

# МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

УДК 533.9, 621.039  
Код ГРНТИ 44.33.33

УТВЕРЖДАЮ

Ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана

д-р техн. наук, проф. Александров А.А.

\_\_\_\_\_  
(подпись)

“ \_\_\_\_ ” декабря 2014 г.

М.П.

## ОТЧЕТ

по проекту № 11.9198.2014 «Термоядерный источник нейтронов и магнитно-инерционный синтез»

выполняемого по решению об обеспечении государственного задания образовательным организациям высшего образования и научным организациям, подведомственным Министерству образования и науки Российской Федерации в сфере научной деятельности на 2014 год (приказ № 1429 от 30 декабря 2013 г.).

вид отчета: заключительный

Руководитель проекта: \_\_\_\_\_ (канд. техн. наук, доцент Рыжков С.В.)

Москва, 2014 г.

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель,  
Доцент кафедры теплофизики, канд. техн. наук \_\_\_\_\_ С.В. Рыжков  
подпись, дата

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ А.Н. Князик  
подпись, дата

## **РЕФЕРАТ**

Отчет 23 с., 5 ч., 0 рис., 0 табл., 43 источника, 5 прил.

**ЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ, АЛЬТЕРНАТИВНАЯ СИСТЕМА, ТЕПЛООБМЕН, ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ЛОВУШКА, МАГНИТНО-ИНЕРЦИОННОЕ УДЕРЖАНИЕ, ТЕРМОЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА, ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ, ТОПЛИВНЫЕ ЦИКЛЫ.**

Проект направлен на решение фундаментальной проблемы осуществления термоядерной реакции в установках с магнитным обжатием и инерционным удержанием плазмы. Работа относится к фундаментальным исследованиям перспективных ядерных и термоядерных систем с задачами инженерного характера - большой интерес представляют источники нейтронов/частиц для материаловедения и энергетики.

Основная цель проекта – теоретический анализ перспективных источников нейтронов на основе термоядерных машин сегодняшнего масштаба и нового поколения магнитных конфигураций, а также установок для проведения материаловедческих экспериментов и энергетических систем. Исследования инновационных энергетических установок, исследования и разработки в области управляемого термоядерного синтеза включены в ФЦП "Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010 - 2015 годов и на перспективу до 2020 года", а также данный проект соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники Российской Федерации «Энергетика и энергосбережение». Проведено теоретическое изучение плазмы во внешнем магнитном поле. Целью проекта являлось также участие в научной стажировке для преподавателей технических и естественных дисциплин, а также обмен опытом в преподавательской и научной деятельности.

Результатом работы и одновременно показателем внедрения является программа для ЭВМ NISA для проведения численного моделирования поведения плотной высокотемпературной плазмы. Проведено теоретическое исследование плазмы и анализ систем и источников частиц.

Сотрудничество с Институтом нейтронной физики и реакторных технологий Технологического Института Карлсруэ (КИТ) началось в 2010 г. и плодотворно продолжается в настоящее время. Полученный по результатам научной стажировки материал может быть использован в МГТУ им. Н.Э. Баумана при подготовке курсовых проектов, бакалаврских, магистерских и дипломных работ и кандидатских диссертаций.

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Введение .....                         | 5  |
| Технологический Институт Карлсруэ..... | 6  |
| Основная часть .....                   | 8  |
| Заключение .....                       | 14 |
| Список использованных источников ..... | 15 |
| Приложение .....                       | 19 |

## Введение

Магнитно-инерциальный подход является альтернативным по отношению к магнитному и инерциальному синтезу, при этом удержание частиц осуществляется инерциальным методом, а магнитное поле подавляет теплопроводность в замагниченной плазме (мишени) ОМАК. Тем самым значительно уменьшая потери теплоты и увеличивая время жизни конфигурации и, следовательно, теплофизические свойства и энергетические параметры реактора.

МГТУ им. Н.Э. Баумана имеет большой опыт в расчете параметров плазмы и характеристик различных систем и режимов удержания. Разработаны методы расчета процессов в магнитных системах, в том числе амбиполярной ловушке, компактном торе (КТ) и сферическом токамаке. Коллектив принимал участие в нескольких международных и межинститутских концептуальных проектах промышленных электростанций. Ранее в МГТУ им. Н.Э. Баумана были разработаны физические модели и численные коды для исследования процессов в термоядерной плазме. Для исследования свойств плазмы на микроскопическом уровне были разработаны коды, моделирующие динамику отдельных заряженных частиц в сложных магнитных конфигурациях с учетом влияния флуктуаций электромагнитных полей. Для расчета дисперсионных характеристик электромагнитных микронеустойчивостей и транспорта частиц и энергии поперек магнитного поля создана модель на основе системы уравнений Власова–Максвелла. Дисперсионные характеристики используются в численных моделях транспорта, сочетающих феноменологический подход и моделирование методом Монте–Карло. Для моделирования функций распределения термоядерных продуктов и немаксвелловских компонентов плазмы разработаны кинетические модели и численные коды на основе уравнений Фоккера–Планка. Перечисленные выше кинетические модели интегрированы в виде кодов для моделирования макроскопической динамики плазменных конфигураций и расчетов интегральных характеристик. При выполнении проекта предполагается модернизировать имеющиеся теоретические разработки и численные коды применительно к решаемым задачам, а также создать новые улучшенные алгоритмы моделирования рассматриваемых термоядерных систем.

## Технологический Институт Карлсруэ

Технологический Институт Карлсруэ (Karlsruher Institut für Technologie - КИТ) объединяет один из Университетов земли Баден-Вюрттемберг (Campus Sud – Южная часть) и национальный исследовательский центр (Campus Nord – Северная часть), входящий в Объединение им. Гельмгольца (Ассоциация Национальных исследовательских центров им. Гельмгольца объединяет 27 научно-исследовательских институтов, годовой бюджет составляет порядка 3 миллиардов евро). На данный момент 2/3 тематики КИТ составляет переработка и удаление ядерных отходов и 1/3 – реакторная безопасность.. 27 сентября 2014 г. КИТ отметил свое 5-летие. В КИТ организованы Дом компетенций (House of Competence (HOC)) <http://www.hoc.kit.edu/index.php>, Дом технологий (Technology House (TEC)), Управление взаимоотношениями (Relationship Management (RSM)), подразделение внутреннего аудита Internal Auditing (REV) и Департамент инноваций (Innovation Department (IMA)) <http://www.innovation.kit.edu/english/45.php>. Также имеются отделы Развития и профессионального обучения персонала (Personnel Development and Vocational Training (PEVA)), Проектов, Процессов и управления качеством (Project, Process, and Quality Management (PPQ)) <http://www.ppq.kit.edu/english/index.php> и другие. Все отделы и подразделения представлены на [http://www.kit.edu/kit/english/service\\_units.php](http://www.kit.edu/kit/english/service_units.php).

КИТ участвует в программе Европейского консорциума по развитию термоядерной энергетики EUROfusion (<http://www.efda.org/2014/10/european-commission-launches-eurofusion/>), которая была запущена 9 октября 2014 г. Новое соглашение заменило 14 годовое Европейское соглашение о развитии термоядерного синтеза (EFDA), а также 29 двусторонних соглашений об ассоциации между Комиссией и научно-исследовательскими учреждениями в 27 странах. Формирование EUROfusion знаменует собой большой шаг вперед для Европы по развитию термоядерной энергии в качестве источника энергии, который будет способствовать удовлетворению растущего мирового спроса на энергоносители. Консорциум EUROfusion позволит национальным лабораториям Европы еще более эффективно объединить свои ресурсы для решения более сложных задач и масштабных проектов, таких как ИТЭР и ДЕМО.

Подготовка к такой совместной программе началась в 2012 году. Все научно-исследовательские лаборатории ЕС совместно разработали подробную целевую программу получения термоядерной энергии к 2050 году. В этой программе,

известной как «Дорожная карта к реализации термоядерного электричества» (*'Roadmap to the Realisation of Fusion Electricity'*) излагается наиболее эффективный путь к термоядерной энергии. К концу того же года она была одобрена всеми сторонами. Дорожная карта имеет две основные цели: подготовка к экспериментам ИТЭР и разработка концепции термоядерного демонстрационного реактора DEMO. Необходимые исследования в достижении этих целей осуществляются университетами и исследовательскими центрами в рамках текущей европейской Рамочной программы Horizon 2020. Данная программа больше, чем раньше включает промышленные отрасли в процесс проектирования компонентов и нахождения технических решений.

Через EUROfusion европейская программа термоядерных исследований будет иметь прямой доступ к различным европейским экспериментам, которые относятся к выполнению миссий дорожной карты. Самый большой в мире эксперимент по магнитному термоядерному синтезу, Совместный европейский тор (JET) в Кулхем, Великобритания, будет эксплуатироваться EUROfusion до 2018. JET, который часто называют "Маленький ИТЭР", уже прокладывает путь для ИТЭР и продолжит выполнение научной программы для нужд ИТЭР. Новая архитектура EUROfusion укрепляет лидирующие позиции Европы в термоядерных исследованиях за счет сильного центрального управления.

Институт нейтронной физики и реакторных технологий (INR - Institut fuer Neutronenphysik u. Reaktortechnik) Энергетического центра Технологического Института Карлсруэ вносит весомый экспериментальный и теоретический вклад в развитие сферы энергетики внутри Общества им. Гельмгольца. Его работа включает исследования в области "Ядерная безопасность" и "Термоядерные технологии" в Технологическом Институте Карлсруэ. Большая часть работы выполняется при сотрудничестве с Европейским сообществом и другими международными институтами. Впечатляет сотрудничество между наукой, образованием, промышленностью и экономикой.

Научная деятельность в области ядерной безопасности включает в себя как теоретические, так и экспериментальные исследования, сконцентрированные на аспектах безопасности ядерных реакторов и минимизации радиотоксичности при сгорании топлива. Анализ безопасности основан на моделировании основных переходных процессов, начиная с нормального режима работы и заканчивая аварийными ситуациями. Такой вид анализа осуществляется путем разработки и связи подходящих теплогидравлических и нейтронно - физических кодов вместе с инструментами вычислительной динамики жидкости (CFD - Computational Fluid

Dynamic). Проверка разработанных систем осуществляется с помощью проведения экспериментов.

В ходе выполнения научного исследования участвовал в работе научных семинаров INR, где обсуждались аспекты разработки промышленной электростанции и режимы плазмы. Исследование сфокусировано на некоторых важных физических вопросах, включая перспективы (реактор, нейтронный источник, материаловедение) систем с высокоэнергетичными (быстрыми) частицами. Уровень работ, проводимых по данной проблематике в МГТУ им. Н.Э. Баумана, соответствует аналогичным исследованиям за рубежом.

Список зарубежных коллег, с которыми приходилось контактировать в ходе стажировки:

Ульрих Фишер, 60 лет, Доктор, профессор, зам. директора Института нейтронной физики и реакторных технологий, Технологический Институт Карлсруэ (КИТ), Херманн-вон-Хельмгольц-Платц 1, 76344 Эггенштайн-Леопольдшафен, Германия (Dr. Ulrich Fischer, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institut fuer Neutronenphysik u. Reaktortechnik (INR), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany), +49-7247-82-3407, e-mail: ulrich.fischer@kit.edu, web: <http://www.fzk.de/inr>. Вопросы нейтронных источников, расчета blankets и термоядерных технологий.

Ингеборге Шварц, ~ 50 лет, секретарь INR, Херманн-вон-Хельмгольц-Платц 1, 76344 Эггенштайн-Леопольдшафен, Германия (Fr. Schwartz, Mrs I. Schwartz, Forschungszentrum Karlsruhe, INR, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany), +49 (0) 7247 82 2552, e.mail: ingeborg.schwartz@kit.edu. Помощь в оформлении пропуска, размещении, технические вопросы.

Культурная программа включала в себя экскурсию на виноградники винодельческий регион Пфальца) в пятницу 3 октября 2014 в День немецкого единства или День объединения Германии.

#### Основная часть

Обращенная магнитная конфигурация (ОМАК) [1-3] – одна из наиболее обещающих систем магнитного удержания плазмы, которая также может быть использована для синтеза замагниченной мишени или магнитно-инерционного синтеза [4]. Сравнение принципиальных возможностей ОМАК и токамака показывает значительные преимущества первого. В отличие от токамака ОМАК не имеет тороидального магнитного поля. Высокая плотность термоядерной мощности, следующая из больших значений  $\beta$  (отношения давления плазмы к энергии



магнитного поля), позволяет рассматривать ОМАК, как одного из кандидатов для термоядерных топлив, отличных от дейтерия-третия (D-T), так называемых альтернативных термоядерных топлив, таких как D-<sup>3</sup>He, p-<sup>11</sup>B, D-<sup>3</sup>He, p-<sup>6</sup>Li [5, 6]. Этот параметр в токамаках в 10 раз меньше, чем в ядерных реакторах, в то время как ОМАК может превысить этот предел. Более того, ОМАК имеет простую цилиндрическую геометрию с натуральным дивертором, что снимает ряд технологических проблем и обеспечивает инженерные преимущества при проектировании и строительстве демонстрационного реактора.

Таким образом, наиболее важными характеристиками устройства на основе ОМАК являются следующие:

- малые размеры и компактность устройства;
- потенциал прямого преобразования термоядерной энергии в электричество и высокая эффективность такого преобразования;
- относительно небольшая цена и легкое поддержание;
- возможность работы при высоких значениях  $\beta$  и большая, чем у других концепций магнитного синтеза, энергетическая плотность;
- возможность модификации плазменного объема (объема реакторного ядра) для получения лучших параметров плазмы.

Благодаря этим своим особенностям ОМАК находится под пристальным вниманием ученых. Наиболее важные результаты собраны в работах [7, 8]. В 1996 была утверждена международная исследовательская программа [9]. КИТ также работает над проектом ИТЭР [10] и гибридными системами [11].

На сегодня более подробно изучены как квазистационарные системы [12], так и импульсные установки [13]. Преимуществом таких энергетических систем являются компактность, меньшие потери, микронеустойчивости не успевают развиваться. Гидродинамические неустойчивости обуславливаются неоднородностью потоков. Проблема плазма-стенка не так актуальна. Проблемой могут являться примеси, но не в такой степени как в системах с металлическими и жидкими лайнерами. По сравнению с инерционными методами термоядерного синтеза – длительность импульса и удержание больше. Также достоинствами подобных систем и конфигураций являются: высокая частота подачи топлива, квазистационарность (обеспечивается лазерами или дополнительными системами нагрева), высокая степень выгорания – меньше требуется топлива, больше энерговыделения. Новизной и особенностью данной задачи является нахождение оптимальных методов обжигания – состав лайнера и конфигурации внешних драйверов, определение перспективных режимов сжатия по времени, требование к технике, которая обеспечивает это сжатие.

Ответом на вопрос - на сколько эффективно нагреваем и сжимаем мишень может являться диагностика по нейтронным потокам.

МИС – это концепция, альтернативная магнитному и инерционному термояду. Динамика плазменных струй является объектом изучения для ученых во всем мире в течение последнего десятилетия, в частности, потому что вариант плазменных струй обходит трудную инженерную и технологическую проблему чрезмерно быстрого сгорания электрода для твердотельных ударников (лайнеров) и медленной скорости имплозии в случае жидких или металлических лайнеров.

Научная и техническая выгода по проекту – специальное внимание уделено концепции магнитного удержания плазмы, которая обладает большим потенциалом для термоядерной электростанции и до сих пор имеет сильные позиции и занимает лидирующее положение в термоядерных исследованиях, как в Российской Федерации, так и в Европейском Союзе, США, Японии и т.д.. Развитие альтернативной энергетики - это путь к чистой и недорогой энергии, а применение улучшенных топливных циклов при высоких температурах в малорадиоактивной плазме может привести к альтернативным технологиям при производстве медицинских изотопов, источника нейтронов/протонов, освоении космоса (термоядерные двигатели, космические аппараты с термоядерными бортовыми установками) и т.д. [14, 15].

Для получения нейтронов в плотной плазме, необходимо сначала создать магнитное поле в плазме [16]. Есть несколько типов магнитных систем удержания плазмы, которые могут быть использованы для создания источника нейтронов [17], например, токамак [18], токамак с малым аспектным соотношением [19], сферический токамак [20], стелларатор [21], аксиально-симметричная магнитная ловушка [22], газодинамическая ловушка [23], зеркальная ловушка [24], обращенная магнитная конфигурация [25], плазменный фокус [26], пинч с обращенным полем [27], Z-пинч [28] и т.д. Обсуждаются также схемы инерционного термоядерного синтеза [29, 30]. Предлагаются, чтобы оценить перспективы применения, в том числе магнитно-инерционные системы синтеза [31], так и реакторы синтез-деления [32-34]. Одно из главных преимуществ данной схемы – потенциал использования прямого преобразования значительной части термоядерной энергии в электричество с высокой эффективностью (~60%). Это приведет к уменьшению баланса электростанции и теряемой теплоты, идущей на производство кВт полезной электрической энергии.

Аксиально-симметричная магнитная ловушка с инженерной точки зрения является очень выигрышной системой, благодаря её простоте. Открытые силовые линии в граничной области магнитных конфигураций также позволяют

использование прямого преобразования энергии синтеза заряженной частицы в электричество высокой эффективности. Вследствие этого, электростанция ядерного синтеза на основе магнитной системы удержания плазмы или установки магнитно-инерционного синтеза (МИС), могла бы быть экономически выгодной. Один из вариантов использования установок ядерного синтеза на основе магнитных систем на ближайшую перспективу – это термоядерный источник нейтронов с коэффициентом усиления мощности (отношение термоядерной мощности к подводимой)  $Q \sim 1$  для применения в качестве драйвера в субкритическом реакторе. Такой источник нейтронов может использоваться для преобразования долговечных ядерных отходов высокого уровня и т.д. Целью исследования является экспериментальное и теоретическое исследование в области высокотемпературной плазмы для систем ядерного синтеза на основе магнитных систем.

Проводившиеся в течение последних пяти десятилетий исследования по управляемому синтезу заложили прочную основу для понимания физики магнитного удержания плазмы, в частности, прояснили роль топологии магнитных полей (т.е. “открытых” и “замкнутых” конфигураций силовых линий) в удержании плазмы. Во всех без исключения замкнутых системах (таких, как токамаки, стеллараторы, пинчи с обращенным полем) время жизни плазмы определяется турбулентными процессами. Поэтому для положительного выхода энергии синтеза эти системы должны обладать такими гигантскими размерами, что их практическая целесообразность становится уже сомнительной. С другой стороны, есть примеры открытых (основанных на принципе магнитных пробок) систем, в которых турбулентные процессы, если и наблюдались, то на таком низком уровне, что практически не влияли на удержание плазмы. Например, в открытых системах с аксиально-симметричными магнитными полями скорость поперечного полю переноса соответствует предсказаниям классической теории. Это дает основание надеяться на то, что разработанные на их основе устройства могли бы быть гораздо компактнее, чем их замкнутые “собратья-конкуренты”.

В МИС проводящий лайнер сжимает замагниченный плазмоид (мишень), например сферомак или обращенную магнитную конфигурацию. Увеличение магнитного поля мишени приводит к уменьшению тепловой проводимости, а инерционность лайнера обеспечивает устойчивость и удержание переходной плазмы. Практически все предыдущие работы были сфокусированы на твердых или жидких ударниках (лайнерах). Данное исследование рассматривает динамику горения в реакторном режиме недавно предложенной концепции использования плазменных струй для формирования лайнера. Разработанные методы [35-37] являются

оригинальными и на них ссылаются иностранные коллеги при изучении МИС, работы по которому ведутся в основном в РФ, США, ФРГ и Японии.

В первую очередь, необходимо грамотное моделирование неучтенных ранее эффектов. Чрезвычайно важным эффектом, создаваемым быстрыми частицами, является увеличение скорости термоядерной реакции по сравнению с чисто максвелловской плазмой. Как показал предшествующий анализ, кинетика быстрых ионов является ключевым элементом моделирования систем на основе открытых магнитных ловушек.

Уравнение переноса нейтронов в системах синтеза схоже с уравнением переноса нейтронов в реакторах деления [Bell D., Glesston S., "Theory of nuclear reactors", Atomizdat, Moscow (1974), стр. 16 – «Теория ядерных реакторов»] или в диффузионном подходе [Ibidem, стр. 70] схоже с решением уравнения лучистого переноса [Кузенов В.В., Рыжков С.В., Препринт ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН № 942 (2010) или Ю. В. Афанасьев, Е.Г. Гамалий, В.В. Розанов, Труды ФИАН, Т.134 (1982), стр. 24]. То есть абсорбция или рассеивание обычно описывается диффузионным уравнением с коэффициентом абсорбции или рассеивания и может быть включено в нашу систему (с помощью метода [Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Acta Technica 56, T454-467 (2011)] в новой квазимонотонной модели или трассировкой лучей). Таким образом, мы можем создать непрерывную симуляцию для лазерной абсорбции, если мы знаем, сколько нейтронов высвободилось в каждой точке системы и энергетический спектр нейтрона (источник нейтронов с распределением энергии нейтронов на правой стороне уравнения).

Термоядерные режимы горения (коэффициент усиления мощности синтеза  $Q=1$ ) достижимы для масштабных систем, таких как современные токамаки. Величина  $Q=1$  приемлема для термоядерного источника нейтронов, основанного на реакциях синтеза-деления. Использование токамака с аспектным отношением  $A=3$  представляется проблематичным, так как его компактная геометрия затрудняет расположение нейтронной защиты. Поэтому предложено оптимизировать параметры и рассмотреть варианты источников нейтронов с аспектным отношением  $A > 3$ . Критериями оптимизации являются суммарная мощность нейтронов и поток термоядерных нейтронов в зоне деления. Чтобы увеличить скорость реакции и количество произведённых нейтронов, рекомендуется использовать введение быстрых нейтральных атомов. Нагрев плазмы при режимах, где  $Q=1$ , позволяет поддерживать значительное количество высокоэнергетических ионов (дейтерий и/или тритий), а также увеличивает скорость реакции в 3 раза (при этом тёплая плазма должна иметь температуру 10-20 кэВ). Суммарная энергия нейтронов является также критерием для того чтобы оптимизировать параметры инжекции.

Коллектив КИТ проводит теоретические и экспериментальные исследования, сконцентрированные на аспектах безопасности ядерных реакторов и минимизации радиотоксичности при сгорании топлива. Созданы методы и модели для изучения основных переходных процессов, начиная с нормального режима работы системы и заканчивая аварийными ситуациями. Разработаны теплогидравлические и нейтронно-физические коды, которые используются вместе с пакетами программ вычислительной гидродинамики CFD и транспортным кодом на основе метода Монте-Карло MCNP. Ведутся работы в рамках проектов EFDA, Euroatom, Eurofusion, источника нейтронов высокой мощности IFMIF и международного экспериментального термоядерного реактора ITER. КИТ участвует в совместных проектах и разработках со многими крупными научными центрами и организациями (AREVA, CEA, EDF и др.).

Основная область научных интересов зам. директора Института нейтронной физики и реакторных технологий КИТ, заведующего отделением нейтронной физики и ядерных расчетов Др. Ульриха Фишера сфокусирована на инженерной физике, как для ядерных реакторов, так и для магнитного термоядерного синтеза, включая проектирование и разработку коммерческой электростанции, преобразование энергии и нетрадиционные топливные циклы. Является руководителем и участвует в проектах EFDA (European Fusion Development Agreement - Европейское соглашение по развитию термоядерного синтеза), Euroatom (Евроатом), источника нейтронов высокой мощности IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) и международного экспериментального термоядерного реактора ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). КИТ участвует в совместных проектах и разработках со многими крупными научными центрами и организациями (AREVA, CEA, EDF и др.).

Предложено теоретическое улучшение схем для магнитного и магнитно-инерционного удержания плазмы высокой плотности в сильном магнитном поле (источник нейтронов и другие перспективные приложения) и новый квазимонотонный метод для сферической и цилиндрической компрессии плазменного образования для численного моделирования магнитно-инерционного удержания. Исследованы различные газодинамические режимы и возможность адиабатического сжатия.

## Заключение

В рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации на проведение в вузе научно-исследовательских работ № 11.9198.2014, куда входила и научная стажировка, было подготовлено несколько статей-докладов в трудах конференций [38-41], входящих в базу данных Scopus. Опубликована статья в журнале из перечня ВАК “Прикладная физика” [42] и получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617694 “Вычислительный комплекс NICA (Nonstationary Instruments and Codes for fusion Applications) - Нестационарные многомерные коды для решения задач магнитно-инерциального термоядерного синтеза” (зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности Российской Федерации 31 июля 2014 г.) [43].

Сотрудничество и взаимный обмен информацией о ведущихся исследованиях стало традицией во взаимоотношениях ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана и КИТ. Проект продемонстрировать взаимодействие и результаты очередного сотрудничества МГТУ им. Н.Э. Баумана и Технологического Института Карлсруэ. Полученная информация может быть применена для научных исследований в МГТУ и в дальнейшем использована в учебном процессе в качестве наработанного материала. Обмен научно-исследовательской информацией является одним из важнейших этапов развития отечественной науки.

По итогам стажировки можно сделать вывод о заинтересованности германских коллег в сотрудничестве с МГТУ им. Н.Э. Баумана и российскими коллегами в сфере науки и образования. Обсуждены возможные варианты совместных работ в рамках международных проектов. Полученный в ходе проекта и стажировки опыт и результаты (универсальность и междисциплинарность подходов, как в учебном процессе, так и в научно-исследовательской работе) могут быть использованы в дальнейших исследованиях, проводимых в НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана и на кафедрах факультета “Энергетическое машиностроение” МГТУ им. Н.Э. Баумана при подготовке магистерских диссертаций, курсовых и дипломных проектов, выпускных квалификационных работ и при работе с аспирантами.

## Список использованных источников

1. А.Г. Еськов, Н.П. Козлов, Р.Х. Куртмуллаев и др. Энергетический баланс в системе с квазисферической лайнерной компрессией // Письма в ЖТФ, 1983, т.9, в.1, с.38-41. Р.Х. Куртмуллаев, В.Н. Семенов, В.И. Хвесьюк, А.В. Яминский. “Динамика лайнерных систем”. Плазменные ускорители и ионные инжекторы. Издательство “Наука”. 1984. С. 250-263.
2. Рыжков С.В. Обращенная магнитная конфигурация и приложения высокотемпературной плазмы FRC // Прикладная физика. 2010. № 1. С. 47–54.
3. Steinhauer L.C. Review of field-reversed configurations // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. 070501.
4. Y.C. F. Thio, E. Panarella, R.C. Kirkpatrick et al. Magnetized Target Fusion in a Spheroidal Geometry with Standoff Drivers // in Current Trends in International Fusion Research, 113 (NRC Press, National Research Council of Canada, Ottawa, 1999).
5. J.F. Santarius, G.L. Kulcinski, L.A. El-Guebaly, and H.Y. Khater. Could Advanced Fusion Fuels Be Used with Today's Technology? // Journal of Fusion Energy 17, 33 (1998).
6. V.I. Khvesyuk, S.V. Ryzhkov, J.F. Santarius et al. // Fusion Technology 39, 410 (2001).
7. Куртмуллаев Р.Х., Малютин А.И., Семенов В.Н. Компактный тор // Итоги науки и техники. Физика плазмы. М.: ВИНТИ, 1985. Т. 7. С. 80-135.
8. Tuszewski M. Field reversed configurations // Nuclear Fusion. 1988. V. 28, № 11. P. 2033-2092.
9. Steinhauer L.C. et al. FRC 2001: A white paper on FRC development in the next five year // Fusion Technology, 1996, 30, 116.
10. Hesch K., Aktaa J., Antusch S. et al. TECHNOLOGY DEVELOPMENTS AT KIT TOWARDS A MAGNETIC CONFINEMENT fusion POWER PLANT // Fusion Sci. Technol. - 2012. - Vol. 61 (1T). - P. 64-69.
11. Anikeev A.V., Dagan R., Fischer U. Numerical model of the fusion-fission hybrid system based on gas dynamic trap for transmutation of radioactive wastes // Fusion Sci. Technol. - 2011. - Vol. 59 (1T). - P. 162-165.
12. Чирков А.Ю., Рыжков С.В., Багрянский П.А., Аникеев А.В., “Термоядерные режимы аксиально-симметричной открытой системы с мощной инжекцией быстрых частиц”. Прикладная физика. № 5, 2011. С. 57-63.
13. Костюков И.Ю., Рыжков С.В. Магнитно-инерциальный термоядерный синтез

- с лазерным обжатию замагниченной сферической мишени // Прикладная физика. 2011. № 1. С. 65–72.
14. Santarius J.F. Compression of a spherically Symmetric DT Plasma Liner onto a Magnetized DT Target // *Phys. Plasmas* 19, 072705 (2012).
  15. Ferrari H.E., Farengo R. Fusion particles and neutral beams in FRC reactors // *Fus. Sci. Technol.* - 2009. - Vol. 56. - P. 1512-1520.
  16. Kolb A.C. Magnetic compression of plasmas // *Rev. Mod. Phys.* - 1960. - Vol. 32. - P. 748 - 757.
  17. Gryaznevich M.P., Sykes A., Kingham D. et al. Options for a steady-state compact fusion neutron source // *Fus. Sci. Technol.* - 2013. - Vol. 61 (1T). - P. 89 - 94.
  18. Stacey W.M. Tokamak D–T fusion neutron source requirements for closing the nuclear fuel cycle // *Nucl. Fusion.* - 2007. - Vol. 47. - P. 217 - 221.
  19. Hong B.G. Conceptual study of a fusion-driven transmutation reactor based on low aspect ratio tokamak as a neutron source // *Fusion Sci. Technol.* - 2013. - Vol. 64. - P. 488 - 492.
  20. Sergeev V.Yu., Kuteev B.V., Bykov A.S. et al. Concept of the divertor of a fusion neutron source based on a spherical tokamak // *Plasma Phys. Rep.* - 2012. - Vol. 38. - P. 521 - 539.
  21. Moiseenko V.E., Noack K., Agren O. Stellarator-Mirror Based Fusion Driven Fission Reactor // *J. Fusion Energy.* - 2010. - Vol. 29. - P. 65 - 69.
  22. Ryutov D.D. Mirror type neutron source // *Plasma Phys. Contr. Fusion.* – 1990. - Vol. 32. - P. 999 - 1009.
  23. Noack K., Rogov A., Anikeev A.V. et al. The GDT-based fusion neutron source as driver of a minor actinides burner // *Ann. Nucl. Energy.* - 2008. - Vol. 35. - P. 1216 - 1222.
  24. Horton W., Pratt J., Molvik A.W. et al. Axisymmetric Tandem Mirror D-T Neutron Source // *ReNeW Whitepaper* (2009).
  25. Slough J. FRC Based Fusion Neutron Source for Materials Evaluation // *Fusion Sci. Technol.* - 2011. - Vol. 60. - P. 464 - 469.
  26. Klir D., Kubes P., Paduch M. et al. Search for thermonuclear neutrons in a mega-ampere plasma focus // *Plasma Phys. Contr. Fus.* - 2012. - Vol. 54. - P. 015001.
  27. Bathke C.G., Krakowski R.A., Miller R.L., and Werley K.A. The Reversed-Field-Pinch (RFP) Fusion Neutron Source: A Conceptual Design // *J. Fusion Energy.* - 1989. - Vol. 8. - P. 249 - 268.
  28. A.L. Velikovich, R.W. Clark, J. Davis et al. Z-Pinch plasma neutron sources // *Phys. Plasmas.* - 2007. - Vol. 14. - P. 022701.



29. Н.Г.Басов, В.А.Бойко, С.М.Захаров, О.Н.Крохин, Г.В.Склизков. Генерация нейтронов в лазерной  $CD_2$ -плазме, нагреваемой импульсами наносекундной длительности. Письма в ЖЭТФ, 13, 691-694, 1971.
30. Jung D., Falk K., Guler N. et al. Characterization of a novel, short pulse laser-driven Neutron Source // Phys. Plasmas. - 2013. - Vol. 20. - P. 056706.
31. Ryzhkov S.V., Chirkov A.Yu., Ivanov A.A. Analysis of the compression and heating of magnetized plasma targets for magneto-inertial fusion // Fus. Sci. Technol. - 2013. - Vol. 63 (1T). - P. 135 - 138.
32. Slough J., Kirtley D., Pihl C. et al. The pulsed high-density frc as a neutron source for fusion-fission hybrid applications // Proc. of the Fusion-Fission Research Workshop. - Gaithersburg, MD, 2009. - Chapter 4. - P. 1 - 6.
33. Mirnov S.V. From pure Fusion to Fusion-fission Demo tokamaks // Plasma Phys. Contr. Fus. - 2013. - Vol. 55. - P. 045003.
34. Wang X.-H., Guo H.-P., Mou Y.-F. et al. Measurement of tritium production rate distribution for a fusion-fission hybrid conceptual reactor // Chin. Phys. C. - 2013. - Vol. 37. - P. 056202.
35. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. Developing the numerical model for studying laser-compression of magnetized plasmas // Acta Technica 56, T454 (2011).
36. Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V. The Plasma Jet/Laser Driven Compression of Compact Plasmoids to Fusion Conditions // Journal of Fusion Energy 31, Iss. 1, 7 (2012).
37. Кузенов В.В., Рьжков С.В., “Двумерное радиационно-гидродинамическое моделирование сжатия плазменной мишени, находящейся во внешнем магнитном поле” Тезисы докладов XLI Межд. (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2014. С. 132.
38. S.V. Ryzhkov, V.V. Kuzenov, P.A. Frolko, “Innovative Concept of the Compression and Heating of the Plasma Targets in the Scheme for Magneto-Inertial Fusion”, 25<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conference – IAEA CN-221. 13-25 October 2014, Saint Petersburg. PD/P6-1.
39. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. “Regimes of Heating and Compression in Magneto-Inertial Fusion”. International Heat Transfer Conference 15 (IHTC-15). Kyoto, Japan. August 10-15<sup>th</sup> 2014. IHTC15-9662. ISBN for IHTC-15 Proceedings: 978-1-56700-421-2.
40. V.V. Kuzenov, S.V. Ryzhkov, “Laser-Driven Implosion of Target Plasma Using Externally Applied Magnetic Field” 41st EPS Conference on Plasma Physics. 23-27 June 2014, Berlin. P1.090. <http://ocs.ciemat.es/EPS2014ABS/pdf/P1.090.pdf>

41. V.V. Kuzenov, P.A. Frolko, S.V. Ryzhkov, "Computer Modeling of the Compression and Heating of a Magnetized Plasma Target for Magneto-Inertial Fusion" Book of abstract 1-04. P. 20. International Conference-School on Plasma Physics and Controlled Fusion and The Adjoint Workshop "Nano- and micro-sized structures in plasmas" Kharkiv, Ukraine, September 15-18, 2014.
42. 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.
43. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617694 "Вычислительный комплекс NICA (Nonstationary Instruments and Codes for fusion Applications) - Нестационарные многомерные коды для решения задач магнитно-инерциального термоядерного синтеза" (зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности Российской Федерации 31 июля 2014 г.).

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2014617694**

**Вычислительный комплекс NICA (Nonstationary Instruments and Codes for fusion Applications) - Нестационарные многомерные коды для решения задач магнитно-инерциального термоядерного синтеза**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (RU)*

Авторы: *Кузенов Виктор Витальевич (RU),  
Рыжков Сергей Витальевич (RU)*

Заявка № **2014613036**

Дата поступления **08 апреля 2014 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **31 июля 2014 г.**



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Б.П. Симонов*

1-04

## COMPUTER MODELING OF THE COMPRESSION AND HEATING OF A MAGNETIZED PLASMA TARGET FOR MAGNETO-INERTIAL FUSION

V.V. Kuzenov, P.A. Frolko, S.V. Ryzhkov

*Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russia  
E-mail: ryzhkov@power.bmstu.ru*

Perspective high energy density systems such as different sources of neutrons and protons will be used in the near future to perform cutting-edge materials research, non-destructive analysis, medical isotope production, chemical waste disposal, train personnel, etc. The goal of the investigation is complex numerical research and optimization of the pulsed high-temperature processes in a dense magnetized plasma (target). Distinctive feature of this problem is the presence of initial seed fields (the imposed external pulse magnetic field) and compression of a magnetic flux by laser beams (laser driver) or plasma jets (plasma liner). An embedded magnetic field is compressed along with the target plasma to achieve magnetic insulation. The presence of the megagauss magnetic field strongly inhibits electron thermal conduction losses by several orders of magnitude. The electron and ion thermal conductivity coefficients in the case of magnetized plasma are calculated. Regimes of quasi-spherical plasma at the final stage of compression are presented.

Radiation magneto-hydrodynamic model of the interaction of powerful sources with a magnetized plasma is presented. An improved two-dimensional radiation-gasdynamics code NICA (Nonstationary Instruments and Codes for fusion Applications) which simulates plasmas in cylindrical or spherical geometries is created. New program takes into account radiation transport in multi-group diffusion approach. Since the most stringent requirements for the plasma parameters in the final stage of compression, here are the results of the evaluations just for this regime. For the calculations we take  $T_i = T_e$ . We considered two limiting cases. In the first case takes into account both longitudinal and transverse losses in the second case transverse losses are neglected. It is obvious that the second case is preferable, but the question of how much turbulent transverse losses can be suppressed, of course, requires further detailed study.

Modeling of a magnetized plasma compressed by the laser beams and plasma jets is described. The plasma jet/laser driven compression of compact plasmoids to fusion conditions is investigated. External and spontaneous magnetic fields are taken into account. For magneto-inertial fusion (MIF), the liner heating by fusion products, especially of the liner's inner layer, called the "afterburner," will be very important for evaluating whether significant fusion energy can be generated in this layer. Parameters of an afterburner, plasma liner and magnetized target are presented.

This study was supported by the German Academic Exchange Service (DAAD A/13/74271) and Russian Ministry of Education and Science (Projects № 11.9198.2014, and № 13.79.2014/K).

### References

1. S.V. Ryzhkov. The behavior of a magnetized plasma under the action of laser with high pulse energy // *Problems of atomic science and technology*. 2010, №4, p.105-110.
2. I.Yu. Kostyukov, S.V. Ryzhkov. Magneto-inertial fusion with laser compression of a magnetized spherical target // *Plasma Physics Reports*. 2011, v.37, №13, p.1092-1098.
3. A.Yu. Chirkov, S.V. Ryzhkov. The plasma jet/laser driven compression of compact plasmoids to fusion conditions // *Journal of Fusion Energy*. 2012, v.31, Issue 1, p.7-12.
4. V.V. Kuzenov, S.V. Ryzhkov. Numerical modeling of magnetized plasma compressed by the laser beams and plasma jets // *Problems of Atomic Science and Technology*. 2013, №1 (83), p.12-14.
5. S. V. Ryzhkov. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. 2014, 78, No. 5, 456-461.
6. V.V. Kuzenov, S.V. Ryzhkov. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2013, №4 (86), 103.



## Laser-Driven Implosion of Target Plasma Using Externally Applied Magnetic Field

V.V. Kuzenov, S.V. Ryzhkov

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

The concept of fast ignition is one of the most promising approaches to nuclear fusion. It is based on the principle of separation of the ICF target compression ("slow" adiabatic compression) and the process of thermonuclear ignition of a deuterium-tritium mixture ("rapid" heating of the target and thermonuclear combustion wave initiation - the compression shock waves initiate fusion in the target). Such method allows to minimize the D-T plasma energy at 20 - 50 kJ for the ignition threshold and 0.3 - 1 MJ for the fusion initiation with high gain.

We propose the scheme of magneto-inertial fusion (MIF) [1-4] for the first stage of "fast ignition". MIF has the advantages of both fusion concepts - high energy density as inertial confinement fusion (ICF) and the thermal insulation of a plasma as magnetic confinement fusion (MCF). The scheme of laser-driven MIF is based on the general idea of adiabatic compression/acceleration of the target material by pulsed laser (laser driver). The target consists of a pre-formed low-temperature plasma target and the magnetic field is "frozen" into the plasma.

Two-dimensional radiation-hydrodynamics model of compression of the plasma target placed in an external magnetic field is created. Code PLUM (Plasma jets and Laser driven Universal Model) is used for the numerical simulation. Physical model and results of numerical simulation of the laser-driven implosion of target plasma in the presence of an external magnetic field are discussed.

The work is funded in part by Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project № 11.9198.2014) and by the German Academic Exchange Service (DAAD) within the Joint program "Mikhail Lomonosov".

### References

- [1]. S.V. Ryzhkov, "The behavior of a magnetized plasma under the action of laser with high pulse energy," *Probl. Atom. Sci. Tech. Series "Plasma Electronics and New Methods of Acceleration"* №4 (7), 105-110 (2010)
- [2]. V.V. Kuzenov, S.V. Ryzhkov, "Developing the numerical model for studying laser-compression of magnetized plasmas," *Acta Technica* 56, T454-467 (2011)
- [3]. V.V. Kuzenov, S.V. Ryzhkov, *Probl. Atom. Sci. Tech. Series "Plasma Physics"* № 1 (83), 12-14 (2013)
- [4]. V.V. Kuzenov, S.V. Ryzhkov, *Probl. Atom. Sci. Tech. Series "PENMA"* № 4 (86), 103-107 (2013)

## Физика плазмы и плазменные методы

УДК 533.9

### Определение термодинамических свойств замагниченной плазмы на основе модели Томаса–Ферми

В.В. Кузенов, С.В. Рыжков, В.В. Шумаев

*Работа посвящена разработке методов расчета термодинамических и транспортных свойств замагниченной термоядерной плазмы на основе модели Томаса–Ферми. Выполненные в работе оценки и расчеты показали, что магнитное поле со значениями индукции  $B < 10^7$  Гс оказывает влияние только на транспортные свойства плазмы, но не изменяет вид внутренних оболочек атомов и ионов. Получены распределения потенциала Томаса–Ферми по радиусу атомной ячейки для плазмы золота, а так же изотермы давления в зависимости от плотности.*

PACS: 52.25.Fi, 52.25.Kn, 52.25.Xz, 52.65.-y

Ключевые слова: модель Томаса–Ферми, замагниченная плазма, магнитное поле, термодинамические и транспортные свойства плазмы.

#### Введение

В исследованиях, посвященных тематике управляемого термоядерного синтеза, одной из важных задач является задача, связанная с описанием термодинамических и транспортных свойств замагниченной плазмы (при температуре  $T > 0,001$  кэВ, плотности  $10^{-3} < \rho < 10^3$  г/см<sup>3</sup>,  $B < 10^7$  Гс =  $10^3$  Тл).

Для её математического описания используется приближенный метод, который основывается на обобщении (на случай ненулевой температуры [1] и внешнего магнитного поля [2, 3]) статистического метода Томаса–Ферми. Данный метод отличается простотой (например, по сравнению с методом Хартри–Фока–Слэтера [4]). При этом он обеспечивает приемлемую для практики точность, особенно при учете квантовых, обменных и осцилляционных поправок [4]. Одной из причин выбора квантово-статистической модели (модели Томаса–Ферми) в качестве рабочей является то, что в рассматриваемом диапазоне плотностей и температур возможно возникновение вырожденного состояния электронного газа.

В модели вещества Томаса–Ферми [1] принимается, что отсутствует различие между «свободными» и «связанными» электронами, вещество считается состоящим не из ионов и электронов, а из ядер и электронов. Энергия взаимодействия частиц, составляющих вещество, определяется электронами. Термодинамические свойства термоядерной плазмы рассчитываются на основе модели локального термодинамического равновесия (ЛТР). Для

систем большого числа не взаимодействующих между собой ядер считается выполненной статистика Больцмана. При этом вклад ядер (для высоких температур) в давление  $P_n$  и удельную внутреннюю энергию  $E_n$  соответствует вкладу обычного одноатомного идеального газа.

При вычислении электронных частей энергии и давления термоядерной плазмы применяется модель ЛТР, в соответствии с которой вещество разбивается на систему атомных ячеек, каждая из которых содержит  $Z$  электронов и ядро с зарядом  $Ze$  ( $e$  – заряд электрона). Электроны в атомной ячейке рассматриваются как газ (к которому применима статистика Ферми–Дирака), находящийся в достаточно медленно меняющемся по радиусу самосогласованном электростатическом поле  $V(r)$ , обусловленном зарядом ядра и самих электронов.

#### Постановка краевой задачи для уравнения Томаса–Ферми для случая атомарной смеси веществ и вычисление термодинамических функций

Вычисление потенциала Томаса–Ферми  $V(r)$  в пределах атомной ячейки в случае смеси веществ сводится к решению системы нелинейных, сферически-симметричных уравнений Пуассона с соответствующими граничными условиями [4]:

$$\frac{d^2}{dx^2} \phi_i(x) = a_i x I_{1/2} \left( \frac{\phi_i}{x} \right), \quad (i = 1, 2, \dots, N),$$

$$\phi_i(0) = \frac{Z_i}{\theta r_{0i}}, \quad \phi_i(1) = \frac{d\phi_i}{dx} \Big|_{x=1} = \frac{\mu_i}{\theta},$$

$$a_i = \frac{4\sqrt{2\theta}}{\pi} r_{0i}^2, \quad r_{0i} = 1,388 \left( \frac{A_i}{\rho_i} \right)^{\frac{1}{3}}.$$

Кузенов Виктор Витальевич, доцент.  
Рыжков Сергей Витальевич, доцент.  
Шумаев Вячеслав Витальевич, студент.  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана.  
Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5/1.  
Тел.: (499)263-65-70. E-mail: chubchic@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15 мая 2014 г.  
© Кузенов В.В., Рыжков С.В., Шумаев В.В., 2014

спинов электронов или атомов в термоядерной плазме.

Магнитное поле  $B \sim 10^8$  Гс, в котором энергия магнитного момента  $\mu B$  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 в данной работе магнитные поля существенно меньше значений  $B \sim 10^{13}$  Гс, поэтому

имеется возможность пренебречь релятивистскими эффектами.

### Результаты расчета

Ниже (рис. 1) приведены распределения потенциала Томаса–Ферми по радиусу атомной ячейки для золота плотности  $1 \text{ г/см}^3$  при температуре  $1 \text{ кэВ}$ .

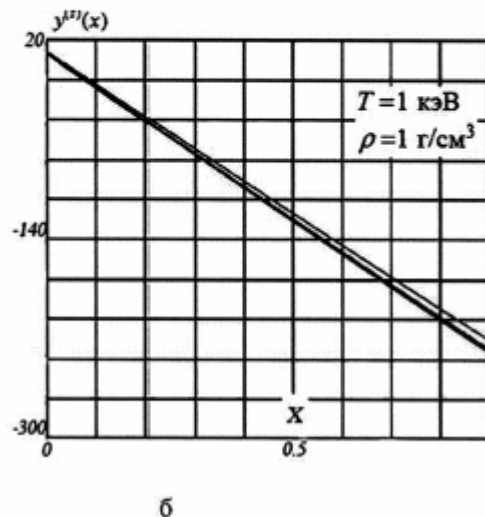
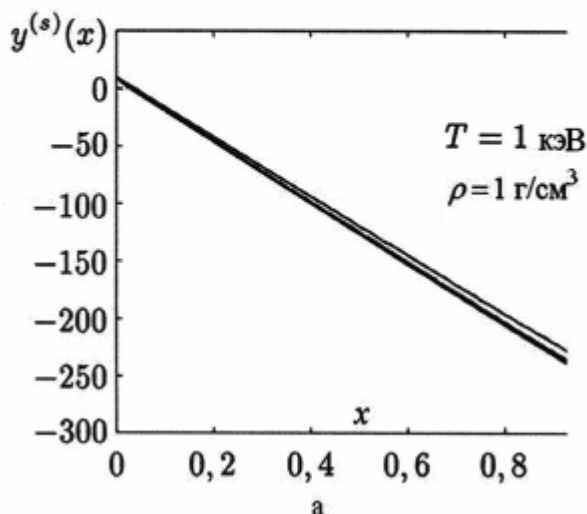


Рис. 1. Последовательные приближения функции  $y^{(s)}(x) = \theta \cdot \phi^{(s)}(x)$  для золота при плотности  $1 \text{ г/см}^3$  и температуре  $T=1 \text{ кэВ}$ : а – результаты [4], б – получено авторами.

Таким образом, можно отметить, что в рассматриваемом диапазоне температур и плотностей результаты данной работы хорошо соотносятся с известными литературными данными [4]. Ниже (рис. 2) представлено распределение давления плазмы в зависимости от плотности  $\rho$  и температуры  $T$ .

расчеты показали, что магнитное поле до  $10^7$  Гс оказывает влияние только на транспортные свойства плазмы, но не изменяет вид внутренних оболочек атомов и ионов. Для плазмы золота найдены распределения потенциала Томаса–Ферми, зависящие от радиуса атомной ячейки. Рассчитано давление плазмы золота в зависимости от её температуры и плотности.

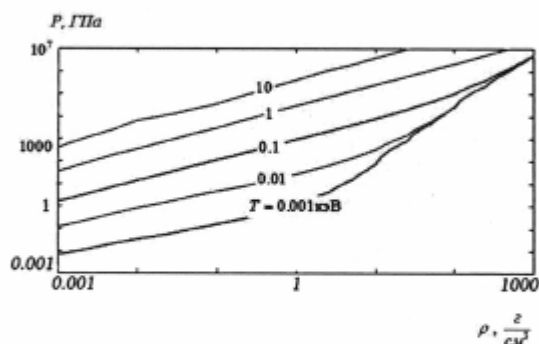


Рис. 2. Изотермы давления в зависимости от плотности по модели Томаса–Ферми для золота.

### Заключение

Проведенные тестовые расчеты в диапазоне температур ( $T \approx 1 \text{ кэВ}$ ) и плотностей ( $\rho = 10^{-2} \div 10^3 \text{ г/см}^3$ ) удовлетворительно соответствуют известным литературным данным [4]. Выполненные в работе оценки и

Один из авторов (СВР) выражает благодарность Германской службе академических обменов (DAAD) и Министерству образования и науки Российской Федерации (госзадание на проведение научно-исследовательских работ № 11.9198.2014).

### Литература

1. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных явлений гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966.
2. Смирнов С. Г., Халин С. А. // Тр. 5-й межд. конф. «Забабахинские научные чтения», РФЯЦ – ВНИИТФ. 1998. С. 310–315.
3. Tomishima Y., Yonei K. // Progress of Theoretical Physics. 1978. V. 59. No. 3. P. 683.
4. Никифоров А. Ф., Новиков В. Г., Уваров В. Б. Квантостатистические модели высокотемпературной плазмы и методы расчёта росселандовых пробегов и уравнений состояния. – М.: Физматлит. 2000.
5. Potekhin A. Y., Chabrier G. // Astron. Astrophys. 2013. V. 550. A43.
6. Либерман М. А., Яоханссон Б. // УФН. 1995. Т. 195. С. 121.
7. Чирков А. Ю. Введение в физику плазмы. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.