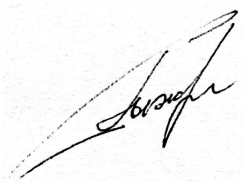
На правах рукописи

РЫЖКОВ Сергей Витальевич

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНЫХ МАГНИТНО-ИНЕРЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ

по специальностям 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
01.04.08 – Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук



Москва – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана».

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Хвесюк Владимир Иванович

Официальные оппоненты:

Гасилов Владимир Анатольевич,
доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, заведующий отделом

Попель Сергей Игоревич,
доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, заведующий лабораторией плазменно-пылевых процессов в космических объектах

Шишкин Алексей Геннадьевич,
доктор физико-математических наук, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, доцент кафедры автоматизации научных исследований факультета вычислительной математики и кибернетики

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Защита диссертации состоится « » декабря 2015 года в 11.00 на заседании диссертационного совета Д 212.141.15 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: Москва, Рубцовская наб., 2/18, ауд. 1006 л.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте (www.bmstu.ru) Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан « » октября 2015 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент Аттетков Александр Владимирович

3 1:4

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Среди разных типов удержания плазмы и термоядерных систем отсутствует серьезное исследование магнитно-инерциального термоядерного синтеза (МИТС), поэтому необходим численный анализ и комплексный расчет для оценки перспектив систем МИТС и реализации различных технологий. Эффективным средством решения этой задачи является использование современных численных методов решения сложных задач изучения плазмодинамических процессов.

Одной из актуальных задач современной физики и управляемого термоядерного синтеза является поиск новых областей и анализ перспективных альтернативных (гибридных) систем при создании реактора и источника частиц, а также получение оптимальных условий при решении задач, связанных с использованием тепловых и нейтронных потоков, генерируемых в термоядерных установках с мощными импульсными источниками. Передовые технологии, основанные на использовании плазмы, в которой идет реакция синтеза, и магнитно-инерциального удержания за счет сверхсильных магнитных полей и мощных источников нагрева, таких как лазеры и ускорители, необходимы в отраслях промышленности и при переходе к энергетике будущего. Системы с высокой плотностью энергии, а именно источники нейтронов и протонов, будут востребованы в ближайшее время для материаловедения, анализа и неразрушительного контроля, производства медицинских изотопов, уничтожения химических отходов и т.д.

Магнитно-инерциальный термоядерный синтез – оригинальное направление инерциального термоядерного синтеза, основанное на магнитно-инерционном удержании горячей плазмы (I.R. Lindemuth, I.R. Kirkpatrick, 1983; A. Hasegawa et al., 1983). МИТС объединяет все концепции, включая магнитное обжатие (С.Ф. Гаранин, 2012; Э.А. Азизов и др., 2001), пинчи (Тэрки П.Дж., 1975; С.Г. Алиханов, В.П. Бахтин, 1982; В.В. Александров и др., 2014) и комбинированные системы (В.Т. Ворончев, В.И. Кукулин, 2010; M.R. Gomez et al., 2014; А.В. Ивановский, 2004). Специфика МИТС заключается в том, что в

МГТУ
ИМ. Н.Э. БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА

этом подходе требуется оболочка (лайнер) (Э.А. Азизов и др., 1979) для сжатия и нагрева замагниченной плазмы (мишени), например, компактного тора (Р.Х. Куртмуллаев и др., 1984). В условиях МИТС возможно формирование плазмы с высокой плотностью энергии (В.Е. Фортов, 2009). В работе (M.M. Basko, A.J. Kemp, J. Meyer-ter-Vehn, 2000) показано, что поджиг термоядерного топлива значительно упрощается в случае с замагниченной плазмой.

Ранее были рассмотрены различные варианты взрывного ударника, позволяющие сохранять магнитный поток: металлический (Г.Д. Богомолов, А.Л. Великович, М.А. Либерман, 1983), частично испаряющийся (И.М. Артюгина и др., 1979), газообразный (Е.П. Велихов и др., 1973), сжимаемые жидкие оболочки (P.J. Turchi et al., 1976), имплозия в хольрауме (В.А. Гасилов, С.В. Захаров, В.П. Смирнов, 1991; В.П. Смирнов, С.В. Захаров, Е.В. Грабовский, 2005), быстрый поджиг термоядерного топлива. Соответственно теоретические и экспериментальные исследования, включая моделирование процессов взаимодействия плазма-оболочка, проводились для перечисленных выше систем и установок (В.В. Александров и др., 2013; А.П. Орлов, Б.Г. Репин, 2014).

Новой схемой МИТС является сжатие замагниченной плазмы мощными лазерными пучками (O.V. Gotchev et al., 2009; S.A. Slutz et al., 2010) или высокоскоростными плазменными струями (J.H. Degnan et al., 2013). В случае обжатия мишени плазменными струями конфигурация формируется внутри камеры сгорания под действием внешнего магнитного поля (соленоид). Сверхсильные магнитные поля уменьшают электронные тепловые потери и обеспечивают достаточное удержание плазмы.

Необходимо применение математического моделирования, численных методов и комплекса программ для исследования процессов взаимодействия в системах «лазер-замагниченная мишень» и «мишень-внутренняя магнитная оболочка-плазменный лайнер» и получения параметров, позволяющих работать в тех областях и диапазонах, которые недостижимы другими установками. Сложность решения задачи значительно повышается в условиях дефицита

экспериментов по нагреву и сжатию плазмы лазерными пучками и высокоскоростными плазменными струями во внешнем поле.

Схемы МИТС представляют расширенные возможности реализации новых технологий в зависимости от поставленных задач. В целях решения обозначенных выше проблем возникает острая необходимость в разработке адекватных практически значимых методов моделирования и расчете параметров нестационарных магнитно-инерциальных термоядерных систем в сильных магнитных полях. В работе рассматриваются перспективы использования систем МИТС, которые обладают рядом преимуществ и позволяют создать реактор и источник нейтронов, используя существующий опыт термоядерных исследований, что открывает путь для новых технологий.

Из Рис. 1 видно, что критерий для зажигания *DT*-реакции в случае МИТС можно записать в виде: $T = 5 - 8$ кэВ, $\rho R \geq 0.5$ кг/м^2, $BR \geq 10^{-1}$ Тл·м. Граница опускается ниже инерциального критерия, что делает возможным переход к более низким температурам и плотностям по сравнению с инерциальным термоядерным синтезом (ИТС).

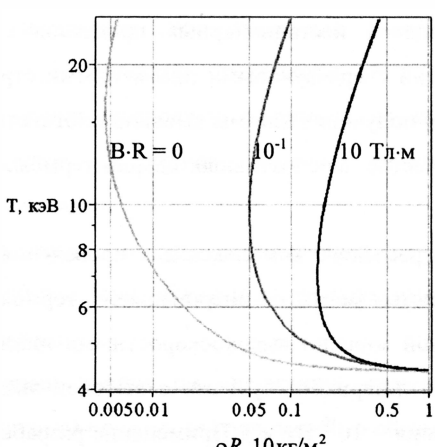


Рис. 1. Кривые $T(\rho R)$, соответствующие физическому порогу реакции синтеза для *DT*-сферы

Объектом исследования в диссертационной работе являются плазмодинамические и термодинамические процессы, протекающие при сжатии и нагреве плазменной мишени мощным лазерным излучением и высокоскоростными плазменными струями в сильном магнитном поле.

Цель диссертационной работы - разработка математических моделей и комплекса программ для расчета систем магнитно-инерциального удержания плазмы, обеспечивающих более эффективный рабочий цикл, чем традиционные машины, поиск передовых технологий в новых областях и обоснование достижимости параметров и метод расчета для реактора и источника нейтронов. Работа посвящена широкомасштабному вычислительному эксперименту и численному анализу процессов в плотной мишени, удерживаемой магнитным полем и расчету режимов термоядерных установок, использующих магнитные конфигурации с плазмой высокого давления, при обжатии их мощными лазерными пучками или высокоскоростными плазменными струями.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение **следующих основных задач:**

1. Разработка моделей нестационарных процессов сжатия и нагрева магнитных конфигураций сверхзвуковыми плазменными струями и мощными лазерными пучками для получения плазмы высокой плотности и последующего ее использования в качестве перспективных ядерно-термоядерного реактора и источника частиц.

2. Разработка программного комплекса для проведения многофакторных расчетов параметров систем магнитно-инерциального термоядерного синтеза с обжатием замагниченной мишени высокоскоростными плазменными струями (число Маха $M > 5$) и лазерными пучками с высокой энергией в импульсе (интенсивность излучения $\sim 10^{19}$ Вт/м^2). Применение разработанных методов к исследованию взаимодействия мишень-источник нагрева, проведению оптимизации параметров мишень–оболочка.

3. Исследование основных механизмов воздействия мощных источников на характеристики плотной плазмы во внешнем магнитном поле и обоснование перспективности направления магнитно-инерциальных систем с лазерными и плазменными пучками во внешнем магнитном поле.

Методы исследования. При решении задач, возникших в ходе выполнения диссертационной работы, использовались методы вычислительной математики, а также методы компьютерного моделирования и визуализации.

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые результаты, которые выносятся на защиту:

1. Физико-математические модели воздействия мощного лазерного излучения на замагниченную плазму в мишени инерциального термоядерного синтеза при наличии магнитного поля для последующей разработки эффективных схем и экспериментальной реализации исследованных явлений и создания на их основе компактных источников частиц и энергии. Многофакторное моделирование структуры и эволюции плазмы во внешнем магнитном поле под воздействием мощных струй с высоким число Маха и лазерных пучков высокой энергии импульса.

2. Режимы и оценки параметров для системы «мишень-магнитная оболочка-лайнер». Полученные параметры, в частности, плазменный коэффициент усиления, позволяют надеяться на использование подобных систем в качестве источника частиц, ракетного двигателя, для материаловедческих задач.

3. Математическая модель, позволяющая рассчитывать процессы в замагниченной мишени при обжатии ее несколькими лазерными пучками и плазменными струями.

4. Комплексный анализ по удержанию плазменной конфигурации в затравочном магнитном поле после равномерного обжатия и расчет спонтанных магнитных полей. Численный анализ на базе нестационарной двумерной радиационно-магнитогазодинамической модели с учетом электронной теплопроводности и радиационно-конвективного теплообмена.

5. Параметры плазмы для различных систем и оценка применимости этих систем для создания прототипов термоядерных реакторов, источников нейтронов. Детально изучены методы обжатия топлива за счет подбора магнитных конфигураций и внешних источников, определения перспективных режимов сжатия и требований к технике, которая обеспечивает это сжатие.

6. Программный комплекс для расчета систем МИТС, включающий внутреннее термоядерное энерговыделение, газодинамику и радиационный транспорт, а также для исследования свойств импульсной плотной плазмы при сжатии мишеней с учетом конвекции, излучения и физико-химических превращений при наличии внешнего магнитного поля.

Практическая значимость работы. Проведённое в работе исследование позволило разработать методы и модели для расчета симметричной имплозии замагниченной мишени при помощи внешнего источника, получить параметры мишени, обжимаемой лазерными пучками или плазменными струями и провести сравнение основных характеристик для разных систем.

Разработаны и зарегистрированы программные комплексы, позволяющие выполнять численные расчеты и представлять полученные результаты в графическом виде (свидетельства о государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности Российской Федерации № 2012617551 от 21.08.2012 г., № 2013616817 от 23.07.2013 г., № 2014617694 от 31.07.2014 г. и № 2014619893 от 19.11.2014 г.).

Достоверность изложенных в диссертации основных положений подтверждена: теоретическим обоснованием используемых в методах математических моделей и алгоритмов, согласованием с результатами численных экспериментов, апробацией разработанного программного комплекса в вычислительных экспериментах.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены в докладах на следующих конференциях и симпозиумах: XXIX - XLI Международная конференция по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2002-2014); XXIX и XXX конференция

Европейского Физического Общества по физике плазмы и УТС «EPS Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion», (Монтрё, 2002; Санкт-Петербург, 2003); V, VI и VIII Международная конференция по открытым магнитным системам для удержания плазмы «International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement» (Новосибирск, 2004, 2010; Цукуба, 2006); XI, XII и XIV Международная конференция-школа по физике плазмы и УТС «International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion» (Алушта, 2006, 2008, 2012); III, IV и V Международная конференция «Рубежи нелинейной физики» (Нижний Новгород, 2007, 2010, 2013); VI-IX Международный симпозиум по радиационной плазмодинамике (Звенигород, 2003, 2006, 2009, 2012); 14 Международный конгресс по физике плазмы «International Congress on Plasma Physics» (Фукуока, 2008); VI международная конференция «Физика плазмы и плазменные технологии» (Минск, 2009); III и IV Всероссийская школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем» (Москва, 2009, 2010); Научно-техническая конференция «Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии» (Москва, 2009); XVII школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях» (Жуковский, 2009); XXXIV-XXXVIII Академические чтения по космонавтике «Королевские чтения» (Москва, 2010-2014); XIV Международная конференция по теплообмену «The International Heat Transfer Conference» (Вашингтон, 2010, Киото, 2014); V и VI Российских национальных конференциях по теплообмену (Москва, 2010, 2014); XII Международный семинар «Плазменная электроника и новые методы ускорения» (Харьков, 2013); LXIII Международная конференция «ЯДРО 2013» (Москва, 2013). И семинарах: в Институте Математического Моделирования/Институте Прикладной Математики имени М.В. Келдыша РАН, МИРЭА, Институте Прикладной Физики РАН, Институте Проблем Механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, Институте термоядерных технологий Университета Висконсин (Fusion Technology Institute, University of Wisconsin-

Madison), Институте Ядерной Физики имени Г.И. Будкера СО РАН, ТРИНИТИ, Центра Материалов и Микросистем Институте (Фонд) Бруно Кесслера Университета Тренто (Fondazione Bruno Kessler, Centro Materiali e Microsistemi), в Институте нейтронной физики и реакторных технологий Технологического Института Карлсруэ (Institut fuer Neutronenphysik u. Reaktortechnik, Karlsruhe Institute of Technology). Также основные теоретические и методические положения диссертации докладывались и получили положительную оценку на научно-технических семинарах и заседаниях кафедры теплофизики МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Основные результаты работы получены при выполнении проектов РФФИ (№ 03-02-16631-а, 08-08-00459-а, 08-08-09244-моб_з, 09-08-00137-а, 09-02-90702-моб_ст и 10-08-08139-моб_з), программ сотрудничества Министерства образования Российской Федерации и Министерства Российской Федерации по атомной энергии (проекты № 2.06.13, 3.06.23), Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF RUT1-2906-MO-07), грантов Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых (проекты № МК-8219.2006.8, МК-676.2008.8), программы Эрасмус Мундус (Акция 2) Европейского Союза (EMA 2 MULTIC 10-1156), совместной программы Германской службы академических обменов и Министерства образования и науки Российской Федерации «Михаил Ломоносов», аналитической ведомственной целевой программы АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)» (код проекта 2.2.2.3/15101), госконтракта № 14.516.11.0083 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы», госзадания МОН РФ на проведение в вузе научно-исследовательских работ (проект № 11.9198.2014) и в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 13.79.2014/К.

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 63 научных работах, в том числе в 25 статьях, опубликованных в журналах из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий.

Личный вклад соискателя. Все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию вошел лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю; заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 297 наименований и содержит 41 рисунок и 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, их достоверность, основные положения, защищаемые диссертантом, а также приведены данные о структуре и объеме диссертационной работы.

В первой главе проведен обзор проблемы и перспектив магнитно-инерциальных исследований в мире, рассмотрены обращенная магнитная конфигурация FRC и газодинамическая ловушка для удержания плазмы - альтернативные системы с высоким бета (отношение газокинетического давления плазмы к давлению внешнего магнитного поля), описаны режимы и параметры и сделан обзор экспериментальных установок в данной области. Рассмотрены некоторые подходы к моделированию таких систем и характерные особенности высокотемпературной плазмы.

В области магнитного удержания и создания технологий для формирования режимов с высокими параметрами крайне актуальным является анализ плазменных конфигураций с предельно высоким энергосодержанием. Данное исследование направлено на решение проблемы, связанной с проведением теоретических и экспериментальных работ по изучению механизмов обеспечения наиболее длительного удержания замагниченной

плазмы и режимов компактных конфигураций с высоким β. В заключении к первой главе сформулированы задачи исследования.

Во второй главе представлены математические модели и результаты расчета на их основе симметричной квазисферической имплозии замагниченной мишени лазерными пучками с высокой энергией импульса и высокоскоростными плазменными струями. Впервые предложено использовать антипробочную конфигурацию («касп») для затравочного магнитного поля при обжатии замагниченной мишени лазерными пучками (Рис. 2 а). В отличие от соленоидальной конфигурации, приводящей к большим потерям частиц через концы соленоида, антипробочная конфигурация обеспечивает более высокую эффективность удержания и тепловой изоляции высокотемпературной плазмы в момент сжатия лазерными пучками. Рассмотрены процессы, протекающие в системе с плазменными струями, и представлены расчеты основных параметров, входящих в баланс мощностей и вносящих основной вклад в энергетику и физику, так как характеристики магнитной конфигурации могут существенно влиять на удержание плазменного ядра и соответственно на энергетические данные системы. На основе ракетной и изоэнтропийной моделей, а также анализа процессов в плазме антипробкотрона, получены зависимости параметров сжатия замагниченной мишени мощными лазерными пучками. Полученные решения учитывают как сжатие магнитного поля, «вмороженного» в мишень, так и потери частиц через осевые щели антипробкотрона. Основным параметром, описывающим поведение мишени при сжатии, является параметр $\alpha = \tau_{comp} / \tau_{loss}$ - отношение характерного времени сжатия мишени к характерному времени потерь частиц из антипробкотрона. Представлены результаты численного анализа разработанных математических моделей при различных значениях параметра α.

Разработана модель плазменного сжатия сферической термоядерной мишени на основе конфигурации FRC с затравочным магнитным полем (Рис. 2 б). Рассмотрены процессы, происходящие при обжатии FRC в качестве замагниченной мишени. Даны количественные оценки величин вклада и потерь

мощности системы. Определены основные каналы потерь в системе. Нарастающее магнитное поле, сжимающееся вместе с мишенью, уменьшает коэффициенты теплопроводности, что позволяет уменьшить расходы мощности по сравнению с ИТС.

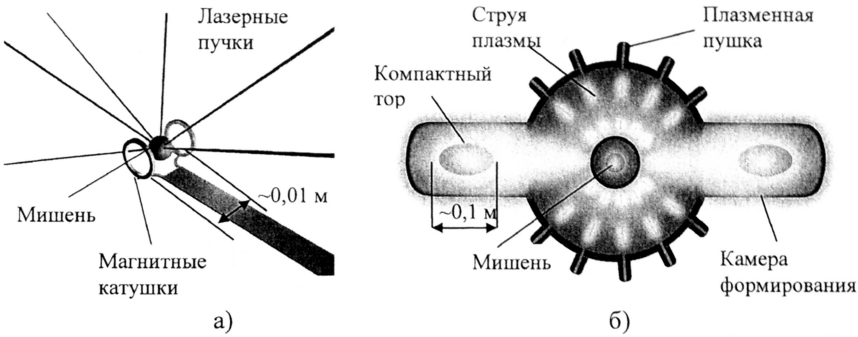


Рис. 2. Сжатие мишени лазерными пучками (а) и плазменными струями (б) в магнитно-инерциальном термоядерном синтезе

Показано что при наличии магнитного поля и соблюдения предельных размеров мишени возможно удержание α-частиц, что позволяет им полностью отдать энергию реагирующей плазме. В традиционном ИТС при обжатии с увеличением температуры вклад продуктов реакции уменьшается и при предельных параметрах плазмы остается на уровне, соответствующему минимуму в конфигурациях с ненулевым магнитным полем. Вклад нейтронов незначителен. Полный вклад продуктов реакции является огромным преимуществом МИТС, которое уменьшает требования к затрачиваемой мощности и увеличивает энергетический выход. Разработана модель плазменного сжатия сферической термоядерной мишени на основе конфигурации FRC с затравочным магнитным полем.

Третья глава содержит математическую модель динамики плазменной мишени при воздействии на нее мощными лазерами. Система уравнений радиационной плазмодинамики записана в безразмерных переменных. В данном случае наиболее естественным является подход, когда не меняется конфигурация расчетной области (в нашем случае прямоугольник в системе

координат ξ,η), а учет движения сеточного пространства за счет адаптационного изменения происходит путем введения в рассматриваемую систему уравнений дополнительных специальных (конвективных) слагаемых:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{d\xi}{dt}\frac{\partial\rho}{\partial\xi}+\frac{d\eta}{dt}\frac{\partial\rho}{\partial\eta}+\frac{1}{J}\frac{\partial\left(J\rho V_\xi\right)}{\partial\xi}+\frac{1}{J}\frac{\partial\left(J\rho V_\eta\right)}{\partial\eta}=-\alpha\frac{\rho u}{r};$$

$$\frac{\partial\rho u}{\partial t}+\frac{d\xi}{dt}\frac{\partial\rho u}{\partial\xi}+\frac{d\eta}{dt}\frac{\partial\rho u}{\partial\eta}+\frac{1}{J}\frac{\partial\left(J\rho uV_\xi\right)}{\partial\xi}+\frac{1}{J}\frac{\partial\left(J\rho uV_\eta\right)}{\partial\eta}=$$

$$=-\xi_r\frac{\partial P}{\partial\xi}-\eta_r\frac{\partial P}{\partial\eta}-\alpha\frac{\rho u^2}{r}+\frac{S_r}{\mathrm{Re}}+\frac{L_*}{c}\left[\vec{j}\times\vec{B}\right]_r;$$

$$\frac{\partial\rho \mathrm{v}}{\partial t}+\frac{d\xi}{dt}\frac{\partial\rho \mathrm{v}}{\partial\xi}+\frac{d\eta}{dt}\frac{\partial\rho \mathrm{v}}{\partial\eta}+\frac{1}{J}\frac{\partial\left(J\rho \mathrm{v}V_\xi\right)}{\partial\xi}+\frac{1}{J}\frac{\partial\left(J\rho \mathrm{v}V_\eta\right)}{\partial\eta}=$$

$$=-\xi_z\frac{\partial P}{\partial\xi}-\eta_z\frac{\partial P}{\partial\eta}-\alpha\frac{\rho u\mathrm{v}}{r}+\frac{S_z}{\mathrm{Re}}+\frac{L_*}{c}\left[\vec{j}\times\vec{B}\right]_z;$$

$$\frac{\partial\rho e}{\partial t}+\frac{d\xi}{dt}\frac{\partial\rho e}{\partial\xi}+\frac{d\eta}{dt}\frac{\partial\rho e}{\partial\eta}+\frac{1}{J}\frac{\partial\left(J\rho eV_\xi+J\sum q_{i\xi}\right)}{\partial\xi}+\frac{1}{J}\frac{\partial\left(J\rho eV_\eta+J\sum q_{i\eta}\right)}{\partial\eta}=$$

$$=-\frac{P}{J}\left\{\frac{\partial\left(JV_\xi\right)}{\partial\xi}+\frac{\partial\left(JV_\eta\right)}{\partial\eta}\right\}-\alpha\frac{Pu}{r}-\alpha\frac{\rho eu}{r}+\frac{S_e}{\mathrm{Re}}+\frac{L_*}{V_*}\left(\vec{j}\vec{E}\right);$$

$$S_e=\frac{\left(\mu_\Sigma^{\perp}+\mu_\Sigma^{\square}\right)}{2}D+\frac{\gamma}{\mathrm{Pr}}div\left(\sum_k\left[\lambda_{k,\Sigma}^{\perp\square}gradT_k\right]\right)+\frac{\mathrm{Re}t_*}{\rho_*e_*}Q_L+\frac{\mathrm{Re}t_*}{\rho_*e_*}Q_{Fus};$$

$$\frac{\partial\rho e_i}{\partial t}+\frac{d\xi}{dt}\frac{\partial\rho e_i}{\partial\xi}+\frac{d\eta}{dt}\frac{\partial\rho e_i}{\partial\eta}+\frac{1}{J}\frac{\partial\left(J\rho e_iV_\xi\right)}{\partial\xi}+\frac{1}{J}\frac{\partial\left(J\rho e_iV_\eta\right)}{\partial\eta}=$$

$$=-\frac{P_i}{J}\left\{\frac{\partial\left(JV_\xi\right)}{\partial\xi}+\frac{\partial\left(JV_\eta\right)}{\partial\eta}\right\}-\alpha\frac{P_iu}{r}-\alpha\frac{\rho e_iu}{r}+\frac{\left(S_{e,Fus}^i+S_{e,Qei}^i\right)}{\mathrm{Re}};$$

$$S_{e,Fus}^i=\frac{\mathrm{Re}t_*}{\rho_*e_*}Q_{Fus};\ S_{e,Qei}^i=\frac{\mathrm{Re}t_*}{\rho_*e_*}Q_{ei};\ \left[\vec{j}\times\vec{B}\right]_r=j_\varphi B_z;\ \left[\vec{j}\times\vec{B}\right]_z=-j_\varphi B_r;\ \left(\vec{j}\vec{E}\right)=j_\varphi E_\varphi;$$

используемые обозначения: $k=(e,i)$ – индексы соответствующие электронам и ионам смеси; $\vec{j}$ – вектор плотности тока; $\vec{B},\vec{E}$ – напряженности магнитного и электрического поля; величины S_r,S_z математически описывают силы, возникающие в потоке за счет вязкого трения; S_e – объемное энерговыделение,

появляющееся из-за работы сил трения $D\left(\mu_{\Sigma}^{\perp}+\mu_{\Sigma}^{\sqcup}\right)/2$ (D – диссипативная функция), переноса теплоты процессами теплопроводности $div\left(\sum_{k}\left[\lambda_{k,\Sigma}^{\perp\sqcup}gradT_k\right]\right)\approx div\left(\lambda_{e,\Sigma}^{\perp\sqcup}gradT_e\right)$ и энерговыделения Q_L, обусловленного действием лазерного излучения на плазму окружающей среды и паров материала драйвера; Q_{Fus} – термоядерное энерговыделение; $\mathrm{Re}=\frac{L_*\rho_*V_*}{\mu_*}$ – число Рейнольдса; $\mathrm{Pr}=\frac{\mu_*C_{p*}}{\lambda_*}$ – число Прандтля; Q_{ei} – энергия, передаваемая в единицу времени в единице объема от электронов к ионам.

Величины $u(r,z,t)=V_r, \mathrm{v}(r,z,t)=V_z$ – проекции вектора скорости $\vec{V}(r,z,t)$ на оси R и Z; e – удельная внутренняя энергии плазмы; e_i – удельная внутренняя энергии ионной компоненты плазмы; $J=\partial(r,z)/\partial(\xi,\eta)$ – якобиан перехода от цилиндрической системы координат r,z к криволинейной системе координат ξ,η, $V_\xi=\xi_r u+\xi_z \mathrm{v}$; $V_\eta=\eta_r u+\eta_z \mathrm{v}$ – контравариантные компоненты вектора скорости $\vec{V}$ в криволинейной системе координат ξ,η; ρ – плотность плазмы; $P=P_e+P_i$ – давление плазмы; P_e – давление электронов; $\sum_i q_{i\xi}, \sum_i q_{i\eta}, q_{laz,\xi}, q_{laz,\eta}$ – проекции вектора плотности потока лучистой энергии $\vec{q}$ широкополосного и лазерного излучения на оси криволинейной системы координат ξ и η; $\alpha=0$ – соответствует плоскому; $\alpha=1$ – осесимметричному случаям течения; $\mu_m^{\perp\sqcup}$ – динамический коэффициент вязкости, учитывающий атомно-молекулярные столкновительные процессы и наличие магнитного поля в плазме; μ_t – коэффициент турбулентной вязкости, для определения которого используется $q-\omega$ модель турбулентности Кокли в криволинейной системе координат ξ,η.

Для замыкания системы уравнений радиационной плазмодинамики используются уравнения состояния для ионной и электронной компонент плазмы. Удельная внутренняя энергия ионов e_i (на единицу массы) и давление P_i определяются соотношениями (В.М. Головизнин, 1985):

$$e_i = \frac{3}{2}\frac{kT_i}{M_i};\ P_i = \frac{k\rho T_i}{M_i},$$

где ρ – плотность плазмы; T_i – температура ионов в К; M_i – масса иона; k – постоянная Больцмана.

Уравнение состояния для электронного газа учитывает его вырождение, а также затраты энергии на ионизацию:

$$e_e = \frac{3}{2}\frac{Z_i k}{M_i}\left[T_e^{3/2} + \frac{Z_i \Upsilon \rho}{A}\right]^{2/3} + \frac{I(Z_i)}{M_i};\ P_e = \frac{\rho Z_i k}{M_i}\left[T_e^{3/2} + \frac{Z_i \Upsilon \rho}{A}\right]^{2/3},$$

где $A = M_i / m_p$ – атомный вес иона; $\Upsilon = 1{,}05 \times 10^{-3}$ – постоянная; m_P – масса протона. Энергия ионизации «среднего иона» определяется как:

$$I(Z_i) = 13{,}8\left[\frac{Z_i^3}{3} + \frac{Z_i^2}{2} + \frac{Z_i}{6}\right] \Big/ \left(0{,}85 + 0{,}15 Z_i^{2/3}\right),$$

где Z – заряд ядра.

Если функции распределения электронов и ионов являются максвелловскими, то энергия, передаваемая в единицу времени в единице объема от электронов к ионам, может быть рассчитана по формуле:

$$Q_{ei} = \frac{2m_e}{M_i}\frac{3}{2}k\left(T_e - T_i\right)\nu_{ei} n_e,$$

где ν_{ei} – средняя частота электрон–ионных столкновений с передачей импульса.

Уравнение, описывающее динамику магнитного поля $\vec{B}$ в подвижной адаптивной системе координат ξ, η, ζ, имеет вид:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \left(\vec{V}_{\xi,\eta,\zeta} \bullet \nabla \vec{B}\right) = rot\left[\vec{V} \times \vec{B}\right] - \frac{c^2}{4\pi}\frac{t_*}{L_*^2} rot\left(\frac{rot\vec{B}}{\sigma}\right);\ \vec{j} = \sigma\left(\vec{E} + \frac{V_*}{c}\left[\vec{V} \times \vec{B}\right]\right);$$

$$\left(\vec{V}_{\xi,\eta,\zeta} \bullet \nabla \vec{B}\right) = \frac{d\xi}{dt}\frac{\partial \vec{B}}{\partial \xi} + \frac{d\eta}{dt}\frac{\partial \vec{B}}{\partial \eta} + \frac{d\zeta}{dt}\frac{\partial \vec{B}}{\partial \zeta};\ \vec{V}_{\xi,\eta,\zeta} = \left(\frac{d\xi}{dt}, \frac{d\eta}{dt}, \frac{d\zeta}{dt}\right)^T,$$

где σ – коэффициент электропроводности; $\vec{V}$ - скорость плазмы.

Уравнение переноса излучения представлено в виде системы уравнений диффузионного многогруппового приближения:

$$\frac{1}{J}\frac{\partial\left(Jq_{i\xi}\right)}{\partial \xi} + \frac{1}{J}\frac{\partial\left(Jq_{i\eta}\right)}{\partial \eta} + \chi_i c U_i = 4\chi_i \sigma_i T^4;\quad \frac{c}{3}\frac{\partial U_i}{\partial \xi} + \chi_i q_{i\xi} = 0;\ \frac{c}{3}\frac{\partial U_i}{\partial \eta} + \chi_i q_{i\eta} = 0,$$

где $U_i(y,z,t)$ – плотность лучистой энергии в i–ой спектральной группе; χ_i – спектральный коэффициент поглощения.

Физическая модель термоядерного горения топлива определяется шестью компонентами: дейтерий (D); тритий (T); протон (p); нейтрон (n); гелий – 3 (^{3}He); гелий – 4 (α-частица).

При проведении расчета производится учет четырех основных термоядерных реакций (в скобках указан индекс i, которым в дальнейшем обозначается соответствующая реакция синтеза):

$$1)\ D+T \to n+\alpha+17589 \text{ кэВ } (i=1);$$

$$2)\ D+D \to p+T+4033 \text{ кэВ } (i=2);$$

$$3)\ D+D \to n+{}^3He+3269 \text{ кэВ } (i=3);$$

$$4)\ D+{}^3He \to p+\alpha+18353 \text{ кэВ } (i=4).$$

Распределение α–частиц по скоростям принимается максвелловским. При этом нейтроны, как правило, вылетают из мишени (но 10% энергии нейтронов может остаться в зоне реакции). В работе использовано упрощенное описание уравнений, описывающих изменение числа частиц (все нейтроны считаются вылетевшими, изменением массы горючего можно пренебречь):

$$\frac{DN_D}{Dt} = -F_1 - 2F_2 - 2F_3 - F_4,\ \frac{DN_T}{Dt} = -F_1 + F_2;\qquad \frac{DN_\alpha}{Dt} = F_1 + F_4;$$

$$\frac{DN_{3He}}{Dt} = F_3 - F_4,\ \frac{DN_p}{Dt} = F_2 + F_4;$$

$$F_1 = \langle\sigma v\rangle_1 n_D n_T;\ F_2 = \langle\sigma v\rangle_2 0{,}5 n_D^2;\ F_3 = \langle\sigma v\rangle_3 0{,}5 n_D^2;\ F_4 = \langle\sigma v\rangle_4 n_D n_{3He}.$$

Сечения (площадь взаимодействия атома с падающим потоком частиц) σ и скорости энерговыделения (далее скорости) реакции <σv> рассчитываются в системе центра масс, < > скобки означают, что скорость реакции усреднена по распределению Максвелла. Для расчета скоростей основных термоядерных реакций (в м^3/с) в диапазоне температур (в кэВ), характерных для магнитно-инерциальных процессов используется упрощенные формулы, которые дают меньше 1% погрешности по сравнению с экспериментальными данными.

Разработана математическая модель облучения замагниченной мишени несколькими лазерными пучками, которая описывает динамику и кинетику термоядерной замагниченной мишени. Моделирование процессов сжатия плазмы и вмороженного в нее магнитного поля при воздействии лазерными пучками с высокой энергией импульса подразумевает равномерное обжатие мишени. Введены газодинамические параметры и на основе нестационарной двумерной радиационно-магнитогазодинамической модели выполнено исследование сжатия замагниченной мишени лазерными пучками при наличии затравочного магнитного поля. Для определения минимальных требований к величине магнитного поля на конечной стадии сжатия были проведены численные расчеты эволюции во времени баланса частиц и энергии. Как показывают результаты, для наиболее перспективных режимов требуются магнитные поля на уровне $B \approx 1000$ Тл.

Модель описывает сжатие мишени лазерными пучками в магнитном поле произвольной конфигурации и может быть использована для численного исследования процессов образования плазмы во внешнем затравочном магнитном поле и ее нагрева при сжатии с использованием высокоэнергетичных внешних источников. Выведенные уравнения учитывают как сжатие магнитного поля, так и поведение плазмы при сжатии.

В четвертой главе описан комплекс компьютерных программ для моделирования воздействия мощных источников на параметры плотной плазмы во внешнем магнитном поле. Представлены модель основных процессов (Рис. 3), алгоритм расчета основных параметров взаимодействия замагниченной мишени с мощным источником излучения и схема расчета радиационно-магнитных уравнений Рейнольдса.

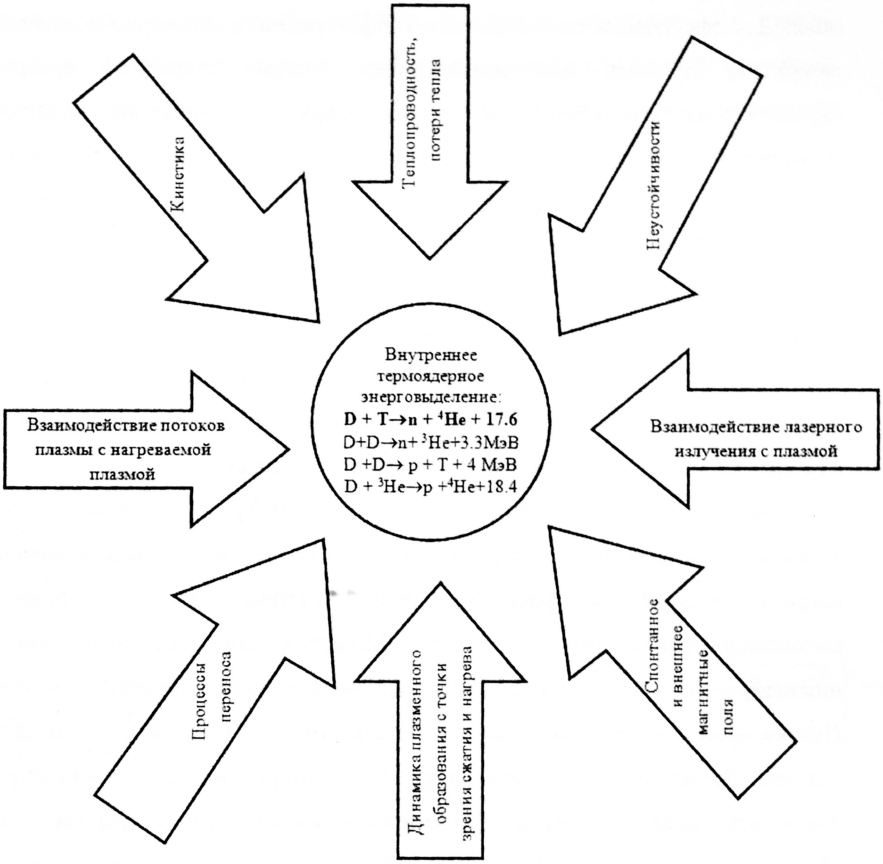


Рис. 3. Модель основных процессов взаимодействия системы мишень-мощный источник излучения

Двумерный радиационный магнитогазодинамический код является частью комплекса NICA (Nonstationary Instruments and Codes for fusion Applications) для МИТС включает термоядерное энерговыделение, радиационный транспорт в многогрупповом диффузионном приближении и газодинамику с динамической адаптивной сеткой.

Во второй и третьей частях четвертой главы представлено двумерное численное исследование сжатия термоядерной мишени плазменными и лазерными пучками при наличии осесимметричного затравочного магнитного

МГТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

поля. Для сферически симметричной конфигурации, равномерно обжимаемой лазерными пучками или плазменными струями приведено сравнение характеристик теплообмена и времен удержания, показаны возможные магнитно-инерциальные режимы. Получены уравнения, описывающие динамику магнитного поля для случая сферической компрессии замагниченной мишени. Обсуждается эффективность мишени с внутренней магнитной оболочкой. При обжатии замагниченной мишени высокоскоростными плазменными струями представлены параметры мишени с внутренней оболочкой и внешней оболочкой (плазменным лайнером). При этом имеет место генерация (значительное усиление затравочных полей до интенсивности в сотни тесла) сверхсильных магнитных полей лазерным излучением.

Анализируется энергетический баланс термоядерной системы на основе аксиально-симметричной открытой ловушки. Основным источником внешнего нагрева плазмы в рассматриваемой системе является инжекция высокоэнергетичных (быстрых) частиц. Моделирование физической кинетики инжектируемых частиц основано на численном решении уравнения Фоккера–Планка, учитывающем рассеяние в область потерь и участие в термоядерной реакции. Несмотря на значительную долю потерь энергии инжектируемых частиц при уходе из ловушки из-за углового рассеяния, рассмотренная система обладает достаточной эффективностью как нейтронный источник для гибридного (синтез–деление) реактора. Показана принципиальная возможность достижения коэффициента усиления мощности в плазме $Q_{pl} \approx 1$ при высоком уровне нейтронного выхода. Такие системы могут быть использованы для освоения космоса, производства медицинских изотопов и, в свете последних событий, для режима нераспространения оружия массового уничтожения.

Другие прикладные направления компактных систем – их использование в качестве источника протонов и нейтронов, в технологии материалов, для изучения взаимодействия плазма-стенка, для подпитки токамаков и для тестирования основных наиболее нагруженных элементов конструкций. Результаты оценок представлены в Таблице 1. Рассматривается сжатие мишени,

состоящей из равных долей дейтерия и трития, имеющих до сжатия температуру T_0. Мишень радиуса r_0 помещена в магнитное поле с индукцией B_0, занимающее область радиуса R_0. В результате воздействия плазменных струй вокруг мишени создается плазменный лайнер с температурой T_L, сжимающий охватываемое им магнитное поле до индукции B. При этом внешний радиус внутренней магнитной оболочки (ВМО) уменьшается до величины R, радиус мишени уменьшается до r, а ее температура возрастает до термоядерной величины $T \approx$ 10–15 кэВ. Сжатие считается адиабатным, т.е. предполагается, что излучение составляет малую долю по сравнению со сжатием и внутренней энергией.

Таблица 1.

Параметры мишени с ВМО и плазменным лайнером

	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 4	Вар. 5
Параметры до сжатия					
Магнитное поле B_0, Тл	6,3	9,0	9,0	4,5	6,3
Вещество лайнера	Xe	Xe	Xe	Xe	Ar
Плотность потока энергии лайнера на мишень J, Вт/м^2	$4{,}3\cdot10^{18}$	$8{,}8\cdot10^{18}$	$2{,}8\cdot10^{18}$	$6{,}9\cdot10^{17}$	$2{,}5\cdot10^{18}$
Параметры после сжатия					
Магнитное поле B, Тл	11340	16040	16040	8020	11340
Концентрация дейтерия n_D, м$^{-3}$	$4{,}0\cdot10^{27}$	$8{,}0\cdot10^{27}$	$8{,}0\cdot10^{27}$	$4{,}0\cdot10^{27}$	$4{,}0\cdot10^{27}$
Температура мишени T, кэВ	20	20	20	10	20
Энергия плазмы W_{pl}, Дж	$3{,}0\cdot10^{7}$	$6{,}0\cdot10^{7}$	$6{,}0\cdot10^{7}$	$1{,}5\cdot10^{7}$	$3{,}0\cdot10^{7}$
Энергия магнитного поля W_M, Дж	$8{,}8\cdot10^{6}$	$1{,}8\cdot10^{7}$	$1{,}8\cdot10^{7}$	$4{,}4\cdot10^{6}$	$8{,}8\cdot10^{6}$
Энергия лайнера W_L, Дж	$7{,}7\cdot10^{7}$	$1{,}5\cdot10^{8}$	$1{,}5\cdot10^{8}$	$7{,}7\cdot10^{6}$	$7{,}7\cdot10^{7}$
Параметры фазы горения					
Энергия синтеза W_{fus}, Дж	$4{,}5\cdot10^{8}$	$1{,}8\cdot10^{9}$	$5{,}6\cdot10^{9}$	$3{,}9\cdot10^{7}$	$7{,}8\cdot10^{8}$
Энергия синтеза потенциальная W_{fus0}, Дж	$4{,}4\cdot10^{9}$	$8{,}8\cdot10^{9}$	$8{,}8\cdot10^{9}$	$3{,}7\cdot10^{8}$	$4{,}4\cdot10^{9}$
Время удержания плазмы τ,с	$5{,}8\cdot10^{-8}$	$5{,}8\cdot10^{-8}$	$1{,}8\cdot10^{-7}$	$1{,}8\cdot10^{-7}$	$1{,}0\cdot10^{-7}$
Плазменный коэффициент усиления Q_{pl}	3,8	7,7	24	6,4	6,7

Как видно из Таблицы 1, в зависимости от задачи системы с плазменным лайнером могут работать в широком диапазоне параметров, а достижимые значения коэффициента усиления мощности (Q) позволяют использовать различные режимы и установки - медицинского применения (Q>0,1), источники частиц (Q>0,5), ракетный двигатель (Q>1) и для производства энергии (Q>10).

Рассмотрены системы магнитного удержания высокотемпературной плазмы с замкнутыми силовыми линиями, которые в настоящее время занимают лидирующие позиции при изучении физики управляемого термоядерного синтеза. Представлены основные характеристики реакторов, которые являются замкнутыми ловушками по способу удержания плазмы. Проведено сравнение концептуальных проектов на основе классических токамака, стелларатора, сферического токамака и компактного тора.

В пятой главе описаны основные для данной диссертации приложения развитых в работе математических моделей к конкретным задачам сжимаемой плазмы, находящейся во внешнем магнитном поле. Глава посвящена нейтронному источнику и исследованию неустойчивости Рихтмайера–Мешкова (РМН) в импульсных системах с инерциальным удержанием частиц во внешнем магнитном поле.

В первой части главы 5 описана модель и анализируется возможность применения магнитно-инерциального термоядерного синтеза для создания нейтронного источника. Рассматривается конфигурация мишени в виде аксиально-симметричной открытой ловушки с магнитными «пробками», или так называемый «пробкотрон». Получены параметры магнитно-инерциальных режимов цилиндрической мишени-пробкотрона (варианты 1–3) и проведено сравнение с квазистационарным нейтронным источником на основе открытой ловушки (Таблица 2). Показана принципиальная возможность достижения коэффициента усиления мощности в плазме $Q_{pl} \approx 1$ при высоком уровне нейтронного выхода.

Во второй части пятой главы исследована РМН для условий МИТС в импульсных системах с инерциальным удержанием частиц. Представлена модель взаимодействия лазера высокой энергии импульса с плазменной мишенью, находящейся в затравочном магнитном поле.

Таблица 2.

Параметры магнитно-инерциальных режимов цилиндрической мишени-пробкотрона (варианты 1–3) и квазистационарного нейтронного источника (КСНИ) на основе открытой ловушки

Параметр	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	КСНИ
Радиус плазмы a, см	0,25	0,5	0,25	100
Длина плазмы L, м	0,1	0,1	0,1	10
Магнитное поле центрального соленоида B_0, Тл	3300	1500	3300	1,5
Магнитное поле в пробках B_m, Тл	10000	15000	10000	11
Концентрация топлива $n_D = n_T$, м$^{-3}$	$1{,}3\cdot10^{27}$	$1{,}3\cdot10^{26}$	$6{,}4\cdot10^{26}$	$2{,}6\cdot10^{19}$
Температура плазмы T, кэВ	5	10	10	10
Энергия плазмы W_{pl}, МДж	12*	10*	12*	10,5
Энергия магнитного поля W_M, МДж	12*	10*	12*	–
Энергия лайнера W_L, МДж	32*	27*	32*	–
Термоядерная мощность P_n, МВт	43**	36**	63**	24
Мощность в нейтронах P_n, МВт	34**	29**	50**	24
Коэффициент усиления Q_{pl}	0,77	0,77	1,1	0,38
Выход нейтронов N, 10^{18} нейтр/с	15**	13**	22**	11

* в импульсе; ** среднее значения при частоте следования импульсов 1 Гц

Наиболее критичной частью работы системы на основе МИТС является конечная стадия сжатия, когда необходимы соответствующая изоляция и удержание плазмы, вращательная скорость для гидродинамической устойчивости. Разработанная математическая модель для МИТС с плазменными пушками и лазерными пучками протестирована на задачах, связанных с истечением осесимметричных импульсных струй плазмы, находящихся во внешнем магнитном поле, с учетом широкополосного собственного излучения плазмы. Выполненные расчеты без учета магнитного

поля стационарных струй плазмы показали хорошее соответствие с известными данными. Проведено моделирование воздействия магнитного поля на отдельную плазменную струю, образующуюся при компрессии мишени лазерным лучом, и сделана оценка нелинейной стадии гидродинамических неустойчивостей в мишени инерциального термоядерного синтеза при наличии магнитного поля. Показано, что при сжатии и нагреве плазмы с помощью быстронарастающего внешнего магнитного поля и лазерного излучения возможно подавление РМН.

На Рис. 4 приведены двумерные пространственные распределения температуры, которые позволяют оценить влияние внешнего магнитного поля на структурные элементы одиночной плазменной струи.

На Рис. 4,а видна структура течения одиночной струи (в условиях отсутствия воздействия внешнего магнитного поля). Особенностью структуры струи является течение плазмы в области тройной конфигурации ударной волны (УВ). За центральным диском Маха (в последующие моменты времени) образуется вихревой след (тороидальный вихрь). Этот след вызван тем, что скоростной напор в потоке, претерпевшем 2-х ступенчатое сжатие, во много раз больше скоростного напора за центральным скачком.

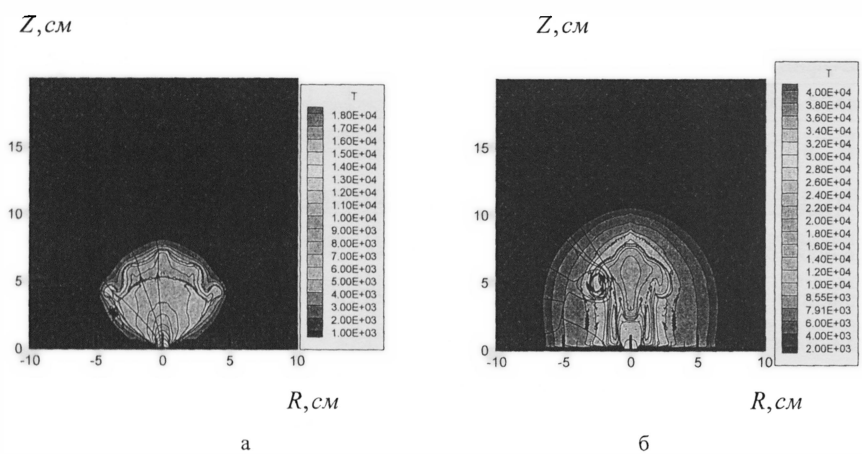


Рис. 4. Пространственное распределение температуры T, К в импульсной струе плазмы без внешнего магнитного поля (а - t = 49,3 мкс) и при наличии внешнего магнитного поля B = 1,58 Тл (б - t = 46,6 мкс)

На Рис. 4,б приведено распределения температуры в плазменной струе при наложении на струю внешнего магнитного поля. В первую очередь воздействие магнитного поля $\vec{B}$ затрагивает высокотемпературную (близкую к оси) часть одиночной струи плазмы и вихревой след (тороидальный вихрь) в области тройной конфигурации УВ. Продольный размер струи и максимальное значение температуры приблизительно в два раза превышает размер струи и температуру без воздействия внешнего магнитного поля (Рис. 4,а).

Разработана математическая модель импульсной плазменной струи, истекающей в затопленное пространство, основанная на уравнениях радиационной плазмодинамики, записанных в произвольных криволинейных координатах. Численно исследованы и изложены результаты анализа простых (уединенных) двумерных возмущений и составленных из них структур, которые соответствуют «нерегулярному режиму» развития неустойчивости Рихтмайера–Мешкова. Описан процесс роста, циркуляции возмущения от времени, характер воздействия на неустойчивости внешнего магнитного поля и предложен упрощенные качественные модели для их объяснения. Представлены результаты расчетов всех основных газодинамических и излучательных параметров одиночной импульсной струи.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель исследования нестационарных процессов нагрева и сжатия вещества, находящегося во внешнем магнитном поле, несколькими лазерными и плазменными пучками. С этой целью разработана группа моделей, учитывающих ключевые эффекты внутреннего термоядерного энерговыделения, кинетики продуктов синтеза и динамики замагниченной плазмы. Предложена новая модель взаимодействия в системе «замагниченная предварительно сформированная плазма–высокоскоростные плазменные струи» и «замагниченная мишень–мощный лазер».

2. Обоснована перспективность направления магнитно-инерциальных термоядерных систем с высокотемпературным нагревом вещества лазерными и плазменными пучками с магнитным удержанием и показана принципиальная возможность использования систем с лазерными и плазменными пучками в качестве термоядерного реактора и источника нейтронов, с оценкой достижимости параметров: температура плазмы $T > 5$ кэВ и коэффициент усиления мощности $Q = P_{fus}/P_{inj} > 3$. По сравнению с известными системами особенностями МИТС являются: меньшие температуры, возможность подавления неустойчивостей и меньшая стоимость установки.

3. Построена иерархия нестационарных математических моделей и разработано прикладное программное обеспечение для проведения вычислительных экспериментов и исследования комплекса радиационно-магнитоплазмодинамических процессов в импульсных магнитно-инерциальных системах. Проведены широкомасштабные вычислительные эксперименты в не исследованном ранее диапазоне мощности и магнитного поля и на основе комплекса методик моделирования плазмы альтернативных термоядерных систем найдены магнитно-инерциальные режимы перспективных установок: термоядерных реакторов с плазменной Ar и Xe оболочкой (Q = 10–20) и нейтронных генераторов (Q = 0.1–0.5) на основе открытой ловушки. Представлено обоснование найденных режимов с учетом технических требований, допускающих создание экономически конкурентоспособных промышленных установок.

4. Разработаны математические модели взаимодействия лазера высокой энергии импульса и импульсной плазменной струи с замагниченной мишенью, основанные на уравнениях радиационной плазмодинамики, записанных в произвольных криволинейных координатах. Показана возможность подавления гидродинамической неустойчивости внешним магнитным полем. Разработанная модель может быть использована для численного эксперимента, для проведения исследований в области физики различных магнитных конфигураций и мощных источников, а также

электромагнитной имплозии мишеней. Данная методика применима для всех вариантов МИТС и любого термоядерного топливного цикла.

5. Разработан комплекс программ для расчета систем МИТС, включающий внутреннее энерговыделение, газодинамику и радиационный транспорт, а также для исследования свойств импульсной плотной плазмы при сжатии мишеней с учетом конвекции, излучения и физико-химических превращений при наличии внешнего магнитного поля. Проведен комплексный анализ по удержанию плазменной конфигурации в затравочном магнитном поле после равномерного обжатия и численный анализ на базе нестационарной двумерной радиационно-магнитогазодинамической модели с учетом электронной теплопроводности и радиационно-конвективного теплообмена.

6. На основе разработанных математических моделей и вычислительного комплекса проведено моделирование и определены параметры магнитно-инерциальных режимов для открытой ловушки: выход нейтронов $\approx 10^{19}$ нейтр/с (D–T-реакция) для плазменного коэффициента усиления $Q_{pl} = 1.1$ и параметров плазмы $T = 10$ кэВ, $n_D = n_T = 6.4 \cdot 10^{26}$ м$^{-3}$. Рассчитаны предельные характеристики для системы «мишень - внутренняя магнитная оболочка - плазменный лайнер» для реактора: коэффициент усиления $Q_{pl} = 24$ и параметр удержания $n\tau \approx 10^{21}$ м$^{-3}$·с при концентрации $n_D = n_T = 8.0 \cdot 10^{27}$ м$^{-3}$ и температуре мишени $T = 20$ кэВ, плотность потока энергии на мишень $J = 2.8 \cdot 10^{18}$ Вт/м^2. Для технологической установки: $Q_{pl} = 1.7$ и $n\tau \approx 10^{20}$ м$^{-3}$·с при $n_{D0} = 7.5 \cdot 10^{23}$ м$^{-3}$ и температуре мишени $T = 10$ кэВ, плотность потока энергии на мишень $J = 5.7 \cdot 10^{18}$ Вт/м^2.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. **Ryzhkov S.V., Khvesyuk V.I., Ivanov A.A. Progress in an alternate confinement system called a FRC // Fusion Science and Technology. 2003. V. 43, No 1T. P. 304-308. (0,5 п.л./0,25 п.л.).**

2. Ryzhkov S.V. Features of formation, confinement and stability of the field reversed configuration // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2002. No 4. P. 73-75.

3. Khvesyuk V.I., Ryzhkov S.V., Kovalev A.V. Particle transport: model of non-stationary fluctuations // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2002. No 5. P. 60-62. (0,5 п.л./0,15 п.л.).

4. Khvesyuk V.I., Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V. Results of numerical modeling of collisionless diffusion induced by electrostatic fluctuations // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2003. No 1. P. 65-67. (0,5 п.л./0,15 п.л.).

5. Ryzhkov S.V. Compact toroid and advanced fuel - together to the Moon?! // Fusion Science and Technology. 2005. V. 47, No 1T. P. 342-344.

6. Ryzhkov S.V. Thermal-physical analysis of low-radioactive thermonuclear plasma in the magnetic fusion device // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2007. No 1. P. 9–11.

7. Ryzhkov S.V. Comparison of a deuterium - helium-3 FRC and mirror trap for plasma confinement // Fusion Science and Technology. 2007. V. 51, No 2T. P. 190–192.

8. Ryzhkov S.V. Helium-3 - based fusion plasma // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2008. No 6. P. 61–63.

9. Ryzhkov S.V. Modeling of plasma physics in the fusion reactor based on a field-reversed configuration // Fusion Science and Technology. 2009. V. 55, No 2T. P. 157–161.

10. Карбушев Д.Н., Рыжков С.В., Тройник М.К. Об улучшенных аналитических зависимостях для скоростей энерговыделения и сечений реакций синтеза // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2009. № 4. Режим доступа: http://technomag.edu.ru/doc/117768.html (дата обращения: 12.10.2012). (0,75 п.л./0,25 п.л.).

11. Рыжков С.В. Современное состояние, проблемы и перспективы термоядерных установок на основе магнитно-инерционного удержания горячей плазмы // Известия РАН. Серия: Физическая. 2014. Т. 78, № 5. С. 647-653.

12. **Рыжков С.В. Моделирование теплофизических процессов в магнитном термоядерном двигателе // Тепловые процессы в технике. 2009. Т. 1, № 9. С. 397–400.**

13. **Рыжков С.В. Обращенная магнитная конфигурация и приложения высокотемпературной плазмы FRC // Прикладная физика. 2010. № 1. С. 47–54.**

14. **Ryzhkov S.V. The behavior of a magnetized plasma under the action of laser with high pulse energy // Problems of Atomic Science and Technology. 2010. No 4. P. 105-110.**

15. **Plasma kinetics models for fusion systems based on the axially-symmetric mirror devices / S.V. Ryzhkov [et al.] // Fusion Science and Technology. 2011. V. 59, No 1T. P. 39-42. (0,5 п.л./0,15 п.л.).**

16. **Костюков И.Ю., Рыжков С.В. Магнитно-инерциальный термоядерный синтез с лазерным обжатием замагниченной сферической мишени // Прикладная физика. 2011. № 1. С. 65–72. (0,75 п.л./0,375 п.л.).**

17. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Developing the numerical model for studying laser-compression of magnetized plasmas // Acta Technica. 2011. V. 56. P. 454-467. (1 п.л./0,5 п.л.).

18. **Термоядерные режимы аксиально-симметричной открытой системы с мощной инжекцией быстрых частиц / С.В. Рыжков [и др.] // Прикладная физика. 2011. № 5. С. 57–63. (0,75 п.л./0,2 п.л.).**

19. **Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V. The plasma jet/laser driven compression of compact plasmoids to fusion conditions // Journal of Fusion Energy. 2012. V. 31, No 1. P. 7-12. (0,5 п.л./0,25 п.л.).**

20. **Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical modeling of magnetized plasma compressed by the laser beams and plasma jets // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics. 2013. No 1. P. 12-14. (0,5 п.л./0,25 п.л.).**

21. **Ryzhkov S.V., Chirkov A.Yu., Ivanov A.A. Analysis of the compression and heating of magnetized plasma targets for magneto-inertial fusion // Fusion Science and Technology. 2013. V. 63, No 1T. P. 135-138. (0,5 п.л./0,25 п.л.).**

22. **Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Evaluation of hydrodynamic instabilities in inertial confinement fusion target in a magnetic field // Problems of Atomic**

Science and Technology. Series: Plasma Electronics and New Methods of Acceleration. 2013. No 4. P. 103-107. (0,5 п.л./0,25 п.л.).

23. Ryzhkov S.V., Anikeev A.V. Improved regimes in high pressure magnetic discharges // 14th International Heat Transfer Conference. Washington, 2010. IHTC14-22212. (0,75 п.л./0,4 п.л.).

24. Ryzhkov S.V. Modeling and engineering applications for weakly turbulent plasma // 35th EPS Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion. Hersonissos, 2008. V. 32D. P-1.114.

25. Ryzhkov S.V. Alternative fusion reactors as commercial power plants // Journal of Plasma and Fusion Research Series. 2009. V. 8. P. 35–38.

26. Рыжков С.В. Исследование физики нелинейных процессов системы «компактный тор» // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т. 9. URL: http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-018.pdf (дата обращения: 12.10.2012).

27. Рыжков С.В., Симонов М.М. Численное моделирование отдельных теплофизических параметров магнитно-инерциальной плазмы // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2011. Т. 11. URL: http://chemphys.edu.ru/media/files/2011-02-01-023_Ryzhkov_Simonov.pdf (дата обращения: 12.10.2012). (0,5 п.л./0,25 п.л.).

28. Рыжков С.В., Рудаков В.А., Чирков А.Ю. Сравнительный анализ энергобаланса D–^{3}He-плазмы в замкнутых термоядерных магнитных ловушках // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2011. Т. 11. URL: http://chemphys.edu.ru/media/files/2011-02-01-024_Chirkov_Rudakov_ Ryzhkov.pdf (дата обращения: 12.10.2012). (0,75 п.л./0,25 п.л.).

29. Кузенов В.В., Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Моделирование процессов в замагниченной плазме при обжатии лазерными пучками и плазменными струями // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Т. 3, вып. 3. URL:http://chemphys.edu.ru/media/files/2012-11-20-007_Kuzenov_Ryzhkov_ Chirkov.pdf (дата обращения: 23.04.2014). (0,75 п.л./0,25 п.л.).

30. Рыжков С.В. Исследование высокотемпературной плотной плазмы магнитно-инерциальных параметров // Вестник РФФИ. 2010. № 1. С. 101-102.

31. Шумаев В.В., Рыжков С.В. Сравнение критериев зажигания D-T мишени в условиях магнитно-инерциального термоядерного синтеза // Молодежный научно-технический вестник. 2012. № 03. URL: http://technomag.edu.ru/doc/429102.html (дата обращения: 12.10.2012). (0,75 п.л./0,35 п.л.).

32. Кузенов В.В., Рыжков С.В. Математическая модель взаимодействия лазерных пучков высокой энергии импульса с плазменной мишенью, находящейся в затравочном магнитном поле. М., 2010. 57 с. (Препринт ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, № 942). (3,5 п.л./1,75 п.л.).

33. Ryzhkov S.V., Kovalev A.V., Khvesyuk V.I. Investigation of diffusion in plasmas with low frequency waves // 29th EPS Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion. Montreux, 2002. V. 26B. P-2.010. (0,5 п.л./0,15 п.л.).

34. Ryzhkov S.V., Khvesyuk V.I. Investigation of non-stationary fluctuations of electric field in inhomogeneous plasma // 30th EPS Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion. St. Petersburg, 2003. V. 27B. P-4.24. (0,5 п.л./0,25 п.л.).

35. Рыжков С.В. Транспортные свойства высокотемпературной плазмы в магнитных системах // VII Международный симпозиум по радиационной плазмодинамике: Сборник научных трудов. М., 2006. С. 190-191.

36. Ryzhkov S.V. Nonlinear process and transport in FRC plasma // Frontiers of Nonlinear Physics: Proceedings of the III International Conference. Nizhny Novgorod, 2007. P. 118-119.

37. Костюков И.Ю., Рыжков С.В. Термоядерный реактор, основанный на принципе синтеза замагниченной мишени // Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии: Труды Всероссийской научно-технической конференции. М., 2009. С. 95–98. (0,75 п.л./0,375 п.л.).

38. Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Радиационно-конвективный теплообмен квазисферической плазмы в магнитном поле встречных кольцевых токов // Труды V Российской национальной конференции по теплообмену. М., 2010. Т. 6. С. 264-267.

39. Ryzhkov S.V., Kostyukov I.Yu. Plasma dynamics in laser-driven magneto-inertial fusion // 6th International Conference on Plasma Physics and Plasma Technology: Contributed Papers. Minsk, 2009. V. I. P. 204-207. (0,5 п.л./0,25 п.л.).

40. Рыжков С.В. Использование FRC как источника энергии для создания реактивной тяги // VIII Международный симпозиум по радиационной плазмодинамике: Сборник научных трудов. М., 2009. С. 262-265.

41. Ромаданов И.В., Рыжков С.В. Моделирование параметров термоядерного ракетного двигателя на основе компактного тора // Королёвские чтения: Труды XXXIV Академических чтений по космонавтике. М., 2010. С. 96-97. (0,2 п.л./0,1 п.л.).

42. Любимова А.М., Рыжков С.В. Влияние высокоскоростных плазменных струй на параметры магнитно-инерциальной мишени // Материалы VIII Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. Алушта, 2010. С. 51-53. (0,2 п.л./0,1 п.л.).

43. Kostyukov I.Yu., Ryzhkov S.V. Laser-driven implosion of magnetized spherical targets for magneto-inertial fusion // Frontiers of Nonlinear Physics: Proceedings of the IV International Conference. Nizhny Novgorod, 2010. P. 369-370. (0,2 п.л./0,1 п.л.).

44. Кузенов В.В., Рыжков С.В. Исследование свойств и структуры группы капиллярных разрядов для корректировочных двигателей и спутников // Королёвские чтения: Материалы XXXV Академических чтений по космонавтике. М., 2011. С. 187-189. (0,2 п.л./0,1 п.л.).

45. Kostyukov I.Yu., Ryzhkov S.V. Megagauss magnetic field generation in laser-driven plasma compression in cusp configuration // Proceedings of the 13th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Suzhou, 2010. P. 601-609. (0,8 п.л./0,4 п.л.).

46. Кузенов В.В., Рыжков С.В. Исследование возможности стабилизации контактной границы в магнитно-инерциальной плазме высокой плотности // Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность: Материалы Международной конференции. М., 2012. С. 119–121. (0,2 п.л./0,1 п.л.).

47. Рыжков С.В., Шумаев В.В. Моделирование условий зажигания замагниченной сферической мишени инерциального синтеза // Материалы IX Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. Алушта, 2012. С. 573-574. (0,2 п.л./0,1 п.л.).

48. Рыжков С.В., Шумаев В.В. Режимы и тепловой баланс плазмы в магнитно-инерциальном термоядерном синтезе // Сборник научных трудов IX Международного симпозиума по радиационной плазмодинамике. М., 2012. С. 242-246. (0,25 п.л./0,15 п.л.).

49. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Hydrodynamic instabilities in interaction of laser radiation with a magnetized target // High-Speed Hydrodynamics: Proceedings of the International Summer Scientific School. Cheboksary, 2013. P. 243-248. (0,5 п.л./0,25 п.л.).

50. Ryzhkov S.V., Kuzenov V.V. Influence of external magnetic field on vortex structures in a model of laser-driven implosion // Frontiers of Nonlinear Physics: Proceedings of the V International Conference. Nizhny Novgorod, 2013. P. 142-143. (0,2 п.л./0,1 п.л.).

51. Кузенов В.В., Рыжков С.В. Анализ действия внешнего магнитного поля на структуру течения вблизи поверхности контактной границы // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 5. URL: http://engjournal.ru/catalog/machin/criogen/719.html (дата обращения: 31.10.2013) (1,2 п.л./0,6 п.л.).

52. Кузенов В.В., Рыжков С.В. Оценка нелинейной стадии гидродинамических неустойчивостей в мишени инерциального термоядерного синтеза при наличии магнитного поля // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 5. URL: http://engjournal.ru/catalog/machin/criogen/729.html (дата обращения: 31.10.2013). (1,1 п.л./0,55 п.л.).

53. Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Выход термоядерной реакции из цилиндрической замагниченной мишени // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 5. URL: http://engjournal.ru/catalog/machin/criogen/720.html (дата обращения: 31.10.2013). (0,75 п.л./0,375 п.л.).

54. **Ryzhkov S.V. Low radioactive and hybrid fusion - a path to clean energy // Sustainable Cities and Society. 2014. V. 14. P. 313-315.**

55. **Кузенов В.В., Рыжков С.В. Радиационно-гидродинамическое моделирование контактной границы плазменной мишени, находящейся во внешнем магнитном поле // Прикладная физика. 2014. № 3. С. 26-30. (0,5 п.л./0,25 п.л.).**

56. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Regimes of Heating and Compression in Magneto-Inertial Fusion // Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference. Kyoto, 2014. IHTC15-9662. (0,75 п.л./0,375 п.л.).

57. **Mozgovoy A.G., Romadanov I.V., Ryzhkov S.V. Formation of a compact toroid for enhanced efficiency // Physics of Plasmas. 2014. V. 21. 022501. (0,6 п.л./0,2 п.л.).**

58. **Romadanov I.V., Ryzhkov S.V. Compact Toroid Challenge experiment with the increasing in the energy input into plasma and the level of trapped magnetic field // Fusion Engineering and Design. 2014. V. 89. P. 3005-3008. (0,6 п.л./0,3 п.л.).**

59. Способ формирования компактного плазмоида: и.п. 2523427 РФ / И.В. Ромаданов, С.В. Рыжков, А.Б. Мозговой. № 2012158031; заявл. 28.12.12; опубл. 20.07.14. Бюл. № 20.

60. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012617551. Компьютерное моделирование теплофизических процессов в замагниченной плазме при обжатии несколькими мощными лазерными пучками / В.В. Кузенов, С.В. Рыжков. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21.08.2012.

61. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616817. Численный расчет теплофизических свойств плазмы термоядерной мишени, сжимаемой высокоскоростными плазменными струями, во внешнем магнитном поле / В.В. Кузенов, С.В. Рыжков. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.07.2013.

62. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617694. Вычислительный комплекс NICA (Nonstationary Instruments and Codes for fusion Applications) - Нестационарные многомерные коды для решения задач магнитно-инерциального термоядерного синтеза / В.В. Кузенов, С.В. Рыжков. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 31.07.2014.

63. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014619893. Численная методика расчета взаимодействия мощных лазерных и плазменных импульсов с конденсированными и газовыми средами / В.В. Кузенов, С.В. Рыжков. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.11.2014.