

На правах рукописи

Кузенов Виктор Витальевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ
РАДИАЦИОННО–МАГНИТОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук



Москва – 2018

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

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
доцент **Рыжков Сергей Витальевич**

Официальные оппоненты: **Змитренко Николай Васильевич**,
доктор физико-математических наук,
федеральное государственное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной математики имени
М.В. Келдыша РАН», заведующий сектором

Бычков Владимир Львович,
доктор физико-математических наук,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова»

Ткаченко Светлана Ивановна,
доктор физико-математических наук,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский физико-
технический институт (государственный
университет)»

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

Защита диссертации состоится « » 2018 года в 11.00 на
заседании диссертационного совета Д 212.141.15 при Московском
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:
Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, зал Ученого совета.

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

Автореферат разослан « _____ » 2018 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Аттетков

Александр Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Широта, многосторонность и новизна круга вопросов, связанных с анализом радиационно–плазмодинамических процессов в импульсных радиационно–магнитогазодинамических (РМГД) системах, требует разработки математических моделей и численных методов повышенной точности. К таким системам могут быть отнесены высокояркостные плазменные источники излучения и генераторы ударных волн (А.Ф. Александров, А.А. Рухадзе, 1974), системы магнитно-инерциального термоядерного синтеза (МИТС) (I.R. Lindemuth, I.R. Kirkpatrick, 1983; A. Hasegawa et al., 1983; С.Ф. Гаранин, 2012; Э.А. Азизов и др., 2001; В.А. Гасилов, С.В. Захаров, В.П. Смирнов, 1991; С.Ю. Гусков, Н.В. Змитренко и др., 2009), плазменные ускорители (Л.Я. Минько, 1970; А.И. Морозов, 2006; А.И. Васин, А.С. Коротеев, А.С. Ловцов и др., 2012), импульсные плазмодинамические системы управления высокоскоростными потоками газа, а также системы плазменно-стимулированного поджига и горения топливных смесей и т.д. Важный вклад в изучение физических процессов, протекающих в импульсных РМГД системах, внесли исследования, выполненные Ю.П. Райзером, Н.В. Змитренко, А.И. Морозовым, А.Ф. Александровым, А.А. Рухадзе, Н.П. Козловым, Ю.С. Протасовым, И.В. Немчиновым, В.Е. Фортовым, В.Б. Розановым, А.М. Андриановым, В.С. Камельковым, И.Б. Тимофеевым, Л.Я. Минько, К.Л. Степановым, С.Т. Суржиковым, Ф.Н. Любченко и др.

Большое многообразие физических процессов, сопровождающих перечисленные явления, и высокая стоимость лабораторных экспериментов делает математическое моделирование привлекательным инструментом для получения количественной информации. Разработанные для РМГД систем математические модели и методы численного расчета могут найти применение для большого количества технических устройств, охватывающих широкий спектр фундаментальных задач, связанных с физикой высоких плотностей энергии: поведением вещества в сверхсильных магнитных полях, высокоскоростного ускорения макротел, разработки сверхмощных источников лазерного и мягкого рентгеновского излучений, взрывных и кумулятивных явлений, процессов при

сверхзвуковых движениях тел в атмосфере, явлений, происходящих при воздействии на вещество мощных потоков энергии и т.д.

Актуальность исследования импульсных РМГД систем вызвана необходимостью изучения закономерностей пространственно-временной эволюции плазменных образований и импульсных струй, взаимодействующих с фоновой средой и внешним магнитным полем. Актуальность представленных задач связана также с практической необходимостью получения горячей (с температурой $T = (2 \div 5) \cdot 10^4$ К), оптически плотной, широкополосно-излучающей плазмы (значения яркостных температур $T_{\text{я}} > 10^4$ К) в значительных объемах и создания так называемых энергоёмких плазменных образований (ЭПО). Заметный теоретический и практический интерес представляет разработка инженерно-технических способов получения распадающихся и долгоживущих ЭПО различных пространственных конфигураций. Проблема изучения закономерностей пространственно-временной эволюции разлетающихся плазменных образований, взаимодействующих с фоновой средой и внешним магнитным полем, возникает при интерпретации результатов астрофизических экспериментов, натурных лабораторных экспериментов с лазерной плазмой и плазмой электрических разрядов. Плазменные вихревые структуры могут быть сформированы на внешней поверхности мишени МИТС, при импульсной инжекции в атмосферный воздух плотных плазменных потоков, создаваемых электроразрядным генератором плазмы на основе импульсного капиллярного разряда или поверхностного разряда. Процессы взаимодействия плазменного образования (ПО) с внешним магнитным полем и с фоновой плазмой приводят к возникновению сложной ударно-волновой картины течения плазмы внутри ПО и на его границе, передаче значительной части энергии фоновой среде и (или) магнитному полю, а также приведению в движение окружающей среды. При этом создаются условия для возникновения широкого спектра плазменных неустойчивостей и развития плазменной турбулентности.

Здесь отметим, что плазменные образования некоторых типов электрических разрядов могут быть использованы для управления потоком разреженного воздуха вблизи элементов конструкций летательных аппаратов. В

этом случае внешнее магнитное поле является управляющим параметром при локальной модификации потока частично ионизованного газа, обтекающего летательный аппарат. При этом вращение вектора индукции магнитного поля относительно вектора скорости набегающего потока плазмы является относительно эффективным способом управления конвективным теплообменом, турбулентным перемешиванием и аэродинамическим качеством. Импульсные РМГД системы (лазерный факел, поверхностный разряд, пучок электронов) могут быть применены для инициирования экстренного поджига топливных смесей в рабочем канале перспективных летательных аппаратов.

Данная диссертационная работа посвящена разработке математических моделей и численных методов повышенной точности для исследования процессов в импульсных радиационно-магнитогазодинамических системах, а также разработке комплекса программ, предназначенных для численного анализа нестационарных магнитно-инерциальных систем.

Объектом исследования в диссертационной работе являются радиационно-плазмодинамические процессы, протекающие в импульсных радиационно-магнитогазодинамических системах.

Цель диссертационной работы – разработка многомерных математических моделей и программного комплекса, предназначенных для исследования физических процессов, протекающих в импульсных радиационно-магнитогазодинамических системах, демонстрация возможностей анализа физической структуры и плазмофизических характеристик различного рода плазменных образований.

Для достижения поставленной цели решались **следующие основные задачи исследования:**

1. Разработка математических моделей, современных методов расчета, способных разрешать неоднородные пространственно временные области и зоны гидродинамических неустойчивостей.
2. Создание вычислительного комплекса и выполнение на его основе анализа радиационно-плазмодинамических процессов в импульсных плазменных образованиях, генерируемых мощными источниками плазмы.

3. Изучение возможности применения плазменных разрядов для воздействия на сверхзвуковой поток газа, экстренного плазменно-стимулированного поджига и горения транс- и сверхзвуковых топливных смесей.

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые результаты:

1. Описаны основные физические механизмы, приводящие к эффекту радиационно–магнитного ослабления интенсивности ударной волны в поверхностном разряде в магнитогазодинамическом режиме.

2. Разработана численная методика построения квазиортогональных структурированных расчетных сеток в областях сложной геометрической формы с кусочно-гладкими границами, которая основана на сформулированной в работе системе эллиптических уравнений и многоблочной технологии расчетов.

3. Предложена нелинейная квазимонотонная компактно-полиномиальная разностная схема повышенного порядка точности, дающая возможность проводить расчет сложных сверхзвуковых течений в импульсных радиационно–магнитогазодинамических системах.

4. Теоретически обоснована возможность применения импульсных плазменных разрядов для инициации поджига и горения топливных смесей в газовых потоках.

Практическая значимость. Разработана нестационарная двумерная радиационно–газодинамическая математическая модель на основе системы уравнений вязкой турбулентной двухтемпературной радиационной плазмодинамики, учитывающая физико-химические процессы превращения веществ и поглощение лазерного излучения. С помощью данной модели показана возможность применения лазерного воздействия для инициации экстренного поджига и горения топливных смесей в газовых потоках в рабочем канале перспективных летательных аппаратов. Осуществлена программная реализация математической модели сжатия высокотемпературной многокомпонентной плотной плазмы и магнитного поля внутри неё, продемонстрировано многократное усиление внешнего магнитного поля в

мишени МИТС. Исследованный в работе эффект радиационно-магнитогазодинамического ослабления ударной волны может быть применен при разработки методов управления параметрами сильных ударных волн.

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, № 2013661151 от 29.11.2013 г., № 2016614540 от 26.04.2016 г. и № 2018614712 от 13.04.2018 г.). Получен и зарегистрирован патент на изобретение № 2604975 РФ.

Методы исследования. Метод исследования основывается на валидированных и верифицированных математических моделях импульсных РМГД систем. Для решения уравнений математических моделей импульсных РМГД систем применяется квазимонотонный компактно-полиномиальный метод повышенного порядка точности по пространству и времени, в котором порядок точности по пространству достигается применением специально разработанной процедуры восстановления, а порядок точности по времени с помощью многошагового метода Рунге-Кутта.

Положения, выносимые на защиту:

1. Нестационарная многомерная математическая модель радиационно-плазмодинамических процессов в импульсных радиационно-магнитогазодинамических системах, которая основывается на уравнениях Рейнольдса и учитывает физико-химические процессы превращения веществ.
2. Математическое моделирование плазмодинамики лазерного, капиллярного и линейно-стабилизированного поверхностного разрядов в плотных газах в различных энергомощностных режимах.
3. Методика численного моделирования импульсных радиационно-магнитогазодинамических систем, базирующуюся на квазимонотонной компактно-полиномиальной разностной схеме повышенного порядка точности.
4. Исследование особенностей плазмодинамического способа экстренного зажигания горючих смесей в сложных транс и сверхзвуковых течениях газа.

5. Программный комплекс PLUM (Plasma jets and Laser driven Universal Model), работа которого основана на решении многогруппового диффузационного приближения уравнения переноса излучения, уравнений Рейнольдса и Максвелла.

Достоверность изложенных в диссертации основных положений подтверждена теоретическим обоснованием используемых математических моделей, сравнением результатов с аналитическими решениями, экспериментальными результатами, предложенными для верификации моделей импульсных РМГД систем, и расчетными результатами других авторов.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы были доложены и получили положительную оценку на научно-технических семинарах и заседаниях кафедры теплофизики МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2017, 2018). Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены в докладах на следующих конференциях и симпозиумах: XXIX - XLIII Международной конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2002-2016; симпозиуме по физике и технологиям плазмы (24th SPPPT), Прага, 2010; Всероссийской школе-семинаре «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем» (АФМ), Москва, 2007-2016; Академических чтениях по космонавтике «Королевские чтения», Москва, 2003-2015; VI-IX Международном симпозиуме по радиационной плазмодинамике (РПД), Звенигород, 2003, 2006, 2009, 2012; VIII Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2010), Алушта, 2010; Научных семинарах МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГУ им. М.В. Ломоносова, ИПМех РАН, ИДГ РАН, ОИВТ РАН и др.

Основные результаты работы получены при выполнении проектов РФФИ (РФФИ № 16-01-00379, РФФИ № 04-01-00237, РФФИ № 07-01-00133, РФФИ № 02-01-00917), INTAS project №03-51-5204, ISTC project No. 3358p, в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН и программ фундаментальных исследований отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления (ОЭММПУ) РАН, а также по грантам РФФИ (№ 02-01-00917, № 04-01-00237, № 07-01-00133 и № 16-01-00379) и программам Министерства образования и науки РФ (госконтракт №

14.516.11.0083 ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы», государственные задания Минобрнауки России № 13.79.2014/К и № 13.5240.2017/БЧ).

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 65 научных работах, в том числе в 1 монографии, в 1 патенте на изобретение, в 32 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. Эти исследования включают физическую и математическую постановку задач, разработку моделей, применение вычислительных методов, создание программных комплексов, расчеты и анализ результатов. 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, выводов и списка литературы. Работа изложена на 372 страницах, содержит 156 рисунков и 8 таблиц. Библиография включает 199 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается современное состояние исследований, выполнен обзор проблем импульсных РМГД систем, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, положения, выносимые на защиту, конкретизированы методы исследований, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, их достоверность, приводятся сведения об апробации работы, а также приведены данные о структуре и объеме диссертационной работы.

Первая глава посвящена разработке математических моделей радиационно-магнитоплазмодинамических (РМПД) процессов в импульсных

радиационно–магнитогазодинамических системах. Сформулирована обобщенная квазидномерная математическая модель, используемая при описании интегральных и локальных характеристик в импульсных РМГД (в том числе процессов сжатия и горения термоядерных мишеней МИТС в центрально-симметричной системе координат) системах. Для данной математической модели сформулирована численная методика и разработан программный комплекс. Созданный программный комплекс обеспечивает возможность численного исследования широкого круга РПД- и РМПД-задач.

Математическая модель основана на одномерных одножидкостных, двухтемпературных уравнениях магнитно–радиационной газовой динамики. В них учитываются методы расчета уравнений состояний вещества и коэффициентов поглощения лазерного излучения, определяются условия возникновения и протекания самоподдерживающейся термоядерной реакции синтеза. При этом электромагнитные процессы описываются системой уравнений Maxwella и Ома с конечной проводимостью плазмы. Перенос широкополосного излучения рассматривается в рамках многогруппового диффузационного приближения. Несмотря на одномерный характер задачи, она предъявляет повышенные требования к численному методу, используемому при её решении.

Математическая формулировка обобщенной квазидномерной математической модели имеет «смешанный» тип и содержит «гиперболическую» и «параболическую» части. Решение «гиперболической» части системы уравнений использует дивергентную форму обобщенной квазидномерной математической модели:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} = L(U), \quad L = -\frac{\partial F(\vec{U})}{\partial \xi} + \vec{F}_2,$$

$$F_\rho = -\rho u \frac{(\nu - 1)}{r}, \quad F_{\rho u} = -\rho u^2 \frac{(\nu - 1)}{r}, \quad F_E = -(\rho Eu + P^\Sigma u) \frac{(\nu - 1)}{r},$$

где параметр ξ может принимать одно из значений набора величин (r, z) , вектор решения имеет вид $\vec{U} = (\rho, \rho u_\xi, \rho E)^T$, вектор потоковой переменной записывается в виде $F(\vec{U}) = (\rho u_\xi, \rho u_\xi^2 + P, \rho Eu_\xi + P u_\xi)^T$, а вектор правой части

представляется следующим образом $\vec{F}_2 = (\vec{F}_\rho, \vec{F}_{\rho u}, \vec{F}_E)^T$, $v=0$ – плоский слой, $v=1$ – бесконечный одномерный цилиндр.

Отметим, что «гиперболическая» часть системы уравнений относительно временной переменной t представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, которые могут быть разрешены с помощью векторного варианта многошагового метода Рунге-Кутта (К.Н. Волков, В.Н. Емельянов, 2008).

Для «гиперболической» (конвективный теплоперенос) части системы уравнений применяется разработанная в работе нелинейная квазимонотонная компактно-полиномиальная разностная схема повышенного порядка точности:

$$\frac{\partial \vec{U}_i}{\partial t} + \frac{F(\vec{U}_{i+1/2}) - F(\vec{U}_{i-1/2})}{\Delta_\xi} = \vec{F}_2, \quad \Delta_\xi = [\xi_{i-1/2} - \xi_i, \xi_{i+1/2} - \xi_i].$$

Газодинамические параметры U_i^{n+1}, U_i^n относятся к центрам расчетных ячеек, в то время как потоки $F_{i\pm1/2}^n$ необходимо определить на поверхности этих ячеек. При этом для повышения порядка аппроксимации разностной схемы следует «восстановить» газодинамические параметры $Y_{i\pm1/2}^{R,L}$ «справа» (индекс – R) и «слева» (индекс – L) от границ расчетных ячеек. Реконструируемая функция $Y(\xi)$, $\xi \in \left[-\frac{\Delta_\xi}{2}, \frac{\Delta_\xi}{2}\right]$, может быть представлена в виде i -ого полинома 7-ой степени (в этом случае используется нелинейная квазимонотонная компактно-полиномиальная разностная схема повышенного порядка точности):

$$Y(\xi) = F_i^n(\xi) = Y_i + \phi(Y_i) \left(\frac{\partial Y}{\partial \xi} \right)_i [\xi - \xi_i] + \frac{\phi(Y_i)}{2!} \left(\frac{\partial^2 Y}{\partial \xi^2} \right)_i [\xi - \xi_i]^2 + \\ + a_i [\xi - \xi_i]^3 + b_i [\xi - \xi_i]^4 + c_i [\xi - \xi_i]^5 + d_i [\xi - \xi_i]^6 + e_i [\xi - \xi_i]^7 = Y_i + \delta Y,$$

где функция $\phi(Y)$ является функцией–лимитером (В.В. Кузенов, С.В. Рыжков, 2017). Функция $Y(x)$ удовлетворяет условиям гладкого сопряжения и условию консервативности:

$$F_i^n(\xi_{i-1}) = Y_{i-1}^n, \quad F_i^n(\xi_{i+1}) = Y_{i+1}^n, \quad \frac{dF_i^n(\xi_{i-1})}{d\xi} = Y_{\xi,i-1}^n, \quad \frac{dF_i^n(\xi_{i+1})}{d\xi} = Y_{\xi,i+1}^n,$$

$$\frac{1}{\Delta_\xi} \int_{-\frac{\Delta_\xi}{2}}^{+\frac{\Delta_\xi}{2}} Y_i^n(\xi) d\xi = Y(\xi_i).$$

Указанные выше условия гладкого сопряжения можно сформулировать в виде системы линейных алгебраических уравнений:

$$\vec{AZ}_i = \vec{F}_i, \quad \vec{Z}_i = (a_i, b_i, c_i, d_i, e_i)^T, \quad \vec{F}_i = (F_1, F_2, F_3, F_4, F_5)^T,$$

$$A = \begin{pmatrix} -\Delta_\xi^3 & \Delta_\xi^4 & -\Delta_\xi^5 & \Delta_\xi^6 & -\Delta_\xi^7 \\ 3\Delta_\xi^2 & -4\Delta_\xi^3 & 5\Delta_\xi^4 & -6\Delta_\xi^5 & 7\Delta_\xi^6 \\ \Delta_\xi^3 & \Delta_\xi^4 & \Delta_\xi^5 & \Delta_\xi^6 & \Delta_\xi^7 \\ 3\Delta_\xi^2 & 4\Delta_\xi^3 & 5\Delta_\xi^4 & 6\Delta_\xi^5 & 7\Delta_\xi^6 \\ 0 & \frac{1}{5} \left(\frac{\Delta_\xi}{2} \right)^4 & 0 & \frac{1}{7} \left(\frac{\Delta_\xi}{2} \right)^6 & 0 \end{pmatrix},$$

$$F_1 = Y_{i-1}^n - Y_i + \phi(Y_i) \left(\frac{\partial Y}{\partial \xi} \right)_i \Delta_\xi - \frac{\phi(Y_i)}{2!} \left(\frac{\partial^2 Y}{\partial \xi^2} \right)_i \Delta_\xi^2,$$

$$F_2 = Y_{\xi,i-1}^n - \phi(Y_i) \left(\frac{\partial Y}{\partial \xi} \right)_i + \phi(Y_i) \left(\frac{\partial^2 Y}{\partial \xi^2} \right)_i \Delta_\xi,$$

$$F_3 = Y_{i+1}^n - Y_i - \phi(Y_i) \left(\frac{\partial Y}{\partial \xi} \right)_i \Delta_\xi - \frac{\phi(Y_i)}{2!} \left(\frac{\partial^2 Y}{\partial \xi^2} \right)_i \Delta_\xi^2,$$

$$F_4 = Y_{\xi,i+1}^n - \phi(Y_i) \left(\frac{\partial Y}{\partial \xi} \right)_i - \phi(Y_i) \left(\frac{\partial^2 Y}{\partial \xi^2} \right)_i \Delta_\xi, \quad F_5 = -\frac{\phi(Y_i)}{3!} \left(\frac{\partial^2 Y}{\partial \xi^2} \right)_i \left[\frac{\Delta_\xi}{2} \right]^2.$$

Входящие в кусочно–полиномиальные распределения $Y(\xi)$

пространственные производные $\left(\frac{\partial Y}{\partial \xi} \right)_{i,j}$, вычисляются следующим образом.

Для дискретной функции Y_i определим приближенное значение F_i первой частной производной по пространственной переменной ξ с восьмым порядком точности (А.Д. Савельев, 2007). Для этого в каждой ячейке с номером i для каждой восстанавливаемой величины $Y_{i,j}$ осуществляется расчет индекса немонотонности $Ind(Y)$:

$$Ind(Y)_i = \frac{\frac{1}{12} \left| -Y_{i+2,j} + 16Y_{i+1,j} - 30Y_{i,j} + 16Y_{i-1,j} - Y_{i-2,j} \right|}{\left(\frac{1}{2} \left| -Y_{i+2,j} + 4Y_{i+1,j} - 3Y_{i,j} \right| + \frac{1}{2} \left| 3Y_{i,j} - 4Y_{i-1,j} + Y_{i-2,j} \right| + \theta \right)},$$

где величина θ является малым параметром. Затем найдем первую производную f по переменной ξ по обычной аппроксимационной формуле второго порядка точности и произведем её «монотонное ограничение» на сетке:

$$\begin{aligned} \overline{Ind}(Y)_i &= 1 \cdot Ind(Y)_i + 2 \cdot [1 - Ind(Y)_i], \quad f_i = \frac{Y_{i+1} - Y_{i-1}}{2\Delta_\xi} + O(\Delta_\xi^2), \\ \tilde{f}_i &= sign(Y_{i+1} - Y_{i-1}) \\ \cdot \min \left(\overline{Ind}(Y)_{i+2} |f_{i+2}|, \overline{Ind}(Y)_{i+1} |f_{i+1}|, |f_i|, \overline{Ind}(Y)_{i-1} |f_{i-1}|, \overline{Ind}(Y)_{i-2} |f_{i-2}| \right), \end{aligned}$$

где Δ – шаг пространственной сетки в направлении ξ . Тогда приближенное «монотонизированное» значение \tilde{F}_i первой частной производной по пространственным переменным ξ с ошибкой аппроксимации $O(\Delta_\xi^6)$ можно найти путем решения системы уравнений с трехдиагональной матрицей:

$$\begin{aligned} F_i &= \left\{ \left(E + \frac{\Delta_2}{6} \right)^{-1} Q_i \right\}_i, \quad Q_i = \left(E + \frac{\Delta_2}{30} \right) \tilde{f}_i \\ F_i &= sign(Y_{i+1} - Y_{i-1}), \\ \cdot \min \left(\overline{Ind}(Y)_{i+2} |\tilde{F}_{i+2}|, \overline{Ind}(Y)_{i+1} |\tilde{F}_{i+1}|, |\tilde{F}_i|, \overline{Ind}(Y)_{i-1} |\tilde{F}_{i-1}|, \overline{Ind}(Y)_{i-2} |\tilde{F}_{i-2}| \right), \end{aligned}$$

где $\Delta_0 f_i = f_{i+1} - f_{i-1}$, $\Delta_2 f_i = f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}$, E – единичный оператор.

Этот способ расчета первой производной F_i используется при формировании краевых условий в случае нахождения приближенного «монотонизированного» значения \tilde{F}_i первой частной производной по пространственной переменной ξ с ошибкой аппроксимации $O(\Delta_\xi^8)$. В этом случае вычисления следует проводить на основе решения системы уравнений с пятидиагональной матрицей (А.Д. Савельев, 2007):

$$F_i = \left\{ \left(E + \frac{2\Delta_2}{7} + \frac{\Delta_2^2}{70} \right)^{-1} Q_i \right\}_i, \quad Q_i = \left(E + \frac{5\Delta_2}{42} \right) \tilde{f}_i.$$

Пространственные производные второго порядка определяются по формулам работ (А.Д. Савельев, 2007; Л.Е. Довгилович, И.Л. Софонов, 2008). С помощью реконструируемой функции $Y(\xi)$ «восстанавливаются» газодинамические параметры $Y_{i\pm 1/2}^{R,L}$ «справа» (индекс $-R$) и «слева» (индекс $-L$) от границ расчетных ячеек. Затем проводится «антидиффузионная» коррекция «восстанавливаемых» параметров $Y(\xi)$ на краях ячейки $Y_{i\pm 1/2}^{R,L}$ (Z. Xu, C.-W. Shu, 2006). Для того, чтобы уменьшить амплитуду «паразитических» осцилляций численного решения в окрестности разрывов исходной функции, её можно разложить в ряд Лагранжа-Бюргмана (Е.В. Ворожцов, 2011) по степеням некоторой монотонной функции. Например, по функции $f(\xi)$:

$$f(\xi) = \Delta_\xi \operatorname{th}\left(\frac{\beta}{\Delta_\xi}(\xi - \xi_i)\right), \quad \beta = 4 \cdot \operatorname{Ind}(Y) + 6 \cdot (1 - \operatorname{Ind}(Y)), \quad \left(\frac{\partial f}{\partial \xi}\right)_i \neq 0.$$

Тогда для реконструируемой функции $Y(\xi)$ вблизи сильных разрывов условия сопряжения и консервативности можно записать в виде системы (аналогичной выше сформулированной) линейных алгебраических уравнений (В.В. Кузенов, С.В. Рыжков, 2017). Предложенная разностная схема является развитием WENO (weighted essentially non-oscillatory) схемы (G.-S. Jiang, C.-W. Shu, 1996; C.-W. Shu, 1999; C.-W. Shu, S. Osher, 1988). Остальные подробности нелинейной квазимонотонной компактно-полиномиальной разностной схемы приведены в тексте диссертации.

С помощью разработанного программного комплекса определены интегральные и локальные характеристики некоторых импульсных РМГД систем.

Изучены особенности формирования УФ-спектра излучения в «поверхностном» (ПР) и «свободном» (СР) разрядах. Проведен подробный анализ механизмов формирования наблюдаемых спектров излучения и установлены связи их поведения с особенностями возникающих структур и параметров плазмы ПР и СР.

Установлено, что основным параметром, определяющим излучательные и плазмодинамические характеристики разрядов, является средняя удельная (на 12

единицу длины L) электрическая мощность $P_{ЭЛ} = W_1/Lt_1$ (при фиксированной ширине электродов). В зависимости от $P_{ЭЛ}$ возможно осуществление разрядов в трех различных режимах. При $P_{ЭЛ} \leq P_{КР1} \approx (30 \div 40)$ МВт/см реализуется «взрывной» режим. При $P_{ЭЛ} \in (P_{КР1}, P_{КР2})$ наступает магнитогазодинамический (МГД) режим. При $P_{ЭЛ} \geq P_{КР2}$ реализуется квазипинчевой режим (КПР), для которого характерно существование высокотемпературного ($T \approx 8 \cdot 10^4$ К) плотного ((2÷5) ρ_0) магнитосжатого ($P_\Gamma \sim P_M$) плазменного образования - «ядра», отделенного от невозмущенного газа буферной областью и областью радиационно – магнитогазодинамической волны «разрежения», в которых плотность меньше плотности невозмущенного газа и скорость, направленная к «плазменному» ядру. Данные результаты расчетов соответствуют экспериментам (О.А. Омаров, Ш.Ш. Эльдаров, И.В. Якубов, 1993).

Выполнены расчеты всех основных газодинамических и излучательных параметров лазерной плазмы мишени МИТС. Можно отметить, что плазма мишени МИТС является мощным источником увеличивающегося во времени магнитного потока и широкополосного излучения. Все сказанное позволяет надеяться, что подход, основанный на МИТС, годится для создания новых плазменных источников интенсивного широкополосного излучения и потоков частиц высокой плотности, применения их в материаловедческих экспериментах и в перспективных направлениях энергетики.

Предложена, математическая модель, учитывающая ускорение макрочастиц (диэлектрических или металлических) за счет действия силы отдачи паров материала при лазерном облучении поверхности частицы.

Во второй главе приводится математическая модель, которая основана на радиационных, многокомпонентных осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса в одножидкостном двухтемпературном приближении и турбулентности плазмы (в q -в приближении). Электромагнитные процессы описываются системой уравнений Максвелла и Ома в плазме с конечной проводимостью. Перенос излучения рассматривается в рамках многогруппового диффузационного приближения. Коэффициент поглощения лазерного излучения задается с использованием механизма континуального поглощения, обратного механизму тормозного излучения. Транспортные

коэффициенты, входящие в данную систему уравнений, учитывают замагниченность лазерной плазмы. Разработанная модель является развитием математических моделей (К.В. Брушлинский, А.И. Морозов, 1974; Ю.А. Алексеев, М.Н. Казеев, 1981; С.И. Ананин, 1989; А.А. Самарский, И.В. Арделян, Ю.С. Протасов, С.Н. Чувашев, 1991, Ю.М. Гришин, 2001 и др.). Численная реализация плазмодинамической модели основана на многоблочной многосеточной технологии расчетов на неортогональных структурированных сетках с использованием схем расщепления по физическим процессам и направлениям. Разработан и описан численный метод решения уравнений систем РМГД, который реализован в виде программного комплекса PLUM (Plasma jets and Laser driven Universal Model).

Сформулирована система эллиптических уравнений, которая позволяет найти отображения расчетной криволинейной области в параметрический квадрат в двумерном случае или параллелепипед в трехмерном случае:

$$\begin{aligned}
& \lambda_x \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{(1-\sigma)}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left(F \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) + \frac{(1-\sigma)}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left(F \frac{\partial U_x}{\partial z} \right) + \\
& + \frac{(1+\sigma)}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) \right\} + \\
& + k_{opt} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\sqrt{\frac{g_{22}g_{33}}{g_{11}}} \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sqrt{\frac{g_{33}g_{11}}{g_{22}}} \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sqrt{\frac{g_{11}g_{22}}{g_{33}}} \frac{\partial U_x}{\partial z} \right) \right\} = 0, \\
& \lambda_y \frac{\partial}{\partial y} \left(F \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) + \frac{(1-\sigma)}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{(1-\sigma)}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left(F \frac{\partial U_y}{\partial z} \right) + \\
& + \frac{(1+\sigma)}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left(F \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(F \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) \right\} + \\
& + k_{opt} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\sqrt{\frac{g_{22}g_{33}}{g_{11}}} \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sqrt{\frac{g_{33}g_{11}}{g_{22}}} \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sqrt{\frac{g_{11}g_{22}}{g_{33}}} \frac{\partial U_y}{\partial z} \right) \right\} = 0,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \lambda_z \frac{\partial}{\partial z} \left(F \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) + \frac{(1-\sigma)}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial U_z}{\partial x} \right) + \frac{(1-\sigma)}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left(F \frac{\partial U_z}{\partial y} \right) + \\
& + \frac{(1+\sigma)}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(F \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(F \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) \right\} + \\
& + k_{opt} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\sqrt{\frac{g_{22} g_{33}}{g_{11}}} \frac{\partial U_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sqrt{\frac{g_{33} g_{11}}{g_{22}}} \frac{\partial U_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sqrt{\frac{g_{11} g_{22}}{g_{33}}} \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) \right\} = 0.
\end{aligned}$$

Здесь принято, что все коэффициенты, входящие в данную систему уравнений, равны между собой $F = (\nabla f, \nabla f)^{\alpha/2} + \varepsilon$, $i \in \{x, y, z\}$, через \vec{r} обозначен радиус – вектор в системе координат XYZ . При этом \vec{r} и \vec{r}^* радиус – векторы точек областей до \vec{r} и после \vec{r}^* преобразования, вектор $\vec{U} = \vec{r}^* - \vec{r}$, характеризующий смещение точек расчетной сетки.

Компоненты ковариантного метрического тензора, входящие в систему уравнений, определяются соотношениями:

$$g_{ik} = \sum_{\alpha=1}^3 \frac{\partial r'^{\alpha}}{\partial q^i} \frac{\partial r'^{\alpha}}{\partial q^k}, \quad g^{kj} = \delta_i^j = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}, \quad q^1 = x, q^2 = y, q^3 = z.$$

При этом f является функцией, управляющей адаптацией расчетных узлов, коэффициент α задает необходимую степень сгущения узлов расчетной сетки. Коэффициент $\sigma \in [-1, 1]$ характеризует отношение поперечной деформации к продольной деформации. Коэффициент $\lambda_i > 0$ увеличивает «диффузию» сеточных линий от границы внутрь расчетной области, обеспечивая нахождение узлов сетки внутри расчетной зоны. Параметр ε выбирается порядка шага сетки h , чтобы избежать особенности в тех узлах, где $\nabla f = 0$. Если использовать многоблочную технологию построения расчетной сетки, то с помощью выше изложенной численной методики можно построить квазиортогональные структурированные сетки в областях сложной геометрической формы.

Проведены тестовые (модельные) расчеты с помощью предложенной численной методики. Сравнение численного и модельного решений проводилось на основе анализа ошибок решений в нормах различного вида.

В третьей главе представлена математическая модель приповерхностного лазерного факела, основанная на уравнениях радиационной плазмодинамики, записанных в произвольных криволинейных координатах. На основе данной математической модели выполнено исследование плазмогазодинамических процессов в приповерхностном лазерном факеле, на границе твердое тело – окружающий газ и внутри металлической преграды. В разработанной модели плазмодинамические процессы в лазерном факеле определяются интенсивностью, длительностью и диапазоном спектра лазерного излучения, материалом металлической преграды, термодинамическими параметрами окружающей газовой среды. Исходными данными для моделирования лазерного факела являются: энергия и длительность лазерного излучения, давление в окружающей среде, теплофизические параметры материала преграды. Численная реализация математической модели приповерхностного лазерного факела выполнена с применением многоблочной многосеточной технологии расчетов на неортогональных структурированных сетках и с использованием схем расщепления по физическим процессам и направлениям. Решение расщепленных уравнений Рейнольдса находится с помощью разработанного в диссертационной работе варианта квазимонотонного компактно-полиномиального метода повышенного порядка аппроксимации.

Получены численные решения, описывающие структуру приповерхностной лазерной плазмы. Выполнены расчеты всех основных газодинамических и излучательных параметров лазерного факела и металлической преграды. Проведен анализ закономерностей образования и разлета плазменного образования. Рассчитанная и приведенная в работе функциональная зависимость магнитного давления $P_m(t)$, которая создается спонтанными магнитными полями, имеет несколько максимумов.

Изучена возможность применения плазменного лазерного факела для плазменно-стимулированного поджига и горения сверхзвуковых топливных смесей на примере ГЛА НЕГ (J. Steelant, A. Mack, K. Hannemann, A. Gardner, 2002).

Из расчетов газодинамических параметров потока в канале ГПВРД ГЛА НЕГ (J. Steelant, A. Mack, K. Hannemann, A. Gardner, 2002) следует, что

газодинамические параметры воздуха, сжатого в воздухозаборнике и натекающего на область инжеクции топлива в ГПВРД ГЛА НЕГ, имеют следующий диапазон значений: $P = 1\div2$ атм, $T = 0,3\div1$ кК, число Maxa $M = 2$.

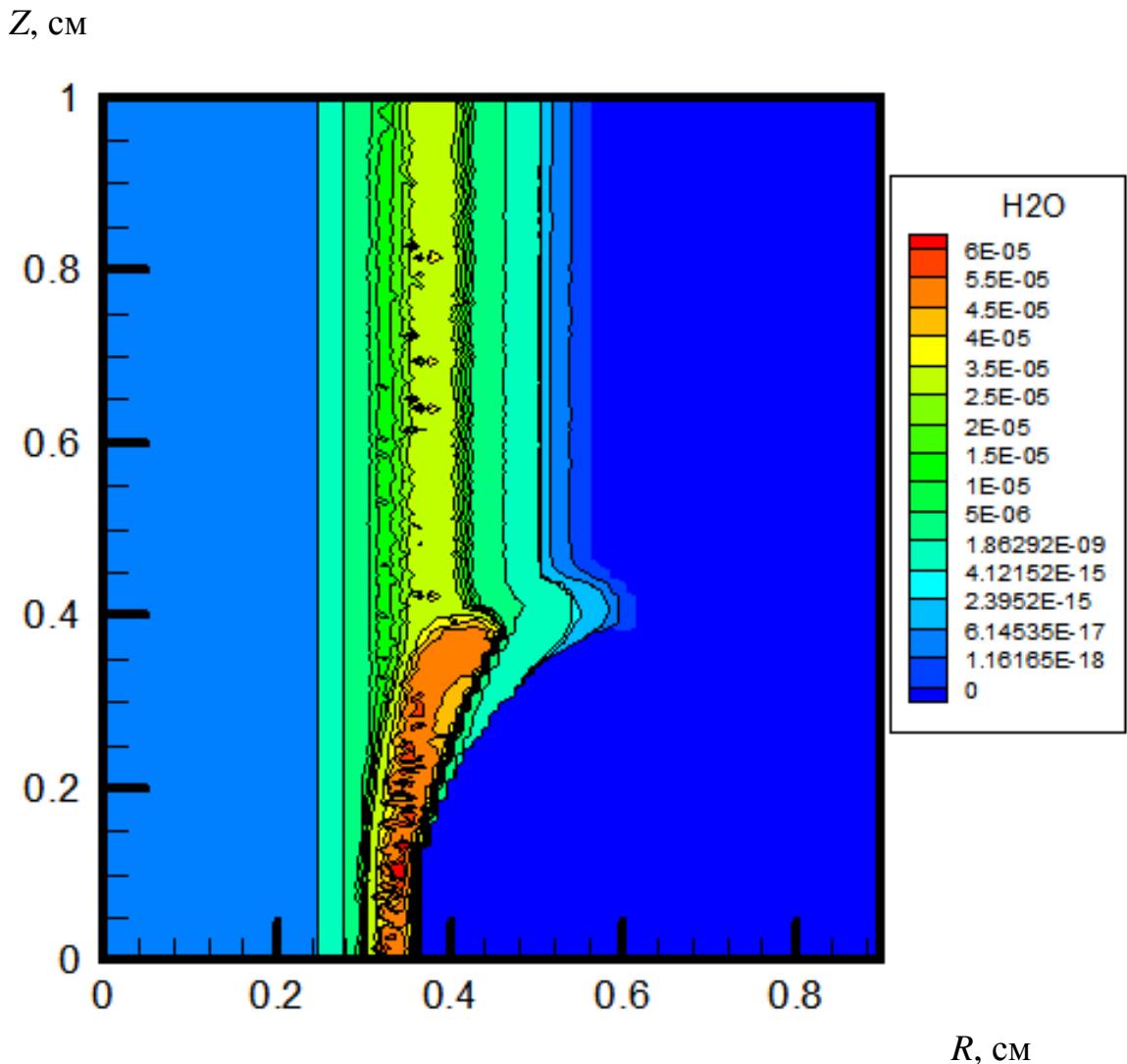


Рис. 1. Структура поля температуры и молярной концентрации H_2O лазерного факела и поля горения кислородно-водородная смеси при лазерном воздействии на момент времени $t = 4,18$ мкс. Параметры лазерного воздействия $t_{\text{лаз}} = 50$ мкс, $q_{\text{лаз}} = 2 \times 10^7 \text{ Вт/см}^2$

Из Рис. 1 и результатов расчетов в неподвижной среде следует, что при учете натекания внешнего газового потока на лазерный факел в области взаимодействия давление увеличивается в четыре раза, а молярная концентрация H_2O возрастает примерно в 20 раз по сравнению с неподвижной газовой средой.

Проведены вычислительные эксперименты по воздействию высокоэнергетических пучков электронов на топливно-воздушную смесь. Эти исследования показали, что генерация радикалов в конверсированном топливе и в гремучем газе ускоряет возгорание за счёт существенного сокращения времени, занимаемого так называемой стадией индукции. Пучки электронов могут применяться совместно с устройствами поджига, например, на основе импульсных высокотемпературных струй лазерных факелов.

В четвертой главе проведено численное исследование плазмы сильноточного поверхностного разряда с помощью разработанной в диссертационной работе многомерной математической модели, которая основана на радиационных, многокомпонентных уравнениях Рейнольдса в одножидкостном, двухтемпературном приближении с учетом турбулентности плазмы (в q -о приближении). Это математическое моделирование отражает основные физические особенности линейно-стабилизированного поверхностного разряда (ЛСПР), осуществляемого в условиях ограничения расширения плазменного образования газовой средой, магнитным полем и твердой поверхностью межэлектродной вставки. Рассмотрены режимы «взрывного», магнитогазодинамического и «квазипинчевого» разлета плазмы и особенности спектрально-яркостных характеристик импульсных сильноточных разрядов в газах атмосферного давления. Получены данные о пространственно-временной динамике и параметрах светоэрзационных паров межэлектродной вставки ЛСПР. Проведена верификация результатов выполненных расчетов путем сопоставления их с известными экспериментальными данными. Отмечено их удовлетворительное соответствие.

Изучены особенности формирования УФ-спектра излучения. Установлено, что интенсивность УФ излучения, генерируемого слоем пара материала межэлектродной диэлектрической вставки в общем световом потоке, выходящем с ударно - волновой границы разряда, максимальна во «взрывном» режиме.

С помощью разработанной математической модели были проведены расчеты удельной (на единицу длины межэлектродного зазора L) силы

$$F(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[P - \left\{ P_o + \frac{\rho_o V_o^2}{2} \right\} \right] dy \quad \text{и коэффициента импульса отдачи}$$

$$J = \int_o^t F(t) dt / (W_o / L), \text{ передаваемого диэлектрической межэлектродной вставке}$$

плазмой факела ЛСПР. Расчеты осуществлены для разрядов в воздушной газовой среде. Рассматривались следующие значения величин электротехнических параметров ЛСПР: $L = 25 - 100$ см, $W_o = 1 - 5$ кДж, $C_o = 100 - 400$ мкФ, $P_{элL} = P_{эл}/L = 1 - 400$ МВт/см. При этом производилось варьирование высоты $h = 0 - 25$ км нахождения ЛСПР относительно поверхности Земли. Некоторые результаты этих расчетов представлены на Рис. 2 и Рис. 3 и приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Расчетные значения коэффициента импульса отдачи
к полной энергии J , кН/МВт, $U_o = 5$ кВ

C_o , мкФ	$h = 0$ км		$h = 6$ км		$h = 25$ км	
	L=0.25 м	L=1 м	L=0.25 м	L=1 м	L=0.25 м	L=1 м
100	0.825	2.97	0.59	2.6	0.34	1.7
200	0.46	1.6	0.4	1.46	0.4	0.8
300	0.37	1.24	0.29	0.42	0.28	0.57
400	0.31	1	0.23	0.823	0.21	0.437

Полученные расчетным путем данные об импульсе отдачи J , передаваемом диэлектрической межэлектродной вставке плазмой факела ЛСПР, позволяют отметить, что наиболее выгодным вариантом ЛСПР, с точки зрения максимизации импульса отдачи J , является разряд с длиной межэлектродной вставки, равной 1 м. С увеличением расстояния h от поверхности Земли импульс отдачи J уменьшается (в некоторых вариантах в два раза, Таблица 1).

Графические зависимости Рис. 2 демонстрирует немонотонный характер кривой (2) поведения импульса отдачи J с течением времени t . Учитывая ход кривой (2) импульса отдачи J , которая приведена на Рис. 3, можно

предположить, что немонотонность кривой 2 (Рис. 2) вызвана влиянием давления окружающей газовой среды P_o .

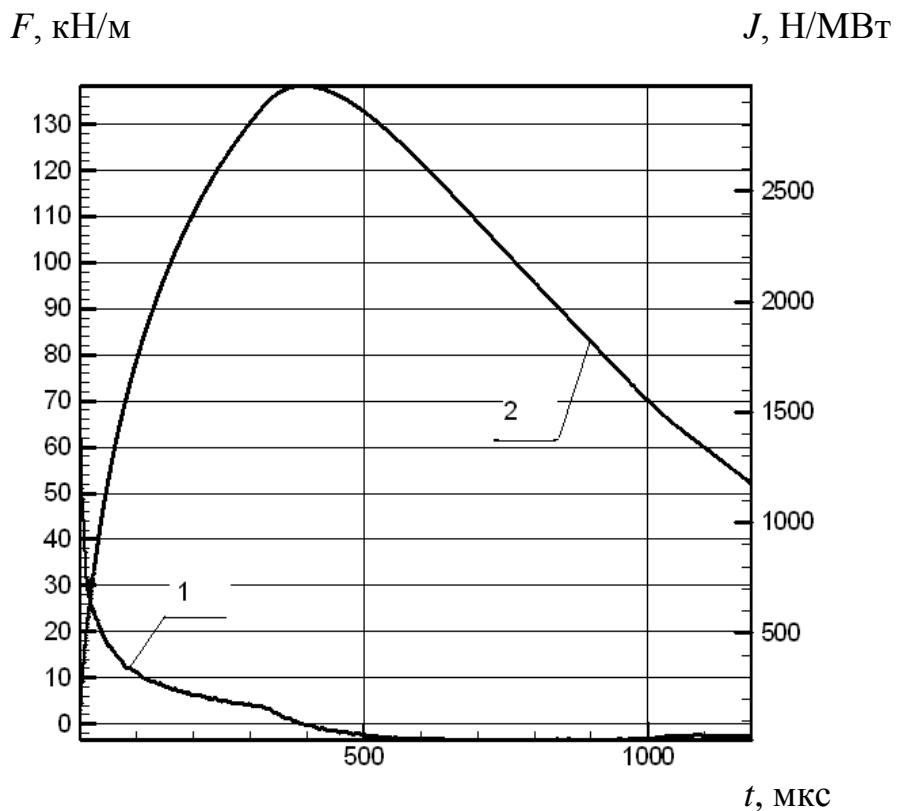


Рис. 2. Коэффициент импульса отдачи J (2), сила F (1) при значениях электротехнических параметров ЛСПР $U_0 = 5$ кВ, $C_0 = 100$ мкФ, $L = 1$ м и высоте $h = 0$ км от поверхности Земли

Рост импульса отдачи J , наблюдаемый на Рис. 2 до момента времени $t = 500$ мкс, связан активным джоулевым энерговыделением в плазме. При этом уровень давления P в плазменной области больше полного давления в набегающем потоке воздуха и значение удельной силы положительно $F > 0$. В более поздние моменты времени $t > 500$ мкс из-за сильного радиального разлета плазмы ЛСПР уровень энерговыделения в плазме падает, что приводит к возникновению условий для появления отрицательных значений силы $F < 0$ и соответствующему падению импульса отдачи J (Рис. 2).

В случае поверхностного разряда, осуществляемого на высоте $h = 25$ км, давление P_o набегающего на ЛСПР воздуха приблизительно на два порядка ниже аналогичного давления P_o окружающей воздушной среды вблизи поверхности Земли ($h = 0$) км. Поэтому в этом случае ($h = 25$ км) описанное

явление (падение J) наступает значительно позже с течением времени t (Рис. 3, наблюдается рост величины J).

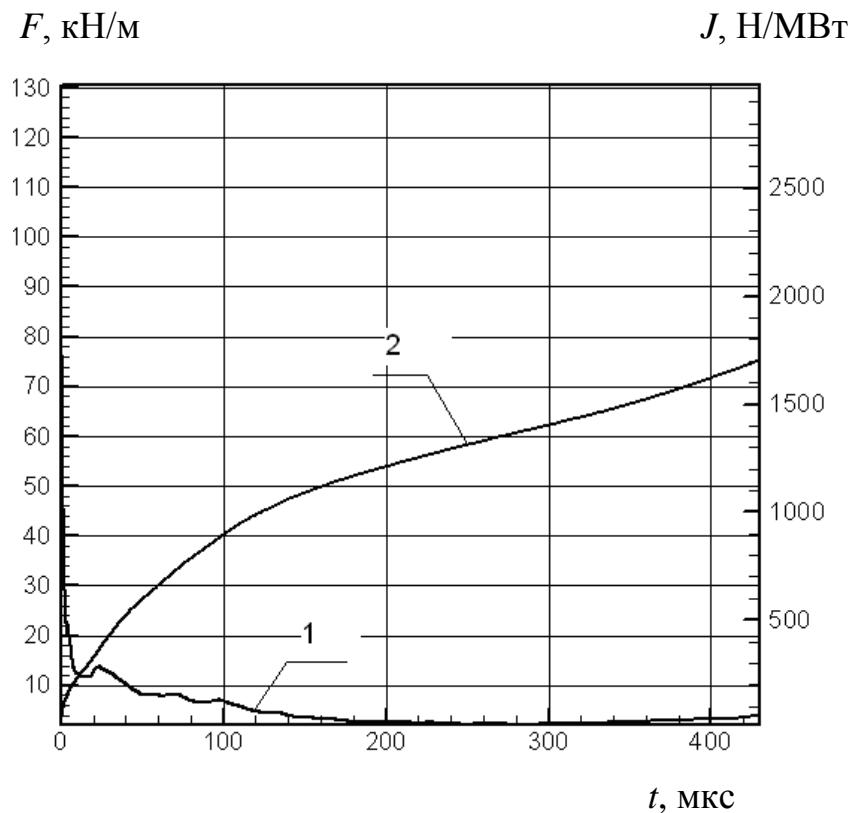


Рис. 3. Коэффициент импульса отдачи J (2), сила F (1) при значениях электротехнических параметров ЛСПР $U_0 = 5$ кВ, $C_0 = 100$ мкФ, $L = 1$ м и высоте $h = 25$ км от поверхности Земли

В пятой главе приведена постановка задачи и выполнено математическое моделирование плазмогазодинамических процессов в факеле капиллярного разряда с испаряемой стенкой (КРИС), которая является развитием работ (С.Н. Белов, А.Н. Жилин, Н.Н. Огурцова, И.В. Подмошенский, 1978; Е.К. Борисов, Е.П. Скороход, И.В. Шариков, 1997; Н.А. Боброва, 2010). В разработанной модели плазмодинамические процессы в капиллярном разряде определяются интенсивностью процессов образования плазмы в диэлектрическом канале капиллярного разряда, термодинамическими параметрами в окружающей газовой среде. Сформулировано векторное уравнение, описывающее завихренность $\vec{\Omega}$ в потоке газа, на который воздействует внешнее магнитное поле. Это уравнение

$$\frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{\Omega} = \frac{1}{\rho^2} \nabla \rho \times \left(\nabla P - \frac{1}{c} [\vec{j} \times \vec{H}] \right) + \nu \Delta \vec{\Omega},$$

являющееся обобщением уравнения работы (Э.Е. Сон, Д.В. Терешонок, 2010), позволяет ввести следующее условие возникновения тороидального вихря при наличии внешнего магнитного поля:

$$t_{\text{вих}} \approx \frac{\Omega_{xap} \rho_{xap} \varepsilon^2}{P_{xap} + \frac{H_{xap}^2}{8\pi}} < \min \left(t_{\text{конс}} \approx \frac{L_{xap}}{V_{xap}}, t_{\text{дифф}} \approx \frac{r_0^2}{v} \right),$$

где ε, r_0 – радиус ядра и большой радиус самоиндуцированного тороидального вихря с циркуляцией Γ . Произведено сопоставление результатов расчетов в одиночном факеле капиллярного разряда с известными и имеющимися экспериментальными данными. Отмечено их удовлетворительное соответствие.

$Z, \text{ см}$

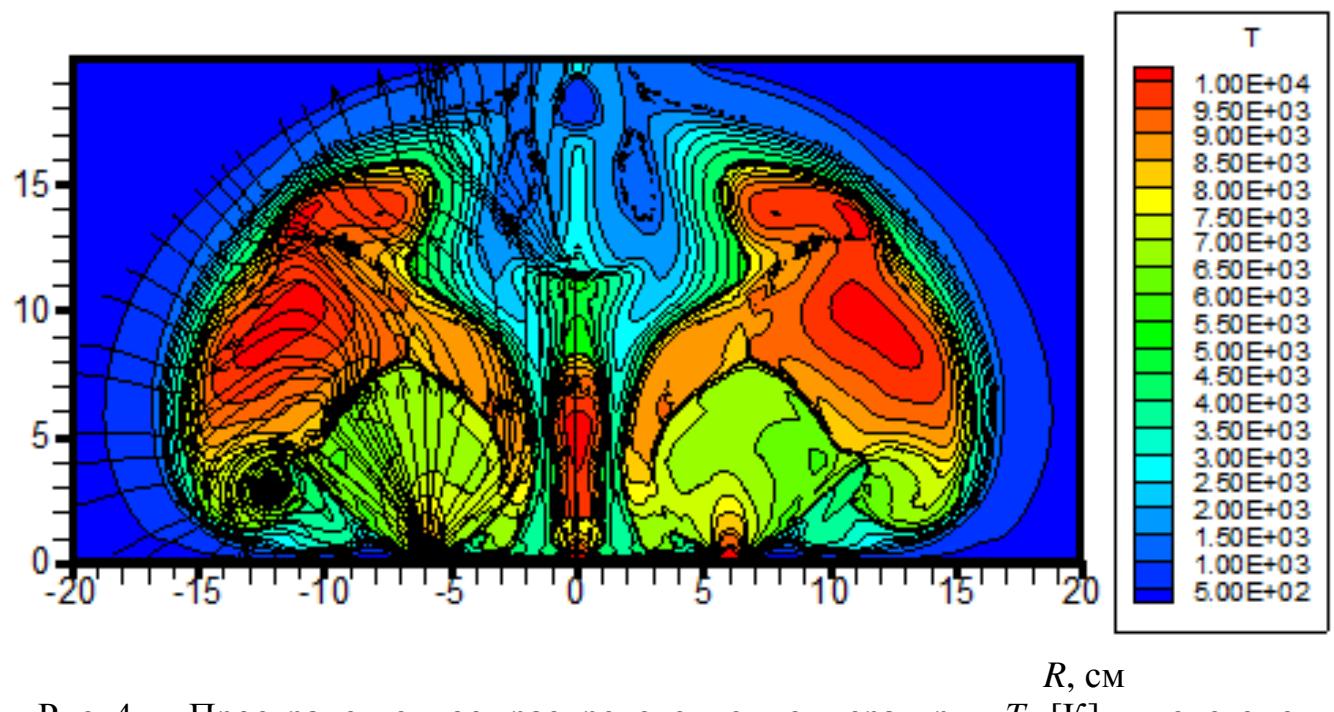


Рис. 4. Пространственное распределение температуры T [К] в системе импульсных струй КРИС на момент времени
 $t = 88,1$ мкс. $W_0 = 2,7$ кДж

Выполнены расчёты группы импульсных струй, вытекающих из расположенных рядом системы каналов КРИС. На Рис. 4 представлено пространственное распределение температуры системы импульсных струй нескольких каналов КРИС. Из пространственного распределения, показанного на Рис. 4 следует, что к моменту $t = 88,1$ мкс плазменный факел системы КРИС составляет единое целое с заметными структурными особенностями. Так

например, процесс взаимодействия системы КРИС проводит к образованию вблизи оси системы области с повышенным, относительно окружающей среды, давлением (≈ 160 раз) и плотностью (≈ 10 раз). Давление в этой области «запирает» (на данный момент времени) истечение плазменной струи из КРИС, которая расположена на оси системы. В последующие моменты времени в этой зоне формируется узконаправленная струя, которая имеет более высокую, по сравнению с периферийными КРИС, осевую скорость движения факела. Видно также, что на данной стадии развития объединенного плазменного факела КРИС торOIDальная вихревая структура наблюдается на периферии системы струй. Проведены расчёты системы импульсных струй с учётом влияния на них дополнительного внешнего магнитного поля. Наиболее заметное влияние магнитное давление оказывает на нагретую ($T > 20$ кК) приосевую часть системы импульсных струй КРИС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработана совокупность взаимно подчиненных нестационарных математических моделей и разработано прикладное программное обеспечение для проведения вычислительных экспериментов и исследования комплекса радиационно–магнитоплазмодинамических процессов в импульсных магнитно–инерциальных системах.
2. Для нестационарной многомерной радиационно–магнитогазодинамической модели с учетом электронной теплопроводности и радиационно–конвективного теплообмена проведены многофакторные расчеты параметров высокояркостных плазменных источников излучения и генераторов ударных волн, термоядерных высокоэнергетических систем, импульсных струй капиллярного и лазерного разрядов.
3. Показано, что в поверхностном разряде с учетом процессов вязкой турбулентной диффузии плазмы в «магнитогазодинамическом» режиме в результате взаимодействия радиационно–магнитогазодинамической волны разрежения и ударной волны наблюдается эффект радиационно–магнитного ослабления интенсивности ударной волны.

4. На основе расчетно-теоретических результатов показана перспективность применения импульсных плазменных разрядов для инициации экстренного поджига и горения топливных смесей в газовых потоках.
5. Разработана численная методика и создана компьютерная программа, которая используется для построения многоблочных регулярных криволинейных адаптивных сеток в областях с кусочно-гладкими границами.
6. Сформулирована нелинейная квазимонотонная компактно-полиномиальная разностная схема повышенного порядка точности, которая легла в основу численной методики, предназначеннной для моделирования импульсных радиационно–магнитогазодинамических систем.
7. Разработан программный комплекс PLUM, ориентированный на решение задач импульсных радиационно–магнитогазодинамических систем и отдельных задач плазмодинамики.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В РАБОТАХ

1. Кузенов В.В., Гришин Ю.М., Козлов Н.П. **Об эффекте деградации УВ в сильноточных излучающих разрядах в газах атмосферного давления** // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. №11. С. 71-75. (0,5 п.л./0,15 п.л.).
2. Кузенов В.В., Гришин Ю.М., Козлов Н.П. **Об особенностях спектрально-яркостных характеристик импульсных излучающих поверхностных разрядов в плотных газах** // Теплофизика высоких температур. 1998. Т. 36. №2. С. 187-193. (0,5 п.л./0,15 п.л.).
3. Кузенов В.В., Гришин Ю.М., Козлов Н.П. **Динамика и эффективность первичных фотохимических процессов при воздействии импульсных потоков УФ-излучения на газовые среды** // Известия Вузов. Сер. Машиностроение. 1999. № 5-6. С. 42-53. (0,8 п.л./0,3 п.л.).
4. Радиационно-магнитогазодинамические режимы и структуры мощных излучающих разрядов / В.В. Кузенов [и др.]. М., 1999. 31 с. (Препринт ИПМех РАН. № 651). (3,5 п.л./1,75 п.л.).

5. Математическое моделирование линейно-стабилизированного поверхностного разряда в газах / В.В. Кузенов [и др.]. М., 1999. 45 с. (Препринт ИПМех РАН № 657). (3,5 п.л./1,75 п.л.).
6. Суржиков С.Т., Кузенов В.В., Гришин Ю.М. Об особенностях формулировки МГД-уравнений для построения пространственных вычислительных моделей. М., 2000. 41 с. (Препринт ИПМех РАН № 661). (3,5 п.л./1,75 п.л.).
7. Kuzenov V.V., Surzhikov S.T., Grishin Yu.M. Radiative gas dynamic of linear-stabilized surface discharge in atmospheric gases // 36th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference. Toronto, Ontario, Canada, 2005. AIAA 2005-4929. 11 p. (0,75 п.л./0,25 п.л.).
8. Kuzenov V.V., Surzhikov S.T., Sharikov I.V. Numerical simulation of linear-stabilized surface discharge in rare air // Fifteenth International Conference on MHD Energy Conversion and Sixth International Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics. Moscow, 2005. V. 2. P. 650. (0,75 п.л./0,25 п.л.).
9. Numerical analysis on near-surface laser plasma in gases and vacuum / V.V. Kuzenov [et al.]// 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, 2006. AIAA 2006-1174. 11 p. (0,8 п.л./0,2 п.л.).
10. Кузенов В.В. Численное моделирование процессов истечения продуктов горения заряда твердого топлива в окружающее пространство // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2007. № 2. С. 44-55. (0,5 п.л.).
11. Кузенов В.В. Построение регулярных адаптивных сеток в пространственных областях с криволинейными границами // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2008. № 1. С. 3-11. (0,5 п.л.).
12. Кузенов В. В. Расчет течения совершенного газа вблизи поверхности реактивного снаряда. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Т. 7. <http://chemphys.edu.ru/issues/2008-7/articles/475/> (дата обращения: 23.04.2018). (1 п.л.).
13. Кузенов В. В., Филипский М. В. Расчет переноса излучения в приповерхностных лазерных факелях. // Физико-химическая кинетика в газовой

динамике. 2008. Т. 7. <http://chemphys.edu.ru/issues/2008-7/articles/473/> (дата обращения: 31.10.2018). (1,1 п.л./0,55 п.л.).

14. Kuzenov V.V., Surzhikov S.T., Petrusev A.S. Radiation gas dynamics of aluminium laser plume in Air // 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, 2008. AIAA 2008-1108. (0,75 п.л./0,25 п.л.).

15. Кузенов В.В. Математическое моделирование основных плазмодинамических характеристик в лазерном факеле вблизи алюминиевой мишени // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2009. № 4. С. 45-77. (0,8 п.л.).

16. Численный анализ конвективного нагрева двух моделей спускаемых космических аппаратов / В.В. Кузенов [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2009. № 3. С. 3-14 (0,8 п.л./0,2 п.л.).

17. 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 РАН № 942). (3,5 п.л./1,75 п.л.).

18. Кузенов В.В., Филипский М.В. Численное моделирование отдельных теплофизических параметров лазерной плазмы // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т. 9. № 1. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/140/> (дата обращения: 12.03.2018). (1,1 п.л./0,55 п.л.).

19. 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.).

20. Кузенов В. В. Разработка математической модели радиационно-плазмодинамических процессов в факеле капиллярного разряда // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2011. Т. 11. <http://chemphys.edu.ru/issues/2011-11/articles/175/> (дата обращения: 23.04.2018) (0,2 п.л.).

21. 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.).

22. 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.13. Вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-3/articles/362/> (дата обращения: 23.04.2014). (0,75 п.л./0,25 п.л.).

23. Кузенов В. В. Структура взаимодействующих импульсных струй плазмы, истекающих из группы капиллярных разрядов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Т.13. Вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-3/articles/361/> (дата обращения: 23.04.2018). (0,2 п.л.)

24. Котов М.А., Кузенов В.В. Численное моделирование обтекания поверхностей перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. № 3. С. 17-30. (0,8 п.л./0,4 п.л.).

25. Котов М. А., Кузенов В. В. Геометрическое моделирование сложных поверхностей гиперзвуковых летательных аппаратов в САПР // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Т.13. Вып. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2012-13-4/articles/372/> (дата обращения: 12.10.2018). (0,75 п.л./0,375 п.л.).

26. 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.).

27. 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.).

28. Кузенов В. В. Одномерный расчет течения газа в аэродинамической ударной трубе на основе динамически адаптируемых сеток //Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2013. Т.14. Вып. 4.

<http://chemphys.edu.ru/issues/2013-14-4/articles/429/> (дата обращения: 23.04.2018) (0,2 п.л.).

29. Кузенов В. В. Компьютерное моделирование влияния внешнего магнитного поля на систему струй плазмы капиллярных разрядов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2013. Т.14. Вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2013-14-2/articles/395> (дата обращения: 23.04.2018). (0,2 п.л.)

30. 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.).

31. 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.).

32. 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/cryogen/719.html> (дата обращения: 31.10.2018) (1,2 п.л./0,6 п.л.).

33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013661151. Численный анализ нестационарной двумерной радиационно-магнитогазодинамической модели PLUM (Plasma jets and Laser driven Universal Model) / Кузенов В.В., Рыжков С.В. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.11.2013.

34. **Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Shumaev V.V.** Computer analysis of transport, optical and thermodynamic properties of plasma // High Temperature Material Processes. 2014. V. 18. Issue 1-2. P. 99-109. (0,6 п.л./0,2 п.л.).

35. Computer simulation of plasmadynamic processes in capillary discharges /V.V. Kuzenov [et al.] // High Temperature Material Processes. 2014. V. 18. Issue 1-2. P. 119-130. (0,7 п.л./0,2 п.л.).

36. 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.).

37. Кузенов В.В., Котов М.А. Анализ газодинамических процессов и разработка модели течений в ударной гиперзвуковой аэродинамической трубе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. № 1. С. 3-25 (0,7 п.л./0,35 п.л.).

38. Кузенов В.В., Рыжков С.В., Шумаев В.В. Определение термодинамических свойств замагниченной плазмы на основе модели Томаса–Ферми // Прикладная физика. 2014. № 3. С. 22-25. (0,5 п.л./0,15 п.л.).

39. Кузенов В. В., Рыжков С. В., Шумаев В. В. Сравнение термодинамических свойств ионизованных газов по моделям Томаса–Ферми и Саха в области их совместной применимости // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т.15. Вып. 5. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-5/articles/253/> (дата обращения: 12.10.2018). (0,75 п.л./0,35 п.л.).

40. Кузенов В. В., Рыжков С. В., Шумаев В. В. Применение модели Томаса–Ферми для определения термодинамических свойств замагниченной плазмы // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т.15. Вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-3/articles/225/> (дата обращения: 23.04.2018). (0,75 п.л./0,25 п.л.).

41. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Regimes of heating and compression in magneto-inertial fusion // Proceedings of the XV International Heat Transfer Conference. Kyoto, 2014. IHTC15-9662. (0,75 п.л./0,375 п.л.).

42. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Shumaev V.V. Numerical thermodynamic analysis of alloys for plasma electronics and advanced technologies // Problems of Atomic Science and Technology. 2015. №. 4. Р. 53-56. (0,5 п.л./0,15 п.л.).

43. Кузенов В.В., Фролко П.А. Схемы стандартного и комбинированного энергетического воздействия на мишень в концепции магнитно-инерциального термоядерного синтеза // Прикладная физика. 2015. № 2. С. 21-27. (0,55 п.л./0,35 п.л.).

44. Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V., Shumaev V. V. Application of Thomas-Fermi model to evaluation of thermodynamic properties of magnetized plasma // Problems of Atomic Science and Technology. 2015. № 1. P. 97-99. (0,35 п.л./0,1 п.л.).
45. Кузенов В.В., Шумаев В.В. Описание термодинамических свойств плазмы в приближениях Саха и Томаса–Ферми // Прикладная физика. 2015. № 2. С. 32-36. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
46. Компьютерное моделирование плазмодинамических процессов факела капиллярного разряда / В.В. Кузенов [и др.] // Труды МАИ. 2015. №83. С. 1 – 24. URL: http://mai.ru//upload/iblock/314/kuzenov_ryzhkov_gavrilova_skorokhod_rus.pdf. (1 п.л./0,25 п.л.).
47. Кузенов В.В., Рыжков С.В., Скороход Е.П. Компьютерное моделирование плазмодинамических процессов импульсных струй капиллярного разряда // Труды МАИ. 2015. № 84. С. 1 - 21. URL:https://www.mai.ru/upload/iblock/314/kuzenov_ryzhkov_gavrilova_skorokhod_rus.pdf. (1 п.л./0,25 п.л.).
48. Физико-математические модели и методы расчета воздействия мощных лазерных и плазменных импульсов на конденсированные и газовые среды. / В.В. Кузенов [и др.]. // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 328 с. (20,5 п.л./5,75 п.л.).
49. Кузенов В.В. Тестирование отдельных элементов метода расчета физических процессов в мишени магнитно-инерциального термоядерного синтеза // Прикладная физика. 2016. № 2. С. 16-24 (0,5 п.л.).
50. Кузенов В.В. Компьютерное моделирование процесса сжатия и энерговыделения при лазерном воздействии на цилиндрически симметричную мишень // Ядерная физика и инжениринг. 2016. Т. 7. № 4. С. 342–346. (0,5 п.л.).
51. Кузенов В.В., Рыжков С.В. Разработка метода расчета физических процессов в комбинированных схемах магнитно-инерциального удержания плазмы // Известия РАН. Серия физическая. 2016. Т. 80. № 5. С. 659–663. (0,5 п.л./0,25 п.л.).

52. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614540. Программа расчета радиационно-газодинамических процессов с учётом переноса излучения и широкодиапазонных уравнений состояния / В.В. Кузенов, С.В. Рыжков, П.А. Фролко Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26.04.2016.

53. Гиперзвуковой летательный аппарат с прямоточным воздушно-реактивным двигателем с повышенными летно-техническими характеристиками: пат. Рос. Федерации. №2604975; заявл. 20.04.2015; опубл. 10.11.2016. Бюл. № 35. 18 с/

54. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Frolko P.A. Numerical simulation of the coaxial magneto-plasma accelerator and non-axisymmetric radio frequency discharge // Journal of Physics: Conference series. 2017. V. 830. P. 012049. (0,75 п.л./0,25 п.л.).

55. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Numerical simulation of the effect of laser radiation on matter in an external magnetic field // Journal of Physics: Conference series. 2017. V. 830. P. 012124. (0,75 п.л./0,35 п.л.).

56. Кузенов В.В., Петренко А.Д. Построение регулярной аддитивной расчетной сетки с использованием параболического генератора // Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. Алушта, 2017. С. 76-78 (0,2 п.л./0,1 п.л.).

57. Kuzenov V.V. Some aspects of modeling of the target compression and heating in a magnetic field // Journal of Physics: Conference series. 2017. V. 891. P. 012300. (0,75 п.л.).

58. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Approximate method for calculating convective heat flux on the surface of bodies of simple geometric shapes // Journal of Physics: Conference series. 2017. V. 815. P. 012024. (0,75 п.л./0,45 п.л.).

59. Shumaev V.V., Kuzenov V.V. Development of the numerical model for evaluating the temperature field and thermal stresses in structural elements of aircrafts // Journal of Physics: Conference series. 2017. V. 891. P. 012311. (0,7 п.л./0,35 п.л.).

60. Kuzenov V.V. Compression of magnetized target in the magneto-inertial fusion // Journal of Physics: Conference series. 2017. V. 941. P. 012011. (0,7 п.л.).
61. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Model for plasma jet-driven magneto-inertial fusion // Journal of Physics: Conference series 2017. V. 875. P. 122002. (0,75 п.л./0,35 п.л.).
62. Кузенов В.В., Рыжков С.В. Численное моделирование процесса лазерного сжатия мишени, находящейся во внешнем магнитном поле // Математическое моделирование. 2017. Т. 29. № 9. С. 19-32. (0,85 п.л./0,45 п.л.).
63. Kuzenov V.V. Interaction of laser beams with magnetized substance in a strong magnetic field // Journal of Physics: Conference series 2018. V. 980. P. 012009 (0,75 п.л./0,35 п.л.).
64. Kuzenov V.V., Dobrynina A.O., Shumaev V.V. Calculating processes of laminar and turbulent heat transfer around the elements of the aircraft // Journal of Physics: Conference series 2018. V. 980. P. 012023 (0,75 п.л./0,35 п.л.).
65. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018614712. Численное исследование свойств и структуры группы капиллярных разрядов / В.В. Кузенов, С.В. Рыжков. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.04.2018.