

УТВЕРЖДАЮ
Директор
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института теоретической и
прикладной механики
им С.А. Христиановича
Сибирского отделения
Российской академии наук
чл.-корр. РАН, д.Ф.-м.н.

А. Н. Шиплюк
2017

«21» сентября 2017 г.

ОТЗЫВ ведущей организации
на диссертацию Е. А. Берендеева «Численное моделирование
динамики плазмы в осесимметричных магнитных ловушках-мишениях»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Представленная диссертационная работа посвящена моделированию динамики релятивистской плазмы в осесимметричной магнитной ловушке. Моделирование выполняется на основе кинетического подхода, решаются кинетические уравнения Больцмана для эволюции функций распределения электронов и ионов и нестационарные уравнения Maxwella для самосогласованных электрического и магнитного полей. При решении уравнения Больцмана выполняется расщепление по физическим процессам: на первом дробном шаге рассматривается бесстолкновительное уравнение Власова, на втором — моделируется эффект столкновений электронов и ионов с атомами нейтрального газа. Кулоновское взаимодействие электронов и ионов между собой не учитывается. Для решения уравнения Власова используется метод частиц в ячейках (Particle-in-Cell, PIC), при расчете столкновений — метод Монте-Карло. Интегрирование уравнений Maxwella выполняется с помощью центральноразностной схемы на разнесенной (шахматной) сетке.

В диссертации разработан численный алгоритм для решения рассматриваемой задачи и создан комплекс программ, позволяющий рассчитывать динамику плазмы в магнитных ловушках-мишениях на параллельных суперкомпьютерах. Проведен тестовый расчет динамики заряженных частиц в простейшей плазменной ловушке — пробкотроне. Затем выполнено моделирование процессов в магнитной ловушке-мишени: зажигания плазмы при ионизации газа катодными электронами и последующих процессов потери плазмы на стенках ловушки и прохождения частиц через магнитные пробки на концах ловушки. Расчеты проведены для условий, соответствующих экспериментальным; результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными, полученными в ИЯФ СО РАН на прототипе ловушки-мишени.

Актуальность темы диссертационной работы определяется широким применением технологических плазменных систем, ведущимися разработками новых образцов такой техники. Моделирование динамики плазмы в подобных системах позволяет провести оценки их работоспособности и эффективности, выполнить оптимизацию параметров. Все это в полной мере относится к плазменным ловушкам-

мишеням, используемым для нейтрализации пучков отрицательных ионов и получения мощных пучков нейтральных атомов. Создание источников атомарных пучков является важной частью решения проблемы управляемого термоядерного синтеза, поскольку их инжекция является основным методом накопления и нагрева удерживаемой в магнитном поле высокотемпературной плазмы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, определяются объект исследований и цели работы, формулируется, в чем именно состоит ее научная новизна, какова научная и практическая ценность проведенных исследований, рассказывается о структуре диссертационной работы и ее апробации.

Первая глава диссертации посвящена описанию используемой далее численной модели. Представлена схема плазменной ловушки-мишени и ее основные параметры, выписаны уравнения, описывающие динамику релятивистской водородной плазмы, состоящей из четырех компонент: электронов и ионов H^+ , H_2^+ и H_3^+ . Дан краткий обзор различных подходов к моделированию процессов в плазме, основан выбор кинетического описания как наиболее адекватного решаемой задачи. Излагаются основы метода частиц в ячейках, описываются различные применяемые в нем сеточные ядра, способы вычисления сил, действующих на частицы, метод Монте-Карло для вычисления интеграла столкновений при упругом рассеянии электронов и неупругих процессах ионизации нейтральных молекул электронами и ионами. В конце главы приводится общая схема вычислений на одном шаге интегрирования по времени.

Во второй главе описан численный алгоритм решения уравнений, входящих в используемую математическую модель. Для интегрирования уравнений движения частиц применяется известный метод Бориса с модификациями, сохраняющими его эффективность в осесимметричном случае. При этом используется аддитивный шаг по времени, что позволяет вести расчеты в различных частях расчетной области с шагом, соответствующим локальной величине магнитного поля, определяющей ларморовскую частоту вращения частиц. Для моделирования столкновений заряженных частиц с нейтральными используется метод Монте-Карло, включающий т. н. «нулевые» столкновения.

Уравнения Максвелла решаются на разнесенной сетке с помощью метода FDTD. При этом возникает важная проблема точного выполнения уравнения неразрывности. Обычно для этого используется корректировка значения электрического поля, при этом на каждом шаге решается вспомогательное уравнение Пуассона для потенциала, что связано с серьезными затратами машинного времени. В диссертации предложен и реализован оригинальный и экономичный метод вычисления плотностей тока и заряда, позволяющий гарантировать выполнение разностного аналога уравнения неразрывности без решения эллиптических уравнений. Показано, что он может быть использован для любого вида сеточного ядра в произвольной системе координат.

Третья глава посвящена вопросам программной реализации численного алгоритма для проведения расчетов на параллельных суперкомпьютерах. В работе используется фиксированная декомпозиция расчетной области на подобласти, каждой из которых ставится в соответствие группа процессоров. Частицы внутри подобласти равномерно распределяются между процессорами данной группы. Такой подход, сочетающий геометрическую декомпозицию с декомпозицией по частицам позволил, добиться достаточно высокой (порядка 90%) масштабируемости алгоритма при использовании нескольких тысяч вычислительных ядер.

В последней, четвертой, главе описываются результаты проведенных вычислительных экспериментов. Для верификации расчетного кода моделируется динамика заряженных частиц в осесимметричной линейной плазменной ловушке — пробкотроне. Полученная численно величина т. н. «конуса потерь» (угла между вектором

скорости частицы и осью пробкотрона, соответствующего границе между вылетом и удержанием частиц) хорошо согласуется с известным аналитическим выражением.

Далее выполняется моделирование плазменной ловушки мишени. На первом этапе моделируется зажигание плазмы с помощью ионизации газа током электронов с катода. Рассчитанная область распространения катодных электродов позволяет сделать заключение об эффективности ионизации газа и получении плазмы необходимой плотности. После этого проводится сравнение параметров плазмы с экспериментальными данными, полученными на прототипе ловушки-мишени, определяются потоки плазмы на стенки ловушки и потери частиц через магнитные пробки и выходные отверстия. Моделирование выполнено на подробной вычислительной сетке, насчитывающей примерно 13,5 млн. ячеек, что позволяет адекватно воспроизвести сложную конфигурацию магнитного поля ловушки. Для статистически корректного воспроизведения процесса ионизации было взято 5 млрд. модельных частиц.

Достигнутая в расчетах плотность плазмы $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ соответствует величине, ожидаемой в создаваемой в ИЯФ СО РАН ловушке-мишени. Получены данные о плотности ионов различных типов в области магнитных пробок, свидетельствующие о высокой степени удержания плазмы внутри ловушки. Прямое сравнение распределения полной плотности ионов в области инверсии магнитного поля с экспериментальными данными показало их очень хорошее согласие.

Было выполнено исследование временной зависимости тока ионов через торцевую часть ловушки для различного числа модельных частиц. Показано, что в работе достигнута сходимость по числу частиц. Исследована динамика плазмы у стенок ловушки и сделано заключение, что при расчётной температуре плазмы стенки камеры вполне способны справиться с выделяемой мощностью без сильного нагрева камеры в целом и локальных перегревов. Наконец, были определены параметры плазмы, используемой в качестве мишени для нейтрализации ионного пучка и показано, что в области пролёта пучка плотность плазмы достаточно высока и почти не зависит от расстояния до оси, что является условием эффективной нейтрализации пучка.

Диссертация производит очень хорошее впечатление. Она выполнена на актуальную тему. В ней получены новые интересные результаты как в части построения вычислительного алгоритма и его реализации для выполнения на параллельных суперкомпьютерах, так и при проведении вычислительных экспериментов по динамике плазмы в магнитной ловушке. Предложено важное усовершенствование алгоритма решения уравнений Максвелла с самосогласованным полем, позволяющее гарантировать точное выполнение условий неразрывности. Разработан новый метод статистической балансировки загрузки процессоров, учитывающий величину внешнего магнитного поля. Создан программный комплекс, позволяющий моделировать динамику плазмы в реальных устройствах, эффективно используя мощные современные ЭВМ. Выполненные расчеты создаваемой плазменной ловушки-мишени позволили еще до проведения лабораторных экспериментов получить важные оценки ее будущих характеристик. Все это можно оценить как важный научный вклад в проблему математического моделирования динамики плазмы.

Достоверность полученных результатов обеспечивается тщательным построением вычислительного алгоритма, использованием при вычислениях подробных расчетных сеток и большого числа пробных частиц, проведением тестовых расчетов, сравнением результатов, полученных при различном числе частиц. Прямое сравнение расчетных данных с экспериментальными показало их хорошее согласие.

Несомненна практическая ценность работы. Разработанные автором алгоритм и комплекс программ позволяют моделировать работу технических плазменных систем. В самой работе проведено моделирование создаваемой в ИЯФ СО РАН плазменной ловушки-мишени, которое может существенно помочь в определении оптимальных параметров для ее работы. Несомненно, полученные в диссертации результаты могут быть

использованы и в других научных и научно-конструкторских организациях, занимающихся проблемами управляемого термоядерного синтеза и создания различных технических устройств, основанных на применении плазменных технологий.

У меня нет серьезных замечаний к содержанию работы. Конечно, было бы интересно видеть результаты моделирования не одной, а нескольких различных ловушек. Желательным, наверное, также является разработка гибридной МГД-кинетической модели. Это, однако, не указания на недостатки диссертации, а скорее возможные направления для дальнейшего развития представленных в ней исследований. Ряд небольших конкретных замечаний возник у меня, однако, к изложению материала в диссертации.

1. При моделировании динамики частиц в пробкотроне было получено значение телесного угла «конуса потерь» 482 мрад, при его теоретическом значении 481,4 мрад. По-мнению автора, ошибка составляет 0,06%. Эта цифра не только фигурирует в тексте, но и попала в выводы, сделанные по четвёртой главе. Как нетрудно убедиться, на самом деле ошибка равна 0,125%, то есть в два раза больше.
 2. При изучении зависимости тока ионов от числа модельных частиц автор пишет, что сходимость достигается при увеличении числа частиц до $4 \cdot 10^9$. В то же время на соответствующем рисунке приведены данные для числа частиц от 10^8 до $8 \cdot 10^8$.
 3. Странное впечатление производит сделанное во введении утверждение, что «наиболее широкое применение численное моделирование нашло в области физики плазмы». На самом деле численное моделирование давно стало важной и неотъемлемой частью всех областей современной физики.

Высказанные замечания не снижают существенно моей оценки диссертации. Она является законченной научной работой, в которой получены новые важные результаты в области математического моделирования и физики плазмы. Несомненно, что при ее выполнении Е. А. Берендеев показал себя высококвалифицированным специалистом в данных областях.

Материал диссертации достаточно полно отражен в публикациях автора и прошел апробацию на нескольких научных семинарах и конференциях, в том числе международных. Автореферат правильно передает содержание диссертации.

Считаю, что представленная работа полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а ее автор – Евгений Андреевич Берендеев, безусловно заслуживает присуждения ему искомой ученой степени.

Отзыв обсужден и одобрен на семинаре Лаборатории вычислительной аэродинамики ИТПМ СО РАН (протокол №11 от 6 сентября 2017 г.).

Отзыв подготовил
старший научный сотрудник
Лаборатории вычислительной аэродинамики
Института теоретической и прикладной
механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
доктор физико-математических наук по
специальности 01.02.05 - механика
жидкости, газа и плазмы
Россия, 630090, г. Новосибирск,
ул. Институтская 4/1
E-mail: alex@itam.nsc.ru
Телефон: +7 (383) 354-30-44



Собранную рукопись
зубрёвка А. Г.
удостоверяю Т. П. Саркисян
Зав. канцелярией Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича Сибирского отделения
Российской академии наук 21.03.2017