sum_{i=1}^Z n_i / \left( n_a + \sum_{i=1}^Z n_i \right),$$

где  $Z$  – зарядовое число химического элемента,  $\rho$  – плотность тяжелых частиц,  $P$  – суммарное давление,  $\alpha$  – степень ионизации. РМГД модель включает, в частности, плотность потока энергии излучения  $\mathbf{W}$  в правой части уравнения для внутренней энергии (2). Перенос излучения гелиевой плазмы рассчитан в рамках 3D модели, представленной в главе 1. В расчетах течений азота использована более простая модель, в которой учитываются потери энергии на излучение  $Q_{изл} = Q_{рек} + Q_{торм} + Q_{лин}$ , включая тормозное и рекомбинационное излучение<sup>9</sup>. Излучение в спектральных линиях<sup>21</sup>

$$Q_{лин} = 80 \cdot 10^{-24} n_e \sum_{i=1}^Z Z_i^6 n_i / T_e^{3/2} (\text{эВ})$$

вносит наиболее существенный вклад в общие потери энергии на излучение при наличии многозарядных ионов в зарядовом состоянии  $Z_i$ . Для суммарного тепла, выделяемого в результате трения электронов о тяжелые частицы, имеем

$$Q_{mp} = n_e m_e (\mathbf{V} - \mathbf{V}_e)^2 \left( \frac{1}{\tau_{ea}} + \sum_{i=1}^Z \frac{1}{\tau_{ei}} \right) = \frac{m_e \mathbf{j}^2}{n_e e^2} \left( \frac{1}{\tau_{ea}} + \sum_{i=1}^Z \frac{1}{\tau_{ei}} \right).$$

Это тепло можно представить в обычном виде  $Q_{mp} = \mathbf{j}^2 / \sigma$ , где  $\sigma$  определяется через сумму частот столкновений электрона с тяжелыми частицами

$$\sigma = \frac{n_e e^2}{m_e} \left( \nu_{ea} + \sum_{i=1}^Z \nu_{ei} \right)^{-1}, \quad \nu_{ei} = \frac{1}{\tau_{ei}} = \frac{Z_i^2 n_i}{\tau_o n}, \quad \tau_o = \frac{3 \sqrt{m_e} (k_B T)^{3/2}}{4 \sqrt{2} \pi \Lambda e^4 n}.$$

Частоты столкновений определены стандартным образом  $\nu_{ea} = n_a \langle V_e \rangle S_{ea}$  и  $\nu_{ei} = n_i \langle V_e \rangle S_{ei}$ , где  $S_{ea}$ ,  $S_{ei}$  – эффективные сечения столкновений.

<sup>21</sup> Васильев А.П., Долгов-Савельев Г.Г., Коган В.И. Излучение примесей в разреженной горячей водородной плазме. // Nuclear Fusion Supplement. 1962. V. 2. P. 655-661.

На рис. 14 представлено сечение столкновений электронов с атомами гелия<sup>22</sup>.

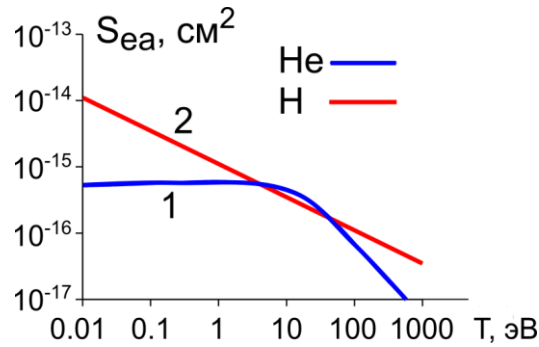


Рис. 14. Сечения столкновений электронов с атомами гелия (кривая 1) и водорода (кривая 2)

При условии локального равновесия рассмотрим уравнения Саха в виде:

$$\frac{n_e \cdot n_{j+1}}{n_j} = U_j(T) = \frac{\Sigma_e \cdot \Sigma_{j+1}}{\Sigma_j} \cdot \exp\left(-\frac{E_{j+1} - E_j}{k_B T}\right), \quad j = 0, \dots, Z-1$$

Здесь  $n_j$  – концентрация ионов  $j$ -ой кратности ионизации; значение  $j=0$  соответствует нейтральному атому. Статистические суммы  $\Sigma_j$  рассчитаны по известному коду<sup>14</sup>. Используя относительные концентрации  $y_j = n_j/n$ ,  $y_0 = n_a/n$ ,  $x_e = n_e/n$  и величину  $u_j = U_j/n$ , перепишем уравнения Саха:  $y_{j+1} = y_j \cdot x_e^{-1} \cdot u_j$ . Учитывая это рекуррентное соотношение, выражение для суммарной концентрации тяжелых частиц и условие квазинейтральности, приходим к системе уравнений ионизационного равновесия:

$$y_j = y_0 \cdot x_e^{-j} \cdot P_j, \quad j = 0, \dots, Z, \quad P_j = \prod_{i=0}^{j-1} u_i, \quad \sum_{j=0}^Z y_j = 1, \quad \sum_{j=0}^Z j \cdot y_j = x_e.$$

Дальнейшие преобразования приводят к уравнению для неизвестной величины  $x_e$ :  $\sum_{j=0}^Z x_e^{-j} \cdot P_j = \sum_{j=0}^Z j \cdot x_e^{-j-1} \cdot P_j$ . Корни данного уравнения вычисляются на основе стандартных итерационных методов.

На рис. 15 представлен пример квазистационарного течения ионизирующегося гелия в установке КСПУ-Т (ТРИНИТИ) для следующих параметров разряда:  $n_0 = 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_0 = 1000 \text{ }^\circ\text{K}$ ,  $J_p = 100 \text{ kA}$  и  $L = 10 \text{ см}$ .

На рис. 16 изображены одномерные распределения переменных вдоль средней координатной линии для рассматриваемого течения. Наблюдается незначительная концентрация ионов гелия двукратной ионизации (см. рис. 16б), поскольку соответствующая энергия ионизации существенно превышает энергию, необходимую для образования ионов гелия однократной ионизации.

<sup>22</sup> Adibzadeh M., Theodosiou C.E. Elastic electron scattering from inert-gas atoms. // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 2006. V. 91. P. 8–76.

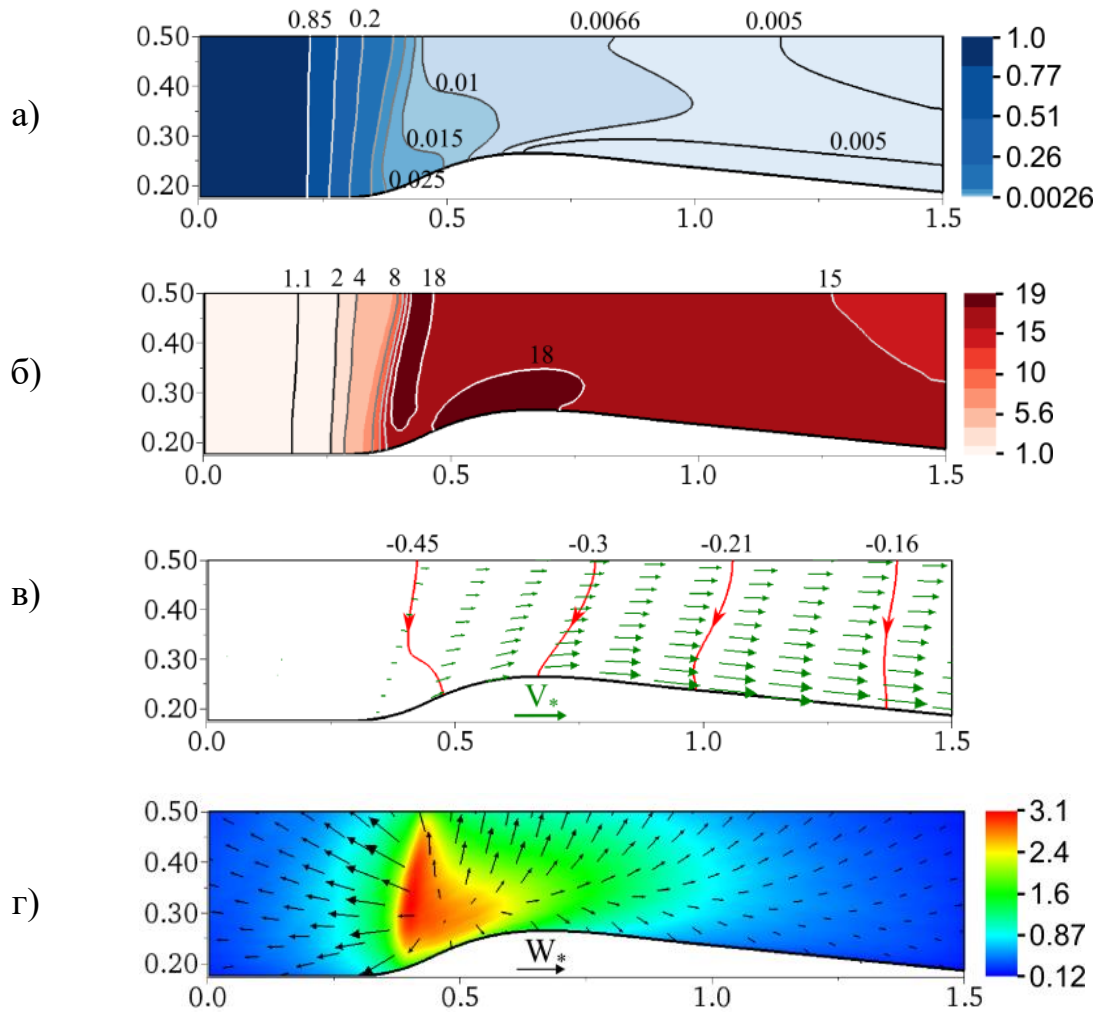


Рис. 15. Распределения а) плотности, б) температуры, в) скорости и тока в плазме, г) плотности энергии излучения и векторного поля плотности потока энергии излучения в течении ионизирующегося гелия

Основные изменения для данного течения наблюдаются при  $z \approx 0.45$ , где расположен фронт ионизации. В процессе ускорения скорость потока последовательно переходит через скорость звука  $V_g$  в окрестности фронта и далее через скорость сигнала  $V_s^1$  в наиболее узкой части канала (см. рис. 16г).

Аналогично течениям ионизирующегося водорода в расчетах наблюдаются стационарные и пульсирующие течения ионизирующегося гелия в зависимости от параметров разряда. В серии численных экспериментов определена граница раздела между стационарными и пульсирующими течениями в плоскости  $(\ln J_{\dot{m}}, \ln J_p)$ . Этой границе соответствует линейная зависимость, представленная на рис. 17 сплошной линией. Круглые маркеры, расположенные над границей, отвечают стационарным течениям. Квадратные маркеры расположены ниже границы и отвечают пульсирующим режимам, которые наблюдаются при малых разрядных токах. Границу между стационарными и пульсирующими режимами определяет следующая линейная зависимость  $\ln(J_p) = \lambda \ln(J_{\dot{m}}) + b$ , где  $\lambda = 0.615$  и  $b = 3.01$ .

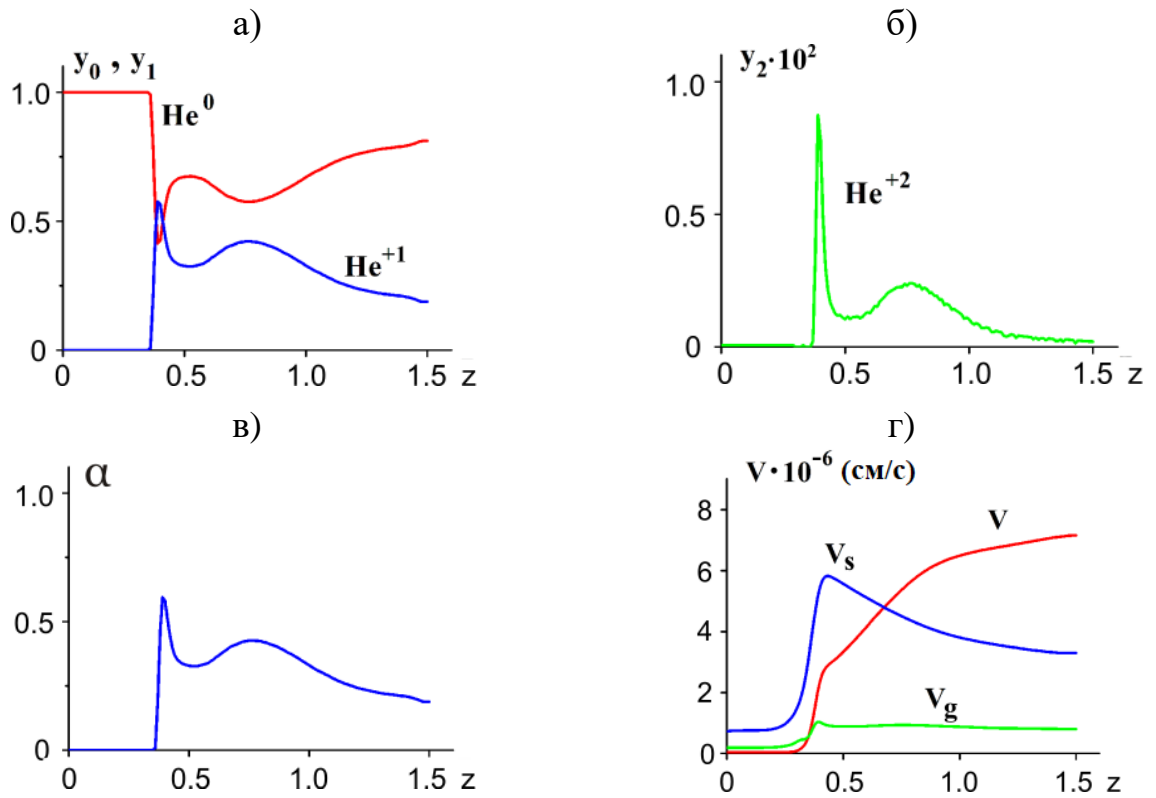


Рис. 16. Распределения вдоль средней координатной линии: относительные концентрации а) атомов и ионов гелия однократной ионизации, б) ионов гелия двукратной ионизации, в) степень ионизации, г) скорость потока  $V$ , скорость звука  $V_g$ , скорость сигнала  $V_s$

Поэтому эмпирическому условию стационарности течений ионизирующегося гелия соответствует следующее неравенство  $J_p^a / J_m > K$ , где  $a = 1/\lambda = 1.63$ . Значения  $K$  и  $a$  зависят от геометрии канала и используемого газа. Для сравнения штриховая линия на рис. 17 является границей между стационарными и пульсирующими течениями ионизирующегося водорода. Очевидно, что устойчивому процессу ионизации водорода отвечает более широкий диапазон параметров.

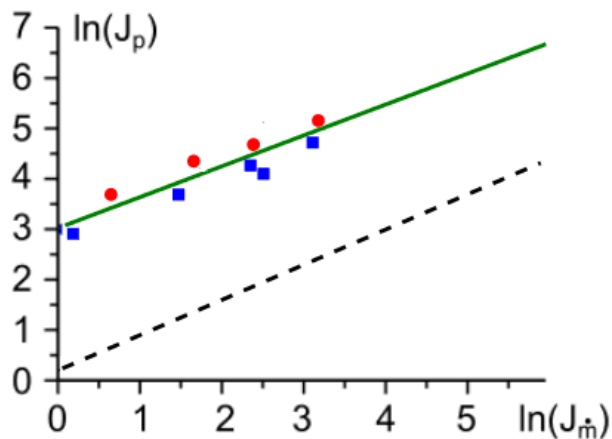


Рис. 17. Границы между стационарными и пульсирующими режимами для гелия (сплошная линия) и водорода (штриховая линия)

Таким образом, исследованы стационарные и пульсирующие течения ионизирующегося гелия. Расчеты процесса ионизации гелия и двумерных осесимметричных течений в канале КСПУ-Т (ТРИНИТИ) демонстрируют возможность образования ионов гелия с различной кратностью ионизации. Определены спектральные и интегральные характеристики излучения в потоке ионизирующегося гелия. В результате численных экспериментов сформулировано эмпирическое условие стационарности процесса ионизации гелия. Установлено, что стационарным течениям ионизирующегося гелия отвечает менее широкий диапазон параметров в отличие от течений ионизирующегося водорода. Исследование течений ионизирующегося азота показало, что процесс ускорения и соответствующего разрежения в потоке плазмы сопровождается образованием существенного количества ионов азота с высокой кратностью ионизации.

Результаты диссертационной работы способствуют проведению новых комплексных экспериментальных и теоретико-вычислительных исследований.

**В заключении** представлены основные результаты исследования процесса ионизации и переноса излучения в КСПУ с помощью численных моделей различного уровня сложности и для разных газов.

- Разработана модель радиационной магнитной газодинамики (РМГД) в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР), включая 3D модель переноса излучения.
- Определены спектральные и интегральные характеристики излучения в потоках ионизирующегося водорода в канале КСПУ.
- Проведено исследование стационарных и пульсирующих течений ионизирующегося водорода в канале плазменного ускорителя на основе системы МГД уравнений в квазиодномерном приближении с учетом уравнения кинетики ионизации и рекомбинации в рамках модифицированного диффузионного приближения (МДП).
- В результате серии численных экспериментов в рамках МДП определена граница перехода от пульсирующих режимов к стационарным течениям ионизирующегося водорода. Сформулировано эмпирическое условие стационарности течений ионизирующегося газа.
- Разработана также РМГД модель, дополненная системой уравнений поуровневой кинетики для населенностей атомных уровней. Определены населенности атомных уровней в окрестности фронта ионизации в канале КСПУ.
- В численных экспериментах показано, что радиационные процессы существенно влияют на возбуждение атомных уровней перед фронтом и обеспечивают предварительную ионизацию поступающего газа.
- Разработана РМГД модель в ЛТР приближении для численного исследования течений ионизирующегося гелия и азота в среде, содержащей многозарядные ионы с различной кратностью ионизации.



- В численных экспериментах определены спектральные и интегральные характеристики излучения в потоке ионизирующегося гелия.
- В результате серии расчетов сформулировано эмпирическое условие стационарности течений ионизирующегося гелия.
- Численное исследование течений ионизирующегося азота в канале КСПУ показало, что процессе ионизации и ускорения плазмы сопровождается образованием ионов азота с различной кратностью ионизации.
- На основе разработанных РМГД моделей реализованы программные комплексы, состоящие из ряда модулей, отвечающих за разные аспекты и этапы решения задач. Оформлено свидетельство о государственной регистрации одной из программ для ЭВМ.

### **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.
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.
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
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
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.
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. // J. of Physics: Conf. Ser. 2019. V. 1394. 012021.
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. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2019. Т. 42, № 3. С. 52-63.
8. Бахтин В.А., Захаров Д.А., Козлов А.Н., Коновалов В.С. Использование DVM-системы при разработке программы для расчетов задачи радиационной магнитной газодинамики и исследования динамики плазмы в канале КСПУ. // Электронные библиотеки. 2020. Т. 23, № 4. С. 594-614.
9. 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.

10. Козлов А.Н., Коновалов В.С., Новиков В.Г. Сравнительный анализ трех методов расчета переноса излучения на фронте ионизации в квазистационарных плазменных ускорителях. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2012. № 50. 24 с.
11. Козлов А.Н., Коновалов В.С. Пульсирующие режимы течений ионизирующегося газа в коаксиальных плазменных ускорителях. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2014. № 1. 28 с.
12. Козлов А.Н., Коновалов В.С. 3D модель переноса излучения в потоках ионизирующегося газа. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. № 86. 32 с.
13. 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.
14. 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
15. 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.
16. Козлов А.Н., Коновалов В.С., Климов Н.С., Коваленко Д.В., Подковыров В.Л., Урлова Р.В., Гуторов К.М. Исследование переноса излучения в потоке ионизирующегося гелия в плазменном ускорителе. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 61. 27 с.
17. Козлов А.Н., Коновалов В.С., Новикова С.О. Исследование пульсирующих течений ионизирующегося водорода в плазменном ускорителе на основе двумерной модели. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2021. № 96. 24с.
18. Коновалов В.С. Исследование устойчивости процесса ионизации гелия в канале плазменного ускорителя. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2021. № 108. 24 с.
19. Климов Н.С., Гуторов К.М., Коваленко Д.В., Козлов А.Н., Коновалов В.С., Подковыров В.Л., Ярошевская А.Д. Спектры излучения в потоках ионизирующихся газов для установки КСПУ-Т с продольным полем. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2022. № 12. 32 с.
20. 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.