

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертационную работу
Берендеева Евгения Андреевича
«ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЫ
В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ-МИШЕНЯХ»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ.

Работа посвящена математическому моделированию динамики плазмы в ловушке-мишени, используемой для создания пучков нейтральных атомов путем нейтрализации пучков отрицательных ионов. Атомарные пучки используются для нагрева и диагностики плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза с магнитным удержанием. Создание эффективных алгоритмов, комплексов программ для описания процессов, происходящих в устройствах для получения таких пучков и проведение теоретических исследований плазмы с помощью этих программ позволяет лучше понять эти процессы и оптимизировать параметры установок. Поэтому тема диссертации является **актуальной** и имеет большое **практическое значение**.

Отличительной особенностью диссертации Берендеева является создание кинетической модели плазмы в геометрии реальной ловушки с большими градиентами магнитного поля и учетом основных процессов ионизации-рекомбинации одновременно. Как правило, подобные модели описывают либо движение заряженных частиц в сложных полях в бесстолкновительном случае или с относительно простым описанием столкновений, либо процессы ионизации в однородной плазме. Задача является очень сложной. Физические условия требуют использование кинетической модели, требующей больших вычислительных ресурсов; В отличие от ловушек для УТС, моделируемая ловушка имеет относительно слабое продольное магнитное поле, но поле в торцевой части очень сильное. Соответственно, имеются сильные градиенты магнитного поля, что приводит к большим различиям в ларморовской частоте в различных частях ловушки; Цилиндрическая симметрия установки требует использование цилиндрической системы координат, что создает известные трудности при расчете на оси в случае метода частиц; Существенное различия в пространственном распределении плотности плазмы и существенные изменения временного шага при движении частиц в различных пространственных областях требуют особого подхода при «распараллеливании» кода для обеспечения равномерной загрузки процессоров и т.д.

Решение подобных сложных новых задач требуют создания новых моделей и комплексов программ, учитывающие особенности этих задач. Программы, созданные ранее для других задач, как правило, оказываются неэффективными и зачастую не учитывают какие-либо физические процессы. В тоже время существующие коды могут содержать ненужные вычисления, сильно замедляющие работу программы. С другой стороны, новые задачи имеют и упрощающие условия. Например, в рассматриваемой в диссертации задаче расположение упомянутых выше областей повышенной плотности плазмы и мелкого шага по времени заранее известны. Это позволило эффективно распределить вычислительную нагрузку между процессорами при «распараллеливании».

Научная новизна диссертации Берендеева 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.

Достоинством работы Берендеева является сравнение с экспериментом. В настоящее время в ИЯФ СО РАН существует работающая часть установки для создания нейтральных пучков. Это позволило сравнить данные реального эксперимента и математического моделирования. Сравнение показало хорошее совпадение реальности и моделирования, что, несомненно, является достижением работы и говорит о **достоверности** получаемых результатов. Достоверность результатов также подтверждается методическими расчетами.

Таким образом, разработанные автором методы и комплекс программ могут успешно применяться для решения прикладных задач, связанных с разработкой плазменных установок цилиндрической геометрии.

Диссертационная работа состоит из введения, 4-х 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.

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

Глава 1 посвящена построению модели плазменной ловушки-мишени, разработанной в ИЯФ СО РАН, приведены параметры ловушки. В этой главе описаны основные уравнения (уравнение Максвелла для полей и уравнение Больцмана, учитывающее процессы ионизации, для плазмы). Дан анализ существующих численных методов решения этих уравнений, Обоснован выбор метода решения задачи, основанного на комбинации метода частиц в ячейках и метода Монте-Карло.

В **Главе 2** описаны особенности метода решения задачи применительно к конкретной задаче. В частности предложен оригинальный и интересный очень эффективный и в тоже время простой метод вычисления плотности плазмы и плотности тока по координатам частиц в цилиндрической системе координат обеспечивающий выполнение разностного аналога уравнения непрерывности в случае цилиндрической системы координат. Этот метод может быть применен во многих других задачах. Кроме того в этой главе приведены конечно-разностные схемы для решения уравнений для полей и движения частиц. Последние имеют свои особенности, связанные с сильной неоднородностью магнитного поля и цилиндрическими координатами.

В **Главе 3** описано «распараллеливание» численного кода. В данной задаче были учтены неоднородность плотности плазмы в пространстве и изменяющийся в пространстве шаг по времени при решении уравнений движения частиц. Это позволило более равномерно загрузить процессоры.

В **Главе 4** описаны результаты расчетов динамики плазмы в ловушке-мишени. В частности изучена динамика катодных электронов и динамика генерируемой ими плазмы. Показано, что ионы с достаточной степенью однородности заполняют практически всю мишень. Основной поток плазмы приходится на стенки, при этом небольшая доля выходит в торцевые отверстия. Проведено сравнение результатов численного моделирования и физического эксперимента. Показано хорошее соответствие.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы

Работа прошла успешную **апробацию** на международных и российских конференциях. Результаты полностью опубликованы в печати. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Вместе с тем в диссертации Берендеева Е.А имеются **недостатки**. Помимо некоторого числа опечаток (например, что означает формула $\frac{\partial r E_r}{r \partial r} = dU$?) есть следующие **замечания**.

1. В работе при расчете движения частиц шаг по времени зависел от пространственной координаты и отличался от шага по времени, используемом при решении уравнений Максвелла, однако, влияние соотношения между этими шагами на решение не исследовано.
2. В работе исследуется влияние на решение числа частиц, однако не показана сходимость решения по отношению к шагу пространственной сетки.
3. Плохо описаны начальные и граничные условия. Например, не описана «катодная область» на языке формул. Как может на границе задаваться одновременно тангенциальная и нормальная компоненты электрического поля? В пункте о начальных условиях написано: «Изначально в ловушке находится только газ. Далее в ловушку с катода влетают электроны». Если далее, то это уже не начальные, а граничные условия.

Высказанные замечания не снижают ценности диссертации. Диссертация Берендеева Е.А. «Численное моделирование динамики плазмы в осесимметричных магнитных ловушках-мишениях» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Представленные исследования интересны, важны, выводы обоснованы.

Диссертационная работа «Численное моделирование динамики плазмы в осесимметричных магнитных ловушках-мишениях» соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Автор работы Е.А. Берендеев заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,
старший научный сотрудник
лаборатории вычислительных технологий
Института вычислительных технологий СО РАН
доктор физико-математических наук
Владимир Петрович Жуков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт вычислительных технологий
Сибирского отделения Российской академии наук
Адрес: 630090 Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6
Тел.: (383) 330-61-50
Факс: (383) 330-63-42
E-mail: zukov@ict.nsc.ru
Сайт: <http://www.ict.nsc.ru>
Докторская диссертация защищена по специальности
01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы.

Подпись В.П. Жукова удостоверяю

Ученый Секретарь ИВТ СО РАН, к. ф.-м. н.

Алексей Александрович Редок



12 сентября 2017 г.