

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

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

Научный консультант: доктор физико-математических наук, доцент
Кузенов Виктор Витальевич

Официальные оппоненты: **Козлов Андрей Николаевич,**
доктор физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Молчанов Александр Михайлович,
доктор физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Защита диссертации состоится «__» _____ 2021 года в ___ ч. ___ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.15 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: Москва, ул. 2-ая Бауманская, д. 5, стр 1.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Аттетков
Александр
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Диссертационная работа посвящена математическому моделированию процессов, протекающих в системах высокой плотности энергии, в частности, в установках, использующих лазерное излучение или систему импульсных струй для нагрева и сжатия замагниченной мишени до условий, при которых в ней образуются нейтроны.

Решение такого рода задач предполагает разработку математических моделей и высокоточных численных методов их решения, которые позволяют проводить адекватное математическое моделирование эволюции среды, находящейся в магнитном поле, под действием интенсивных потоков энергии. Поскольку температура и плотность вещества в рассматриваемых процессах могут изменяться на несколько порядков, требуется использование широкодиапазонного уравнения состояния вещества, которое можно получить, объединяя термодинамические функции, полученные по нескольким моделям (А.Ф. Никифоров, В.Г. Новиков, В.Б. Уваров, 2000). Задачу осложняет необходимость учета сильного магнитного поля, используемого в таких системах с целью увеличения их эффективности.

Недостаточно полно изучен процесс взаимодействия импульсных струй и вещества, особенно при наличии магнитного поля, в то время как комбинированное воздействие импульсных струй и лазерного излучения на замагниченную мишень имеет потенциал стать основой для создания эффективных генераторов нейтронов.

Целью диссертационной работы является исследование теплофизических процессов сжатия и нагрева вещества в магнитном поле под действием интенсивных потоков энергии.

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

1. Разработка математической модели эволюции среды, находящейся в магнитном поле под действием интенсивных потоков энергии.

2. Создание программы для ЭВМ, реализующей разработанную модель, её верификация на известных тестовых задачах.

3. Математическое моделирование процессов сжатия и нагрева замагниченной мишени под действием системы импульсных струй и интенсивного лазерного излучения.

4. Обоснование возможности создания генераторов нейтронов, использующих импульсные струи и лазерное излучение для воздействия на мишень, находящуюся магнитном поле.

Методы исследования. В ходе выполнения диссертационной работы для исследования процессов эволюции среды проводилось математическое моделирование на основе известных численных методов (В.В. Кузенов, 2017) и оценочные расчеты, для исследования термодинамических свойств среды использовались численные методы решения уравнения Пуассона для внутриатомного потенциала и системы уравнений модели ионизационного равновесия.

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Сформулирована математическая модель эволюции среды, находящейся в магнитном поле под действием интенсивных потоков энергии.

2. Разработана программа для ЭВМ, реализующая метод расчета термодинамических свойств веществ в широком диапазоне температур и плотностей.

3. Результаты вычислительных экспериментов, устанавливающие специфические особенности процессов нагрева и сжатия замагниченной цилиндрической мишени под воздействием импульсных струй, при комбинированном воздействии лазерного излучения и импульсных струй.

Практическая значимость работы. Разработанная в ходе выполнения диссертационной работы программа для ЭВМ ТЕРМАГ позволяет рассчитывать термодинамические свойства смеси веществ в магнитном поле.

Разработанный и зарегистрированный программный комплекс позволяет выполнять численные расчеты и представлять полученные результаты в графическом виде (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2015614110 от 7 апреля 2015 г.).

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математическая модель эволюции среды, находящейся в магнитном поле, под действием интенсивных потоков энергии.

2. Программа для ЭВМ, реализующая метод расчета термодинамических свойств веществ в широком диапазоне температур и плотностей.

3. Результаты расчёта нагрева и сжатия замагниченной цилиндрической мишени под действием импульсных струй, лазерного излучения и их комбинированного воздействия.

Достоверность и обоснованность изложенных в диссертации основных положений, результатов и выводов основывается на использовании корректных математических моделей, сравнении полученных результатов с аналитическими решениями, экспериментальными данными, предложенными для верификации моделей. Результаты диссертационной работы согласуются с известными результатами других авторов.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены в докладах на следующих конференциях и симпозиумах: VI Российская национальная конференция по теплообмену (Москва, 2014); XLI - XLIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2014-2016); Международная конференция «Управление и обработка информации в инженерных приложениях» (Москва, 2015); LXV Международная конференция «ЯДРО 2015. Новые горизонты ядерной физики, ядерной техники, фемто- и нанотехнологий» (Санкт-Петербург, 2015); V-VII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2012-2014); XX и XXIV Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2014,

2018); XX и XV Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа (Москва, 2012, 2017); VIII, IX и XIII Всероссийская школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем» (АФМ) (Москва, 2014-2015, 2019); XIX и XX Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Орехово-Зуево, 2013, Звенигород, 2015); VIII Международная конференция «Физика плазмы и плазменные технологии» (РРРТ-8) (Минск, 2015); Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2017) и VI Международная конференция «Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Новосибирск, 2017).

Основные результаты работы получены при выполнении проектов МГТУ им. Н.Э. Баумана (ПНР-4 «Энергетика и энергоэффективность» в рамках НИУ техники и технологий), программы 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»), госзадания Министерства образования и науки Российской Федерации (проекты № 13.79.2014/К и № 13.5240.2017/БЧ).

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 22 научных работах, в том числе, в 12 статьях в журналах, входящих в Перечень российских рецензируемых научных изданий, и 9 научных публикациях в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и Web of Science.

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.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих результатов и выводов, списка литературы. Работа представлена на 132 страницах, содержит 72 иллюстрации и 5 таблиц. Список литературы включает 94 наименования.

ОСНОВНОЕ 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 представлен аналитический обзор работ, посвященных математическому моделированию процессов сжатия и нагрева мишеней под действием интенсивных потоков энергии и дано краткое описание основных моделей, которые используются для определения термодинамических свойств веществ в широком диапазоне температур и плотностей.

Показано, что моделирование действия импульсных струй на мишень в присутствии магнитного поля является в настоящий момент слабо исследованной областью, поскольку основные расчеты связаны с системой «лазер-мишень» (У.С. Thio, 2018).

Выполненные в работе оценки времен электрон-ионных, электрон-электронных и ион-ионных столкновений показали, что во всей области, кроме плазменной короны (которая играет пренебрежимо малую роль в рассматриваемых процессах) можно говорить об установлении равновесия и вводить температуру вещества. Оценки росселандовых пробегов излучения показали, что рассматриваемая среда является оптически плотной и доминирующий механизм передачи теплоты – теплопроводность. Также показано, что имеется возможность стабилизировать положение контактной границы (чтобы избежать появления неустойчивости типа Рэлея-Тейлора) путем воздействия на неё специальным образом, созданным магнитным полем.

По части расчета термодинамических свойств веществ на практике зарекомендовал себя метод совместного применения моделей ионизационного равновесия (Ю.В. Бойко, Ю.М. Гришин, А.С. Камруков и др., 1988) и квантово-статистической модели. Данные модели имеют ограниченную область применимости, поэтому происходит так называемая «сшивка» их результатов

(Н.Н. Калиткин, К.И. Луцкий, 2015). В рассматриваемом диапазоне плотностей и температур возможно возникновение вырожденного состояния электронного газа (В.Е. Фортов, 2013). Такое явление наблюдается в том случае, когда температура электронного газа становится меньше температуры вырождения T_0 . Также следует отметить, что при плотностях порядка плотности твердого тела и температурах в десятки и сотни тысяч градусов энергия кулоновского взаимодействия заряженных частиц сравнима с их кинетической энергией и электронно-ионный газ является неидеальным.

Во второй главе описываются результаты исследования моделей ионизационного равновесия и квантово-статистической модели в области совместной применимости с целью использования их для нахождения термодинамических свойств веществ, находящихся в магнитном поле под действием интенсивных потоков энергии. Выполнены оценки влияния магнитного поля на теплофизические параметры веществ. Проведенные оценки показывают, что магнитное поле не влияет на ориентацию спинов электронов или атомов в газе. Магнитное поле $B \sim 10^9$ Гс, в котором энергия магнитного момента μB больше, чем характерная энергия связи атома или молекулы (порядка постоянной Ридберга $Ry = m_e e^4 / 2\hbar^2$), существенно влияют на структуру атомов и молекул и сильно изменяет их энергию связи и ионизации. Рассматриваемые здесь поля существенно меньше $B \sim 10^{13}$ Гс, поэтому можно пренебречь релятивистскими эффектами.

Из результатов расчетов, которые выполнены с использованием модели ионизационного равновесия и квантово-статистической модели, следует, что при температурах 10^4 – $5 \cdot 10^4$ К наблюдается значительная (на порядок величины) разница между значениями термодинамических функций, вычисленных по данным моделям. Эта разница объясняется тем, что термодинамические параметры, полученные по квантово-статистической модели, имеют заметную ошибку в данном диапазоне температур (S.A. Dyachkov, P.R. Levashov, D.V. Minakov, 2016), при этом в области температур $T \sim 10^5$ К обе модели показывают качественно сходные результаты.

Третья глава содержит математическую модель, которая использует многокомпонентные, одномерные уравнения магнитной гидродинамики (1)–(9),

уравнение переноса собственного широкополосного излучения, уравнение магнитной индукции, переноса излучения, методы расчета уравнений состояний вещества и коэффициентов поглощения излучения, определяет условия возникновения и протекания самоподдерживающейся термоядерной реакции синтеза:

$$\frac{\partial \rho c_i}{\partial t} + \text{div}(\rho c_i \vec{V}) = F_{\rho c}, F_{\rho c} = -\frac{\rho c_i u^{(v-1)}}{r} + \text{div}(\rho q_i^D), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = F_{\rho}, F_{\rho} = -\rho u \frac{(v-1)}{r}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u^2 + P^{\Sigma}) = F_{\rho u} + f_r, F_{\rho u} = -\rho u^2 \frac{(v-1)}{r}, f_r = \frac{1}{c} [\vec{j} \times \vec{H}]_r, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \text{div}(\rho E u + P^{\Sigma} u + q^{\Sigma}) = F_E + q_r + D_x + Q_{Fus}^e, q^{\Sigma} = q_i + q_e, \quad (4)$$

$$F_E = -(\rho E u + P^{\Sigma} u) \frac{(v-1)}{r}, P^{\Sigma} = P_e + P_i, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho e_e)}{\partial t} + \text{div}(\rho e_e u + P_e u + q + q_e) = F_E + q_r - Q_{ei} + Q_{Fus}^e, \quad (6)$$

$$F_e = -(\rho e_e u + P_e u) \frac{(v-1)}{r}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho e_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho e_i u + P_i u + q_i) = F_i + Q_{ei}, F_i = -(\rho e_i u + P_i u) \frac{(v-1)}{r}, \quad (8)$$

$$D_x = \sum_i h_i \text{Div}(\rho q_i^D), \text{Div}(\) = \frac{1}{J} \frac{\partial(J)}{\partial \xi}, J = r^{(v-1)}, \quad (9)$$

где t – время, z – пространственная координата, ρ – плотность; u – скорость вдоль координаты z ; индекс $v = (1, 2, 3)$ отвечает случаям плоской, осевой и сферической симметрии, $P = P(\rho, \varepsilon)$ – статическое давление, ε – удельная внутренняя энергия, $E = (\varepsilon + u^2/2)$ – полная энергия потока газа, $\vec{F} = (F_{\rho}, F_{\rho u}, F_E)$ – вектор источников, F_e, F_i – поправки на криволинейность системы координат, j – плотность тока, q, q_v – полный и спектральный потоки излучения, T_e, T_i – температуры электронов и ионов, f_r – электромагнитная сила, q_r – тепловой поток от протекания токов (джоулево тепло), Q_{ei} – энергия, передаваемая в единицу времени в единице объема от электронов к ионам, $q_e = -\lambda_{\perp}^e \text{grad} T_e, q_i = -\lambda_{\perp}^i \text{grad} T_i, q_i^D = -D_{\perp}^i \text{grad}(c_i)$ – тепловые и диффузионные потоки, возникающие за счет процессов теплопроводности

и диффузии, λ_{\perp}^e , λ_{\perp}^i – коэффициенты теплопроводности электронов и ионов, D_{\perp}^i – коэффициент диффузии ионов, D_x – перенос энтальпии за счёт диффузии, c – скорость света, $J = \partial(r, z)/\partial(\xi, \eta)$ – якобиан перехода от цилиндрической системы координат r, z к криволинейной системе координат ξ, η .

Уравнение магнитной индукции (10) в случае цилиндрической симметрии (при $B_z \neq 0$, $E_{\varphi} \neq 0$ ($B_{\varphi} = 0, B_r = 0$)):

$$\frac{\partial B_z}{\partial t} - \frac{1}{\mu J r} \frac{\partial(Jr V_r B_z)}{\partial r} = \frac{c^2}{4\pi\mu J r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{Jr}{\sigma} \frac{\partial B_z}{\partial r} \right), \quad (10)$$

где μ – магнитная проницаемость среды.

Процесс распространения излучения может быть описан путем введения гауссовского распределения интенсивности излучения q_l и вдоль оси z найден на основе решения уравнения переноса: $\frac{dq_l}{dz} - k_l q_l = 0$, краевое условие:

$$q_l|_{z=0 \text{ или } z=\ell} = q_l^0 \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right] \exp\left[-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right], \text{ где } k_l - \text{ групповой коэффициент}$$

поглощения, τ – полуширина импульса на полувысоте, R – радиус пятна фокусировки. В этом случае коэффициент поглощения излучения (11) определяется с использованием механизма континуального поглощения, обратного механизму тормозного излучения электронов в условиях локального термодинамического равновесия:

$$\chi_{\omega} = \frac{4,97 g Z_i^2 n_i^{\Sigma} n_e^{\Sigma}}{n_c^2 \lambda^2 (kT_e)^{3/2}} \frac{1}{\sqrt{1 - n_e^{\Sigma}/n_c}}, \text{ см}^{-1}, \quad (11)$$

где λ – длина волны излучения лазера (мкм), n_e , n_i – концентрации электронов и ионов (см^{-3}), kT_e – электронная температура в кэВ, $g = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \ln\left(e 4kT/e^2 (n_e^{\Sigma})^{1/3}\right)$ – фактор Гаунта (R. Benguria, M. Loss, H. Siedentop, 2008), который отличает квантовое выражение коэффициента поглощения излучения от классического соотношения. Представленное выше выражение коэффициента поглощения справедливо в области, в которой концентрация электронов не превосходит критическую концентрацию электронов $n_c = \frac{m_e}{4\pi e^2} (2\pi c/\lambda)^2$, $\rho_c = m_e n_c$. При этом

принято считать, что излучение, доходящее до точки в пространстве, в которой $n = n_c$, отражается и не проходит далее в глубь мишени, что иногда моделируют полным поглощением излучения (12):

$$\chi_\omega = \begin{cases} \frac{4,97 g Z_i^2 n_i^\Sigma n_e^\Sigma}{n_c^2 \lambda^2 (kT_e) ^{3/2}} \frac{1}{\sqrt{1 - n_e^\Sigma / n_c}}, n_e^\Sigma < n_c \\ \infty, n_e^\Sigma \geq n_c \end{cases} . \quad (12)$$

Способ расчета входящих в данную систему магнитогазодинамических уравнений оптических $\chi_i(T, \rho)$ и термодинамических параметров рабочих сред проводился также с использованием компьютерного кода ASTEROID (С.Т. Суржиков, 2004) и приближенного метода, который основывается на обобщении (на случай не нулевой температуры (Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер, 1966) и внешнего магнитного поля (S. A. Kholin et al., 2005) статистического метода Томаса–Ферми.

Четвертая глава посвящена численному исследованию процессов сжатия замагниченной мишени под действием системы импульсных струй с плотностью потока энергии $q \sim 10^{11} - 10^{12}$ Вт/см². Распределения температуры, давления, скорости и плотности вещества мишени представлены на Рис. 1, 2.

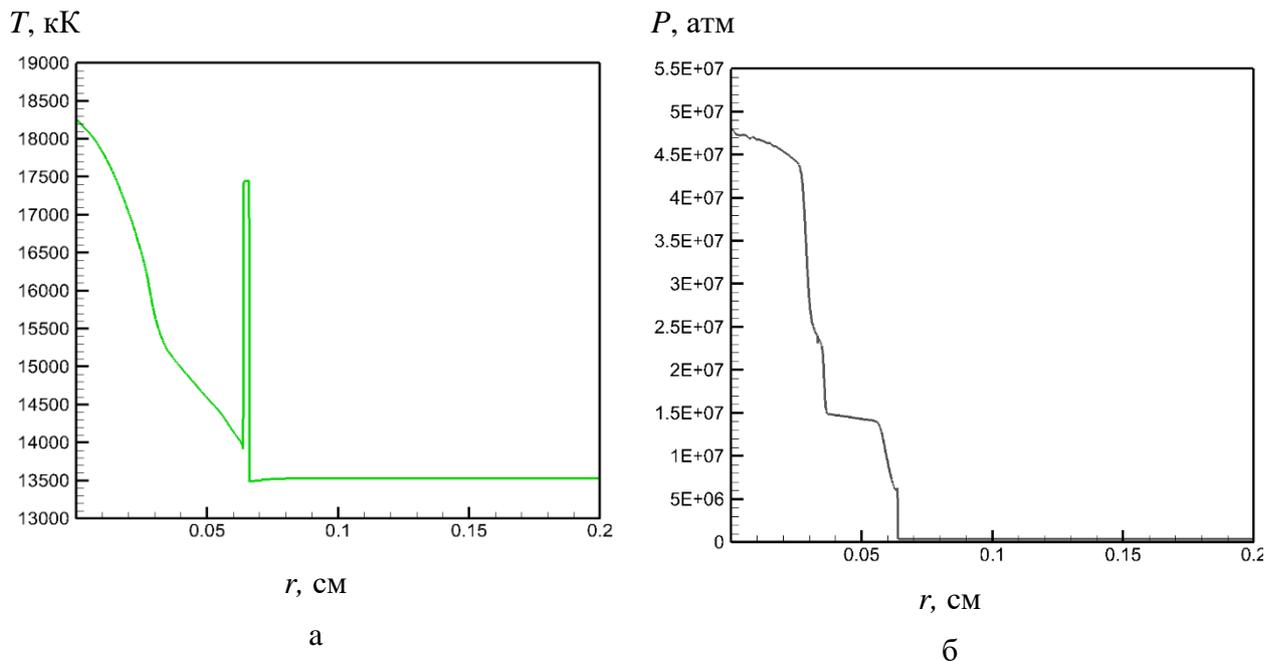


Рис. 1. Распределения по радиусу мишени на момент времени $t = 0,26$ нс: а – температуры T ; б – давления P

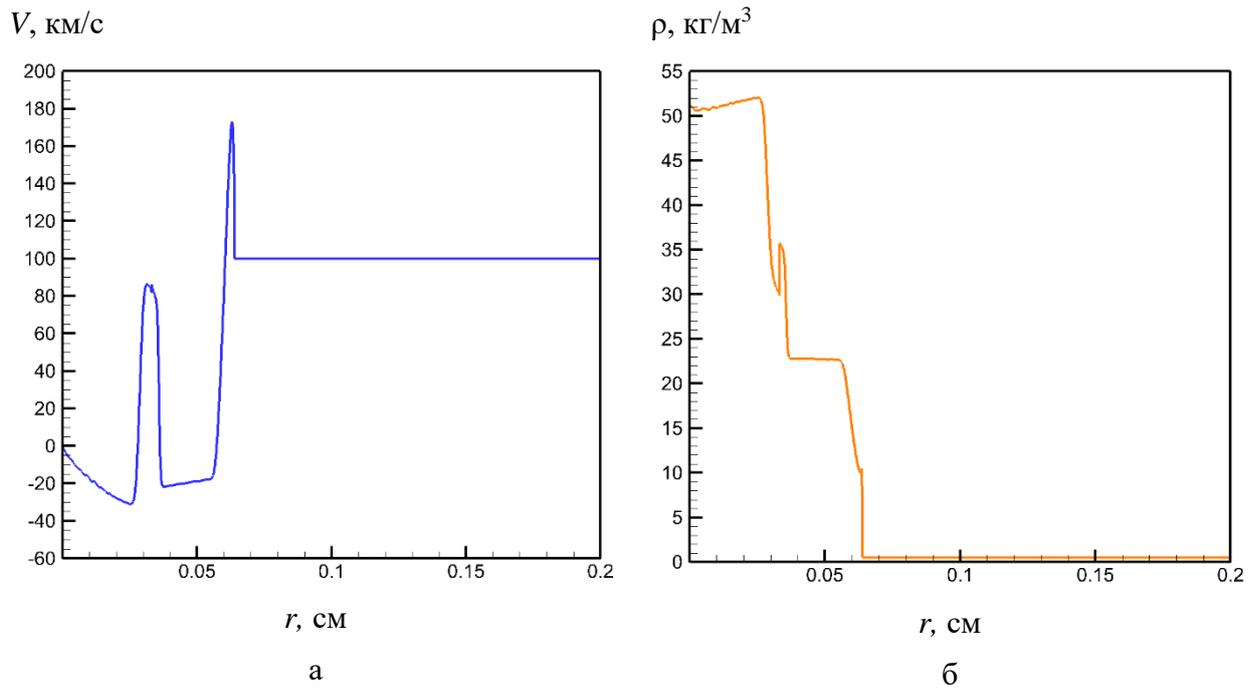


Рис. 2. Распределения по радиусу мишени на момент времени $t = 0,26$ нс: а – скорости V ; б – плотности ρ

Импульс имеет прямоугольную форму и длительность $t = 10$ нс, скорость импульсной струи составляет $V \approx 40\text{--}100$ км/с. Расчетная область и мишень состоят из центральной части ($r = 0.05$ см) и одного коаксиального слоя ($r = 0.1$ см). Краевые условия для многокомпонентных уравнений записываются следующим образом: в верхней части пространственной области задаются невозмущающие условия на входящий в расчетную область поток: $\partial^2 \vec{f} / \partial r^2 = 0$, где $\vec{f} = \{\rho, u, v, e, B_\phi\}$; на оси рассматриваемой области задаются условия симметрии. Начальные условия следующие: центральная часть мишени заполнена топливом с плотностью $\rho = 5 \cdot 10^{-2}$ г/см³ и начальной температурой равной $T = 297$ К. Она окружена коаксиальным слоем, состоящим из металла с плотностью $\rho = 2.7$ г/см³. Начальные значения напряженности «затравочного» магнитного поля в окружающей среде составляет доли Тл. Расчетное пространство кроме пространственной области, занятой мишенью, равномерно заполнено воздухом с начальными термодинамическими параметрами $P_0 = 234$ кПа, $T_0 = 297$ К.

На Рис. 3 представлены пространственные распределения различных теплофизических характеристик при воздействии на набегающего потока со скоростью $V=100$ км/с и плотностью потока энергии 10^{12} Вт/см².

Процесс сжатия и нагрева можно описать в виде нескольких структурных фаз: первоначальное схлопывание, переотражение ударно-волновой системы, расширение сжатого и нагретого ионизованного газа. Все эти фазы объясняются гидродинамическим характером сжатия вещества, когда набегающий поток деформирует и ускоряет стенки, генерирует систему взаимодействующих друг с другом и осью симметрии ударных волн, приводя к сжатию вещества и «вмороженного» в него магнитного поля.

Современное развитие ряда областей науки и техники требует создания нового поколения компактных управляемых электрофизических нейтронных источников – нейтронных генераторов. Улучшение физико-технических характеристик нейтронных генераторов и разработка новых типов нейтронных источников, повышение их эксплуатационных характеристик (в части увеличения длительности нейтронного импульса, величины интегрального нейтронного выхода) является практически важной и актуальной задачей.

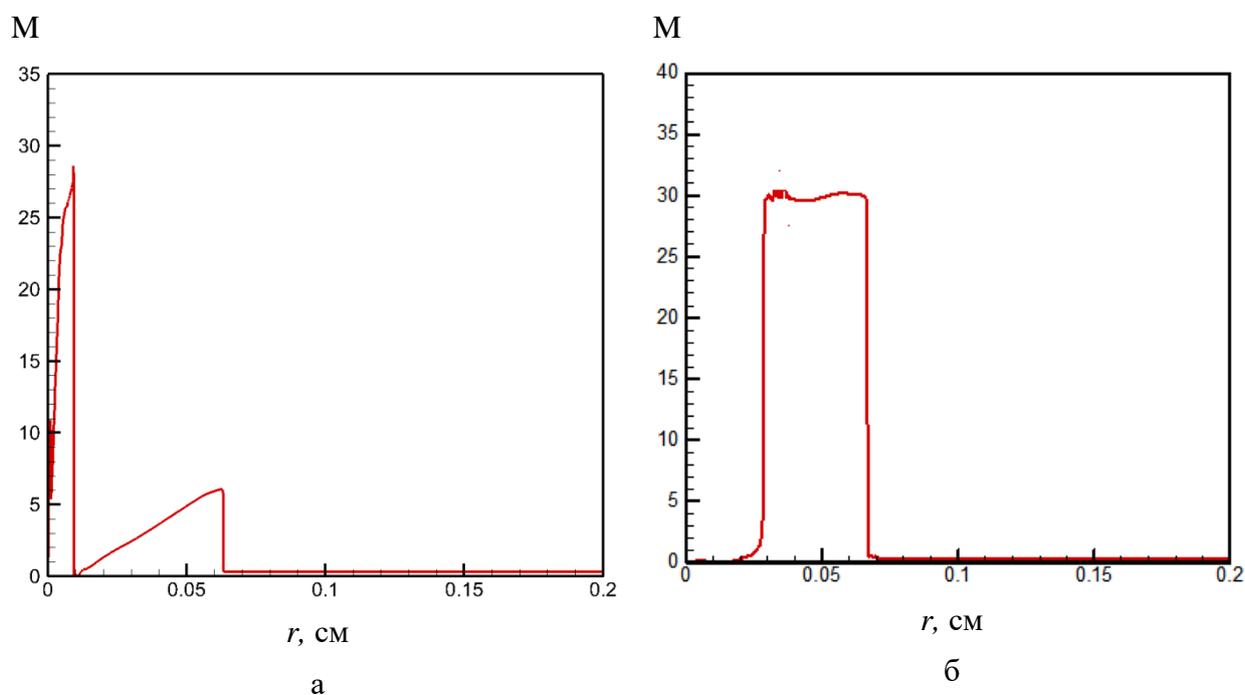


Рис. 3. Распределение по радиусу мишени числа Маха:
 а – $t = 5,97$ нс при параметрах воздействия $V=100$ км/с, $q=10^{12}$ Вт/см²;
 б – $t = 3,11$ нс, $V=40$ км/с, $q=10^{11}$ Вт/см²

Схема нейтронного источника показана на Рис. 4.

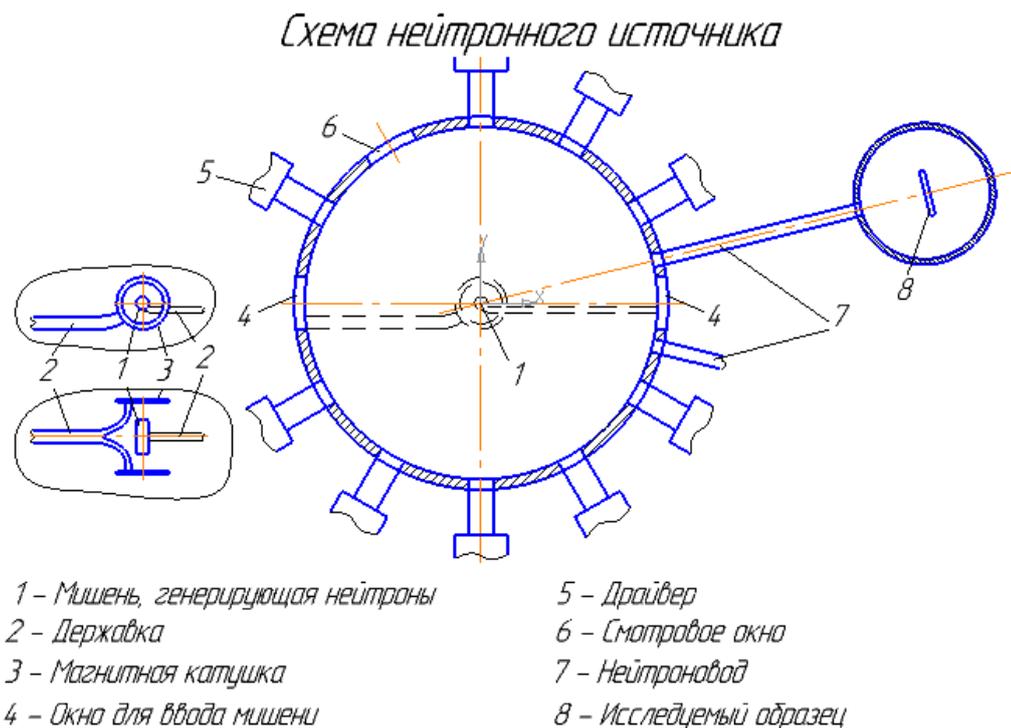


Рис. 4. Схема нейтронного источника на основе системы сжатия и нагрева мишени в присутствии внешнего магнитного поля

Результаты вычислительных экспериментов устанавливают возможность создания компактных генераторов нейтронов основе воздействия на мишень системы импульсных струй и интенсивного лазерного излучения (число нейтронов на единицу длины $N_{fus} = 1,03 \cdot 10^{15}$ н/см к моменту времени окончания воздействия). Такая величина числа нейтронов N_{fus} заметно превосходит выход нейтронных трубок и нейтронных генераторов и сопоставима с нейтронным выходом от импульсных ядерных реакторов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Сформулирована математическая модель эволюции среды, находящейся в магнитном поле, под действием интенсивных потоков энергии, включающая в себя метод расчета термодинамических свойств вещества в широком диапазоне температур и плотностей.

2. Показано, что при воздействии импульсной струи на замагниченную цилиндрическую мишень достигается выход нейтронов порядка 10^{10} за импульс при потоке энергии $q=10^{11}-10^{12}$ Вт/см², что сопоставимо с выходом нейтронов при действии лазера с большим потоком энергии $q=10^{15}$ Вт/см².

3. Теоретически обоснована возможность создания генераторов нейтронов на основе комбинированного воздействия системы импульсных струй и интенсивного лазерного излучения на замагниченную мишень. Выход нейтронов такого генератора $\sim 10^{15}$ н/см превосходит большинство существующих установок и устройств аналогичного назначения.

4. Разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ ТЕРМАГ, позволяющая рассчитывать термодинамические свойства смеси веществ в сильном магнитном поле.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. 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*. М., 2012. С. 573-574. (0,2 п.л./0,1 п.л.).

2. 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.).

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

4. 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. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-3/articles/225/> (дата обращения: 13.12.2020). (0,75 п.л./0,25 п.л.).

5. Кузенов В.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. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-5/articles/253/> (дата обращения: 13.12.2020). (0,75 п.л./0,35 п.л.).

6. 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.).

7. 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. No. 1. P. 97-99. (0,35 п.л./0,1 п.л.).

8. 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. No. 4. P. 53-56. (0,5 п.л./0,15 п.л.).

9. Шумаев В.В. Расчет термодинамических функций плазмы алюминия для энергетических систем с высокой плотностью энергии // Ядерная физика и инжиниринг. 2015. Т. 6. № 5-6. С. 309–314. (0.5 п.л.).

10. Математическая модель импульсного плазменного двигателя с предионизацией геликонным разрядом / В.В. Шумаев [и др.] // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: http://www.mai.ru/upload/iblock/24a/kuzenov-ryzhkov-shumaev-frolko_rus.pdf (дата обращения 27.01.18). (1,2 п.л./0,3 п.л.).

11. Kuzenov V.V., Shumaev V.V. Thermodynamic properties of the Mars atmosphere evaluated by Saha and Thomas-Fermi models // V International Workshop on Computer Science and Engineering: Information Processing and Control Engineering, WCSE 2015-IPCE. P. 143-147. (0,5 п.л./0,25 п.л.).

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614110. Вычислительный код для определения термодинамических свойств смеси веществ в магнитном поле (ТЕРМАГ) / В.В. Кузенов, С.В. Рыжков, В.В. Шумаев. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 07.04.2015.

13. Фролко П.А., Шумаев В.В. Газодинамические аспекты процессов взаимодействия интенсивного лазерного излучения с плазмой энергетических установок // Тепловые процессы в технике. 2016. Т. 8. № 4. С. 161-166. (0,5 п.л./0,25 п.л.).

14. 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. (0,5 п.л./0,25 п.л.).

15. Фролко П.А., Шумаев В.В. Взаимодействие импульсных струй плазмы, сформированных группой капиллярных разрядов // Современные проблемы теплофизики и энергетики: Материалы Международной конференции. М., 2017. Т. 2. С. 263–265. (0,3 п.л./0,15 п.л.).

16. Кузенов В.В., Шумаев В.В., Фролко П.А. Система импульсных капиллярных разрядов как способ получения плазменных струй // Физика низкотемпературной плазмы: Материалы Всероссийской (с международным участием) конференции. Казань, 2017. С. 104. (0,1 п.л./0,035 п.л.).

17. Фролко П.А., Шумаев В.В. Численная модель расчета параметров плазмы в газоразрядной камере ВЧ-разряда // Сборник материалов XX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. Алушта, 2017. С. 574-576. (0,2 п.л./0,05 п.л.).

18. Шумаев В.В., Добрынина А.О. Расчет процессов ламинарного и турбулентного течения газа около поверхности летательного аппарата // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Материалы Международной конференции. Новосибирск, 2017. С. 105. (0,1 п.л./0,05 п.л.).

19. Фролко П.А., Шумаев В.В. Тепловые аспекты работы источников плазмы геликонного типа // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Тезисы докладов XXI школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. Санкт-Петербург, 2017. Т. 2. С. 272-273. (0,2 п.л./0,05 п.л.).

20. 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.).

21. Кузенов В.В., Фролко П.А., Шумаев В.В. Численный анализ процессов в импульсной струе капиллярного разряда с испаряющейся стенкой // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2018. Т. 41. Вып. 2. С. 105–112 (0,75 п.л./0,35 п.л.).

22. Кузенов В. В., Шумаев В. В. Разработка методики и моделирование отдельных характеристик мишени магнитно-инерциального синтеза при комбинированном воздействии // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2019. Т.20. Вып. 4. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-4/articles/843/> (дата обращения: 13.12.2020). (0,5 п.л./0,2 п.л.).