

На правах рукописи



БЕРЕНДЕЕВ Евгений Андреевич

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЫ
В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ-МИШЕНЯХ**

Специальность 05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор,
Вшивков Виталий Андреевич

Официальные оппоненты: **Жуков Владимир Петрович**
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИВТ СО РАН), старший научный сотрудник

Шайхисламов Илдар Фаритович
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН), и.о. зам. директора

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

Защита диссертации состоится 10 октября 2017 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 003.061.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВМиМГ СО РАН, тел. +7 (383) 330-71-59, www.icmmg.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИВМиМГ СО РАН: www.icmmg.nsc.ru

Автореферат разослан 30 мая 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 003.061.02,
при ИВМиМГ СО РАН, д.ф.-м.н.



Сорокин
Сергей Борисович

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена построению численной модели динамики плазмы в ловушке-мишени на основе кинетического подхода и метода Монте-Карло, разработке численных методов решения полученных уравнений и созданию реализующих их программ, а также проведению численных экспериментов для исследования основных характеристик мишенной плазмы, используемой для нейтрализации высокоэнергетичных пучков отрицательных ионов.

Актуальность работы. Известно, что одним из методов накопления и нагрева высокотемпературной плазмы, удерживаемой магнитным полем, является инжекция мощных пучков нейтральных атомов. Для получения атомарных пучков высокой энергии необходимо пучки ускоренных отрицательных ионов пропускать через нейтрализующую мишень. В ИЯФ СО РАН предложена уникальная линейная осесимметричная плазменная ловушка с инверсными пробками (с обратным магнитным полем) и мультипольными магнитными стенками, позволяющими жёстко удерживать частицы плазмы (кроме осевых). Пролёт пучка через плазму может обеспечить более 85% выхода нейтральных атомов, в то время как для газовых мишеней он не превышает 55%.

Получить более глубокие знания о явлениях, которые сопровождают удержание плазмы в ловушке, и описать их количественные характеристики, возможно на основе адекватных исследуемым процессам численных моделей. Наиболее полное описание можно получить на основе кинетических моделей, в которых плазма представляется набором достаточно большого числа модельных частиц.

Программные комплексы, используемые для моделирования процессов в низкотемпературной плазме, представляют большую коммерческую ценность при разработке технологических плазменных систем. Поэтому работы по детальному моделированию низкотемпературной плазмы в значительной степени сконцентрированы в корпоративных исследовательских центрах и охраняются в режиме коммерческой тайны. В частности, из общедоступных коммерческих систем для численного моделирования можно отметить пакет COMSOL MULTIPHYSICS, в последнюю версию которого включен модуль для моделирования плазмы в приближении магнитной гидродинамики, не позволяющий учесть кинетические эффекты. Моделирование динамики и кинетики реакций нейтрального водорода в низкотемпературной плазме развивается в лабораториях, исследующих взаимодействие горячей плазмы с поверхностью. К ним, например, относятся Монте-Карло коды EREINE, (Юлих, Германия) и DEGAS2, (Принстон, США). Также существует ряд пакетов программ для моделирования физики плазменных процессов методом частиц в ячейках: KARAT, CFHALL, VORPAL, DEMOCRITUS, MAGIC, код OSIRIS, код QUICKPIC.

Однако, несмотря на обилие численных методов и программ для моделирования плазмы, при решении каждой конкретной задачи необходимо разрабатывать новый подход, учитывающий все особенности моделируемого явления. В данной работе для численного моделирования динамики плазмы в ловушке используется комбинированный подход на основе метода частиц в ячейках и метода Монте-Карло.

Цилиндрическая геометрия рассматриваемой ловушки требует для описания динамики плазмы модификации имеющихся стандартных подходов в методе частиц. Наиболее широко используемые ядра частиц, такие как РС-ядро и параболическое, симметричны, поэтому в недекартовых системах координат центр масс частиц не совпадает с центром ячейки, что приводит к существенным искажениям плотности плазмы вблизи оси. Использование других ядер затруднено тем, что для них вычисление плотности тока и плотности заряда частицы на сетке не согласованы, что в свою очередь требует коррекции значений электрического поля, полученных из решения уравнений Максвелла. Несмотря на то, что решению проблемы вычисления тока в методе частиц в ячейках посвящено множество работ, на сегодняшний день универсального подхода, позволяющего корректно восстанавливать значения плотности тока на сетке для произвольного ядра, не существует.

Цель диссертационной работы заключается в построении численной модели для описания динамики плазмы в ловушке-мишени, разработке экономичных вычислительных схем метода частиц в ячейках с применением методики распределенных вычислений на суперЭВМ и исследовании на основе вычислительных экспериментов основных закономерностей плазменных процессов в ловушке.

Для достижения этой цели были поставлены и решены **следующие задачи:**

- 1) создание на основе комбинации метода частиц и метода Монте-Карло численных методов решения основных уравнений динамики заряженных частиц в цилиндрической системе координат;
- 2) адаптация разработанных алгоритмов для проведения параллельных вычислений на вычислительных комплексах современной архитектуры;
- 3) создание комплекса программ для расчёта динамики плазмы в ловушке-мишени на суперЭВМ;
- 4) с помощью серии вычислительных экспериментов изучение динамики многокомпонентной плазмы в ловушке с инверсными магнитными пробками и мультипольными магнитными стенками применительно к условиям лабораторных экспериментов.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Создана новая численная модель, построенная с применением комбинации метода частиц в ячейках и метода Монте-Карло, позволяющая

наравне с кинетическими эффектами учесть процессы ионизации и рассеяния.

2. Создан новый универсальный численный метод расчёта плотности тока при движении частиц в цилиндрической системе координат, удовлетворяющий разностному аналогу уравнения неразрывности.

3. Разработан новый метод балансировки вычислительной нагрузки для алгоритма параллельных вычислений метода частиц в ячейках, обеспечивающий высокую масштабируемость распределённых вычислений.

4. С помощью созданного комплекса программ проведены численные расчёты динамики плазмы в ловушке мишенного типа, разработанной в ИЯФ СО РАН. Показано, что магнитная система со слабым продольным полем и инверсными магнитными пробками в торцевых отверстиях позволяет минимизировать поток плазмы из ловушки. Установлено, что профили плотности всех компонент плазмы в области инверсной магнитной пробки имеют ступенчатую структуру.

Методы исследования. В работе используются методы вычислительной математики и математического моделирования, элементы теории разностных уравнений, элементы теории вероятности и математической статистики, метод частиц в ячейках. Разработка программного обеспечения проводилась на основе языка Fortran и Message Passing Interface (MPI).

Научная и практическая ценность работы состоит в создании новых численных методов для моделирования плазмы в магнитном поле сложной конфигурации в цилиндрической системе координат, а также комплекса программ для проведения расчётов основных характеристик плазмы в ловушке. Созданные алгоритмы и комплекс программ могут найти широкое применение при проектировании новых магнитных ловушек, а также при исследовании фундаментальных свойств плазмы в сильных магнитных полях и в работах, направленных на изучение эффективности удержания плазмы в магнитном поле.

Представленные в диссертации исследования проводились в рамках проектов, поддержанным Российским Фондом Фундаментальных исследований (№ 14-01-00392, № 16-31-00304, № 16-01-00209), в том числе под руководством Берендеева Е. А. (№ 14-01-31220), а также по грантам Российского Научного Фонда (№ 14-11-00485, № 16-11-10028).

Достоверность результатов

Достоверность представленных результатов основана на применении обоснованных численных моделей, верифицированных на специальном наборе тестовых задач, устойчивостью и сходимостью используемых численных схем, сравнением результатов моделирования с результатами лабораторных экспериментов.

Разработанный комплекс программ имеет модульную структуру, что позволило провести тестирование каждого модуля независимо.

Получена сходимость решения на сгущающихся сетках и при увеличении числа модельных частиц.

Проведены вычислительные эксперименты для сравнения с аналитическими решениями на тестовых задачах, выполнено сравнение с экспериментальными данными.

Результаты численных расчётов имеют качественное соответствие с данными, полученными в результате лабораторных экспериментов.

На защиту выносятся

- численная модель, построенная с применением комбинации метода частиц в ячейках и метода Монте-Карло, описывающая нелинейную динамику плазмы в ловушке-мишени с мультипольными магнитными стенками и инверсными магнитными пробками,
- численный метод нахождения плотности тока при движении частиц в цилиндрической системе координат, позволяющий согласовать плотность тока и плотность заряда без дополнительных коррекций,
- метод балансировки вычислительной нагрузки для алгоритма параллельных вычислений с эйлерово-лагранжевой декомпозицией, позволяющий существенно сократить время вычисления траекторий частиц в магнитных полях сложной геометрии,
- комплекс программ для моделирования динамики плазмы и результаты численного моделирования, позволившие оценить потери плазмы из ловушки-мишени применительно к условиям лабораторных экспериментов.

Апробация основных положений работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на объединённом семинаре ИВМиМГ СО РАН, на семинаре ИВТ СО РАН «Законы сохранения и инварианты для уравнений гидродинамического типа», на семинаре «Математическое моделирование в механике» ИТПМ СО РАН, на II международной научно-технической конференции "Высокопроизводительные вычисления НРС-UA" (2012, Киев (Украина)), V международной молодёжной научной школе-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач" (2013, Новосибирск), VII Международной научной конференции "Параллельные Вычислительные Технологии (ПаВТ)" (2013, Челябинск), VII Всероссийской конференции "Актуальные проблемы прикладной математики и механики", посвящённой памяти академика А.Ф. Сидорова. (2014, Абрау-Дюрсо), The International Workshop Complex Plasma Phenomena in the Laboratory and in the Universe (2015, Rome (Italy)), Международной конференции "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики – 2015", посвященной 90-летию со дня рождения академика Гурия Ивановича Марчука, Sixth Conference on Numerical Analysis and Applications (2016, Rouse (Bulgaria)).

Основные результаты опубликованы в 18 работах, из которых 6 в журналах, рекомендованных ВАК.

Личный вклад соискателя заключается в обсуждении постановки задачи, разработке численной модели, численных алгоритмов и методов решения, создании и тестировании программ, проведении серии численных экспериментов и анализе полученных результатов. Все выносимые на защиту результаты принадлежат лично автору. Представление результатов совместных исследований и разработок согласовано с соавторами.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав и заключения. Список используемой литературы содержит 127 наименований (включая 18 публикаций автора). Текст диссертации содержит 102 страницы машинописного текста, включая 25 рисунков и 2 таблицы.

Основное содержание работы

Во **введении** обосновываются актуальность избранной темы, новизна ее изучения, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, формулируются выносимые на защиту положения, описывается апробация результатов работы, дается краткая характеристика структуры диссертации.

Глава 1 посвящена построению численной модели плазменной ловушки-мишени, разработанной в ИЯФ СО РАН, и описанию численных методов решения основных уравнений.

В первом параграфе первой главы приведено подробное описание ловушки-мишени, рассмотрены основные её характеристики, определяются основные критерии для построения корректной численной модели. На рисунке 1 показана схема магнитной системы рассматриваемой ловушки.

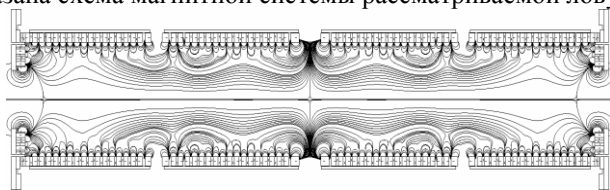


Рис. 1 Картина силовых линий магнитного поля в плазменной ловушке-мишени.

Из рисунка 1 видно, что магнитное поле на торцах ловушки образует инверсные пробки, которые препятствуют истечению плазмы из ловушки.

Во втором параграфе первой главы выполнен обзор основных численных моделей, применяющихся для описания динамики плазмы, обоснован выбор модели, основанной на комбинации метода частиц в ячейках и метода Монте-Карло.

Динамика плазмы описывается системой уравнений, состоящей из урав-

нения Больцмана для функций распределения ионов и электронов $f_\alpha(t, \vec{r}, \vec{p})$

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{r}} + q_\alpha (\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v}, \vec{B}]) \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{p}} = St\{f_\alpha\}, \quad (1)$$

и системой уравнений Максвелла с самосогласованными электромагнитными полями:

$$rot \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{J} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \sum_\alpha q_\alpha \int f_\alpha \vec{v} d\vec{v} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$rot \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (3)$$

$$div \vec{E} = 4\pi\rho = 4\pi \sum_\alpha q_\alpha \int f_\alpha d\vec{v}, \quad (4)$$

$$div \vec{B} = 0. \quad (5)$$

Здесь α – сорт частиц (ионы и электроны); $\vec{r}$, $\vec{v}$ – координата и скорость частицы; q_α – заряд частицы сорта α ; $\vec{E}$ и $\vec{B}$ – напряжённость электрического и магнитного поля; c – скорость света; $\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ –

релятивистский импульс частицы массы m ; $\vec{J}$ – плотность тока; ρ – плотность пространственного заряда. $St\{f_\alpha\}$ – функция, описывающая коллективные процессы столкновения. Рассматриваемые уравнения приведены в системе СГС для вакуума.

В третьем параграфе первой главы приведено подробное описание метода частиц в ячейках.

Общая идея метода состоит в следующем. Плазма разделяется на группы частиц, находящихся в одном единичном объеме фазового пространства. Каждая из таких групп рассматривается как одна макрочастица. Функция распределения и макропараметры плазмы восстанавливаются из положения модельных макрочастиц в фазовом пространстве. Исходя из функции распределения частиц, определяются плотности тока и плотности заряда, необходимые для решения уравнений Максвелла. Движение частиц описывается следующими уравнениями:

$$\frac{d\vec{r}_j(t)}{dt} = \vec{v}_j(t), \quad (6)$$

$$\frac{d\vec{p}_j(t)}{dt} = q_j \left(\vec{E}_j(t) + \frac{1}{c} [\vec{v}_j(t) \times \vec{B}_j(t)] \right), \quad (7)$$

В четвёртом параграфе первой главы рассматривается моделирование столкновения заряженных частиц с нейтральными с помощью метода Монте-Карло.

Вероятность столкновения для частицы, имеющей скорость v , за время Δt рассчитывается по формуле:

$$P = 1 - \exp(-\Delta s \sigma_T(\varepsilon) n_{H_2}), \quad (8)$$

где $\Delta s = v \Delta t$, $\sigma_T(\varepsilon)$ – полное сечение столкновения, ε – кинетическая энергия частицы, n_{H_2} – плотность нейтрального газа.

На каждом шаге по времени по формуле (8) определяется, произошло ли столкновение для каждой заряженной частицы. В случае, если столкновение произошло, определяется тип столкновения, и затем рассчитываются новые параметры частиц.

В пятом параграфе приведена общая схема вычислений при моделировании динамики плазмы с помощью комбинации метода частиц и метода Монте-Карло.

Глава 2 посвящена описанию численных методов решения основных уравнений.

Для решения уравнения (7) используется центрированная разностная схема:

$$\frac{\vec{p}^{m+1/2} - \vec{p}^{m-1/2}}{\Delta t} = q_\alpha \left(\vec{E} + \left[\frac{\vec{v}^{m+1/2} + \vec{v}^{m-1/2}}{2}, \vec{B} \right] \right) \quad (9)$$

Здесь Δt – дискретный шаг по времени, m – номер шага по времени.

Для решения уравнений (2)-(5) используется следующая схема

$$\text{div}_h \vec{E}^m = 4\pi \rho^m \quad (10)$$

$$\frac{\vec{B}^{m+1/2} - \vec{B}^{m-1/2}}{\Delta t} = -c \text{rot}_h \vec{E}^m \quad (11)$$

$$\text{div}_h \vec{B}^{m+1/2} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\vec{E}^{m+1} - \vec{E}^m}{\Delta t} = c \text{rot}_h \vec{B}^{m+1/2} - 4\pi \vec{j}^{m+1/2} \quad (13)$$

Здесь div_h , rot_h операторы центральной разностной схемы, определённые на сетках для электрического магнитного поля:

$$\vec{E}^m = (ER_{l+1/2,k}, EP_{l,k}, EZ_{l,k+1/2})^m,$$

$$\vec{B}^{m+1/2} = (BR_{l,k+1/2}, BP_{l+1/2,k+1/2}, BZ_{l+1/2,k})^{m+1/2}.$$

Сеточные величины плотности заряда и плотности тока в узле с координатами r_i определяются по координатам и скоростям отдельных частиц с

помощью сеточной функции ядра частицы

$$\rho(\vec{r}_i, t) = \sum_j q_j \bar{R}(\vec{r}_i, \vec{r}_j(t)), \quad \vec{J}(\vec{r}_i, t) = \sum_j q_j \vec{v}_j(t) \bar{R}(\vec{r}_i, \vec{r}_j(t)). \quad (14)$$

Здесь q_j – заряд частицы с номером j ; функция $\bar{R}(\vec{r}_i, \vec{r}_j(t))$ (функция ядра) характеризует форму, размер частицы и распределение в ней заряда.

Наиболее широко используемые ядра частиц, такие как PIC-ядро и параболическое, симметричны, поэтому в недекартовых системах координат центр масс частиц не совпадает с центром ячейки, что приводит к существенным искажениям плотности плазмы вблизи оси. Использование других ядер затруднено тем, что для них вычисление плотности тока и плотности заряда частицы на сетке не согласованы, что в свою очередь требует коррекции значений электрического поля, полученных из решения уравнений Максвелла.

В диссертации предложен численный метод вычисления плотности тока, использующий напрямую решение уравнения неразрывности

$$\frac{\rho^{m+1} - \rho^m}{\Delta t} + \text{div}_h \vec{J}^{m+1/2} = 0 \quad (15)$$

и позволяющий получить согласованные значения плотности заряда и плотности тока для ядер произвольной формы без необходимости дополнительных коррекций. В работе использовано ядро вида (16)

$$\bar{R}((r_i, z_k), (r_j, z_j)) = \begin{cases} \frac{1}{V_i} * \frac{r_{i+1}^2 - r_j^2}{r_{i+1}^2 - r_i^2} * \frac{h_z - |z_k - z_j|}{h_z}, & r_i < r_j < r_{i+1}, |z_k - z_j| < h_z. \\ \frac{1}{V_i} * \frac{r_{i-1}^2 - r_j^2}{r_{i-1}^2 - r_i^2} * \frac{h_z - |z_k - z_j|}{h_z}, & r_{i-1} < r_j < r_i, |z_k - z_j| < h_z. \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (16)$$

Здесь $V_i = 2\pi r_i h_r h_z$ – объём ячейки, h_r, h_z – шаги пространственной сетки, $(r_i, z_k), (r_j, z_j)$ – координаты узлов сетки и координаты частицы соответственно.

Для этого ядра были получены формулы вычисления плотности тока:

$$\begin{aligned} JR_{i+1/2, k}^{m+1/2} &= \frac{2 * v_r^{m+1/2} * r_i h_r}{V_i * (r_{i+1}^2 - r_i^2) h_z r_{i+1/2}} * \left(\vec{r} * (z_{k+1} - \hat{z}) + \frac{\Delta r \Delta z}{12} \right), \\ JZ_{i, k+1/2}^{m+1/2} &= \frac{v_z^{m+1/2}}{V_i * (r_{i+1}^2 - r_i^2)} * \left((r_{i+1}^2 - \vec{r} * \vec{r}) + \frac{\Delta r \Delta r}{12} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

$$JP_{i,k}^{m+1/2} = \frac{r_i v_\phi^{m+1/2}}{V_i * (r_{i+1}^2 - r_i^2) h_z} * \quad (17)$$

$$* \left((r_{i+1}^2 - \delta r * \delta r)(z_{k+1} - \delta z) + \frac{\Delta r \Delta r (z_{k+1} - \delta z) + 2 * \Delta r \Delta z \delta r}{12} \right),$$

Здесь $\vec{J} = (J_r, J_\phi, J_z) = (JR_{i+1/2,k}, JP_{i,k}, JZ_{i,k+1/2})^{m+1/2}$,

$$\Delta r_j = r_j^{m+1} - r_j^m, \quad \delta r_j = \frac{r_j^{m+1} + r_j^m}{2}, \quad \Delta z_j = z_j^{m+1} - z_j^m, \quad \delta z_j = \frac{z_j^{m+1} + z_j^m}{2}.$$

Плотность тока в формуле (17) удовлетворяет уравнению (15), что позволяет сразу рассчитывать электрические поля по формуле (13) без дополнительных коррекций.

Глава 3 посвящена обзору параллельных алгоритмов для решения системы уравнений Больцмана-Максвелла. Также в данной главе приводится описание авторского параллельного алгоритма и результаты его тестирования. Разработанный алгоритм параллельных вычислений основан на эйлерово-лагранжевой декомпозиции: расчётная область разделяется на подобласти, в которых вычисления производит своя группа процессоров. Внутри каждой такой подобласти модельные частицы распределяются между процессорами группы, что обеспечивает высокую степень параллелизма. На рисунке 2 приведено ускорение данного параллельного алгоритма, рассчитанное на суперкомпьютере Ломоносов (МГУ). В расчётах использовалось до $5 * 10^9$ модельных частиц.

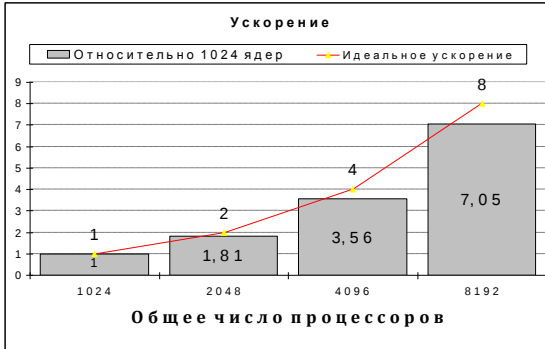


Рис. 2. Масштабируемость алгоритма параллельных вычислений

Из рисунка 2 видно, что разработанный алгоритм позволяет обеспечить балансировку вычислительной нагрузки на процессоры и показывает высокую степень масштабируемости до нескольких тысяч вычислительных ядер (достигнуто ускорение в 7,05 раз при использовании 8196 ядер по сравнению с 1024 ядрами)

В Главе 4 приводятся основные результаты вычислительных экспериментов по моделированию динамики плазмы в ловушке-мишени.

Важным требованием к выбранному способу ионизации плазмы является распространение катодных электронов вдоль всей длины ловушки, что необходимо для создания плазмы с требуемой протяженностью и степенью однородности. Рассчитанное распределение плотности катодных электронов представлено на рисунке 3. Видно, что электроны распространяются вплоть до инверсных пробок. На основе полученной плотности катодных электронов был выполнен расчёт динамики ионов (рис 4.). Из рисунка видно, что ионы с достаточной степенью однородности заполняют практически всю мишень. Основной поток плазмы приходится на стенки, при этом небольшая доля выходит в торцевые отверстия.

Также было рассмотрено прохождение плазмы через магнитную пробку. Результаты расчётов плотности плазмы на оси в области инверсии магнитного поля ($1200 < Z < 1360$ мм) представлены на рисунке 5.а. Наблюдается двухступенчатое падение плотности всех ионных компонент плазмы вдоль оси - перед магнитной пробкой и непосредственно в области инверсии магнитного поля. Этот результат полностью соответствует наблюдениям в лабораторных экспериментах.

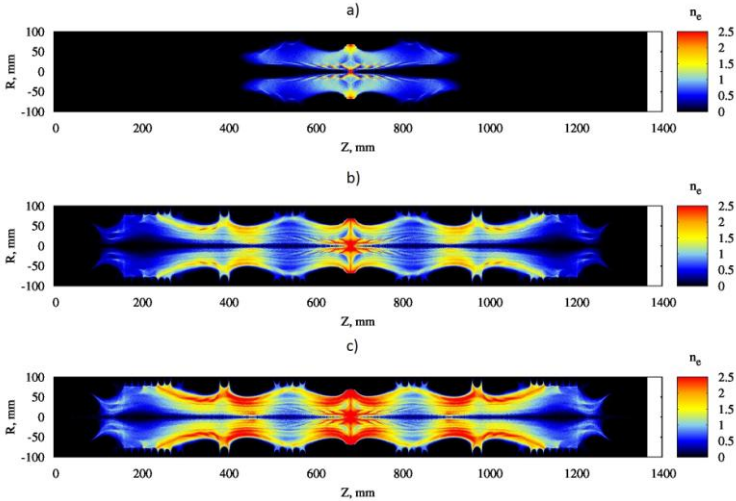


Рис. 3 Плотность катодных электронов ($n_e = 10^9 \text{ см}^{-3}$) в различные моменты времени (a) 4×10^{-8} с. (b) 16×10^{-8} с. (c) 24×10^{-8} с. $Z = 0$ соответствует положению левой торцевой крышки камеры.

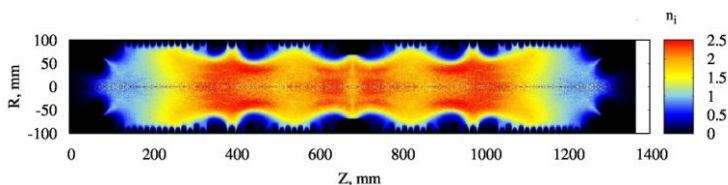


Рис.4. Плотность ионов H^+ ($n_i = 10^{10} \text{ см}^{-3}$) в момент времени $2,4 \times 10^{-5} \text{ с}$. $Z = 0$ соответствует положению левой торцевой крышки.

На рисунке 5.б. показано изменение плотности плазмы на торце ловушки ($Z=1296 \text{ мм}$) с течением времени.

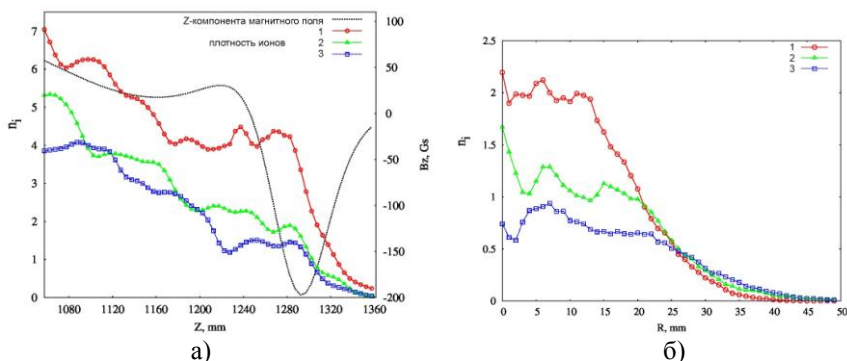


Рис. 5. Плотность ионов различных типов ($n_i = 10^9 \text{ см}^{-3}$). Время $2 \times 10^{-5} \text{ с}$. 1 - H^+ , 2 - H_2^+ , 3 - H_3^+ . а) распределение плотности на оси, $R = 0$. б) радиальное распределение плотности в точке $Z = 1296 \text{ мм}$.

Из рисунка 5 видно, что основной поток приходится на центральную часть вблизи оси. Аналогичные результаты были получены и в лабораторном эксперименте. Общий расчётный ток ионов в торцевое отверстие $I_t \approx 0.5 \text{ А}$ (при токе с катодов $I_{\text{all}} \approx 150 \text{ А}$), что позволяет говорить о достаточно хорошем удержании плазмы.

В заключении подводятся общие итоги проведенного исследования, формулируются возможные направления дальнейших исследований в этой области.

Основные результаты работы

Разработана численная модель плазменной ловушки-мишени с мультипольными магнитными стенками и инверсными магнитными пробками. Модель построена с применением комбинации метода частиц в ячейках и метода Монте-Карло и описывает динамику плазмы в магнитном поле

сложной геометрии в цилиндрической вакуумной камере.

Разработан численный метод расчёта плотности тока, удовлетворяющего разностному аналогу уравнения неразрывности для произвольной формы ядра частицы. Это позволяет согласовать вычисление плотности тока и плотности заряда и отказаться от решения ресурсоёмкого уравнения Пуассона для корректировки значения электрического поля.

Разработан алгоритм параллельных вычислений, масштабируемый до нескольких тысяч процессорных ядер и позволяющий проводить расчёты траекторий 10^{10} частиц, что обеспечивает высокую точность результатов. Предложен вариант балансировки вычислительной нагрузки для адаптивного шага по времени.

На основе разработанных численных методов создан комплекс программ для моделирования динамики плазмы в магнитной ловушке-мишени.

Созданный комплекс программ позволил рассчитать процесс ионизации газа в ловушке, получить распределение катодных электронов и определить области наиболее активной ионизации. На основе этих данных была рассчитана динамика плазмы, определены потоки плазмы в торцевые отверстия ловушки. Результаты расчётов показали, что образующаяся плазма имеет достаточную степень однородности и заполняет практически всю длину ловушки.

С помощью вычислительных экспериментов показано, что магнитная система со слабым продольным полем и инверсными пробками в торцевых отверстиях в магнитном поле позволяет добиться достаточно малого потока плазмы из ловушки. Расчётные данные плотности всех компонент плазмы в области магнитной пробки согласуются с данными экспериментов.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в уточнении используемой модели, например, создание гибридной МГД-кинетической модели, а также в применении созданного комплекса программ для численного моделирования других магнитных систем для нагрева и удержания плазмы.

Список основных публикаций по теме диссертации

Основные результаты работы опубликованы в 6-х статьях в рецензируемых научных журналах из списка ВАК:

1. Берендеев, Е.А. Моделирование на суперЭВМ динамики плазменных электронов в ловушке с инверсными магнитными пробками и мультиполными магнитными стенками / Е.А. Берендеев, А.В. Иванов, Г.Г. Лазарева, А.В. Снытников // Вычислительные методы и программирование. – 2013. – Т. 14. – С. 149-154.

2. Берендеев, Е.А. Реализация эффективных параллельных вычислений при моделировании больших задач физики плазмы методом частиц в ячейках / Е.А. Берендеев, А.А. Ефимова // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17. –

№ 2 (55). – С. 112-116.

3. Berendeev, E.A. Mathematical and experimental simulation of a cylindrical plasma target trap with inverse magnetic mirrors / E.A. Berendeev, G.I. Dimov, G.I. Dudnikova, A.V. Ivanov, G.G. Lazareva, V.A. Vshivkov // Journal of Plasma Physics. – 2015. – Vol. 81. – Iss. 5. – P. 495810512(1-8).

4. Берендеев, Е.А. Моделирование низкотемпературной многокомпонентной плазмы в ловушке-мишени / Е.А. Берендеев, Г.И. Димов, А.В. Иванов, Г.Г. Лазарева, М.П. Федорук // Доклады Академии Наук. – 2015. – Т. 460. – № 5. – С. 529-531.

5. Berendeev, E.A. Numerical simulation of nonlinear processes in a beam-plasma system / A. A. Efimova, E. A. Berendeev, G. I. Dudnikova, V. A. Vshivkov. // AIP Conference Proceedings. – 2015. – Vol. 1684. – Iss. 1. – P. 100001(1-8).

6. Берендеев, Е.А. Численное моделирование развития турбулентности при взаимодействии электронного пучка с плазмой / Е.А. Берендеев, В.А. Вшивков, А.А. Ефимова, Е.А. Месяц // Вычислительные методы и программирование. – 2015. – Т. 16. – Вып. 1. – С. 139-145.

Положения диссертационной работы также изложены в следующих публикациях:

7. Берендеев, Е.А. Эффективное использование суперЭВМ для решения больших задач физики плазмы методом частиц в ячейках / Е.А. Берендеев, А.В. Иванов, Г.Г. Лазарева, А.В. Снытников // International conference High performance computing. HPC-UA 2012. Conference proceedings. Kyiv, 8-12 October 2012. – Kyiv: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". – 2012. – P. 94-101.

8. Berendeev, E.A. Supercomputer simulation of plasma electron dynamics in a magnetic trap with inverse magnetic mirrors and multipole magnetic wall / E.A. Berendeev, G.G. Lazareva // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Numerical Analysis. – 2013. – № 16. – P. 7-14.

9. Берендеев, Е.А., Моделирование на суперЭВМ динамики плазменных электронов в ловушке с инверсными магнитными пробками и мультипольными магнитными стенками / Е.А. Берендеев, А.В. Иванов, Г.Г. Лазарева, А.В. Снытников // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2013): труды международной научной конференции (1-5 апреля 2013 г., г. Челябинск). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2013. – С. 68-75.

10. Берендеев, Е.А., Численное моделирование резонансного возбуждения колебаний плазмы, нагреваемой электронным пучком / Е.А. Берендеев, А.А. Ефимова // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2013): труды международной научной конференции (1-5 апреля 2013 г., г. Челябинск). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2013. – С. 288-294.

11. Берендеев, Е.А. Математическое моделирование на суперЭВМ динамики плазмы в ловушке-мишени для получения атомарных пучков высокой энергии / Е.А. Берендеев, Г.Г. Лазарева // 5-я международная молодёжная научная школа-конференция «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач». Тезисы докладов. – Новосибирск: Сибирское научное издательство. – 2013. – С. 22.

12. Берендеев, Е.А. Параллельный алгоритм решения задач динамики заряженных частиц с учётом балансировки вычислительной нагрузки / Е.А. Берендеев, М.А. Боронина, В.Д. Корнеев // Вестник ЮУрГУ. Серия “Вычислительная математика и информатика”. – 2014. – Т. 3. – № 1. – С. 97-112.

13. Берендеев, Е.А. Численное моделирование потерь плазмы через инверсные пробки магнитной ловушки-мишени / Е.А. Берендеев, А.А. Ефимова // Тезисы докладов VII Всероссийской конференции “Актуальные проблемы прикладной математики и механики”, посвящённой памяти академика А.Ф. Сидорова (Абрау-Дюрсо, 15-20 сентября 2014 г.). Екатеринбург: УрО РАН, 2014, с 14-15.

14. Berendelev, E.A. Numerical simulation of various scenarios of nonlinear evolution in a beam-plasma system / E.A. Berendelev, A.A. Efimova, V.A. Vshivkov // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Numerical Analysis. – 2015. – № 17. – P. 1-6.

15. Berendelev, E.A. Computer simulation of multicomponent plasma dynamics in the Target Trap / E.A. Berendelev, G.I. Dudnikova, V.A. Vshivkov // Book of abstracts of the International Workshop on Complex Plasma Phenomena in the Laboratory and in the Universe, January 19-20, 2015. – Rome: Accademia Nazionale dei Lincei. – 2015. – P.38-39

16. Берендеев, Е.А. Моделирование осесимметричных плазменных ловушек методом частиц в ячейках / Е.А. Берендеев // Труды Международной конференции "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики – 2015", посвященной 90-летию со дня рождения академика Гурия Ивановича Марчука. 19-23 октября 2015 г. – Новосибирск: Академиздат. – 2015. – С. 108-114.

17. Berendelev, E.A., Computer simulation of cylindrical plasma target trap with inverse magnetic mirrors / E. A. Berendelev, G. I. Dudnikova, A. A. Efimova, A. V. Ivanov and V. A. Vshivkov // AIP Conference Proceedings – 2016. – Vol. 1771. – P. 030009(1-4).

18. Берендеев, Е.А. Особенности использования цилиндрической геометрии при решении задач физики плазмы методом частиц в ячейках / Е.А. Берендеев, М.А. Боронина, В.А. Вшивков, А.А. Ефимова // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2016): труды международной научной конференции (28 марта – 1 апреля 2016 г., г. Архангельск). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2016. – С. 442-453.