

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.061.02  
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ИНСТИТУТА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ И  
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ФЕДЕРАЛЬНОГО АГЕНТСТВА НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 10 октября 2017 г. № 8

**О присуждении** Берендееву Евгению Андреевичу, гражданину Российской Федерации **ученой степени кандидата физико-математических наук.**

**Диссертация** «Численное моделирование динамики плазмы в осесимметричных магнитных ловушках-мишениях» **по специальности** 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ **принята к защите** 23 мая 2017 г., протокол № 6 диссертационным советом Д 003.061.02 **на базе** Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук **Федерального агентства научных организаций**, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, **созданным** приказом Минобрнауки России №105/нк-209 от 11.04.2012 г.

**Соискатель** Берендеев Евгений Андреевич 1988 года рождения. В 2013 году **соискатель окончил** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ) по направлению «прикладная математика и информатика», в 2016 году **окончил** аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук Федерального агентства научных организаций по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и

комплексы программ» направления 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника», работает младшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук Федерального агентства научных организаций.

**Диссертация выполнена** в лаборатории Параллельных алгоритмов решения больших задач Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук Федерального агентства научных организаций.

**Научный руководитель** – доктор физико-математических наук, Вшивков Виталий Андреевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория параллельных алгоритмов решения больших задач, заведующий лабораторией.

**Официальные оппоненты:**

Жуков Владимир Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория вычислительных технологий, старший научный сотрудник;

Шайхисламов Илдар Фаритович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, замдиректора по научной работе, **дали положительные отзывы на диссертацию**.

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск **в своем положительном заключении, подписанным** Кудрявцевым Алексеем Николаевичем, доктором физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории вычислительной аэродинамики, и **утверждённом** Шиплюком Александром Николаевичем, член-корреспондентом РАН, директором, указала, что диссертационная работа Е.А. Берендеева выполнена на высоком научном уровне, является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных лично автором

исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, обеспечившее решение научной проблемы, имеющей важное значение для развития приоритетного направления фундаментальных исследований, выполняемых учреждениями РАН, – математическое моделирование. Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 с изменениями, внесенными Постановлением Правительства РФ от 21 апреля 2016 г. № 335 «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

**Соискатель имеет 18 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 18 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях 10.**

Опубликованные работы представляют собой статьи в научных журналах (10 статей общим объёмом 61 страницу, из них 6 в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, 4 в журналах, индексируемых Web of Science) и материалы конференций (5 статей в трудах конференций и 3 публикации в тезисах конференций, общим объёмом 44 страницы) и в полном объеме отражают содержание диссертации.

В работах описаны как кинетические численные модели динамики плазмы в открытых ловушках, так и комбинированные модели с учётом процессов ионизации и рассеяния; описаны используемые численные методы, изложены этапы построения вычислительных алгоритмов и приведены результаты численных экспериментов.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

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

**Личный вклад** автора заключается в построении комбинированной численной модели на основе метода частиц в ячейках и метода Монте-Карло, разработке и

программной реализации численных методов расчёта динамики плазмы в цилиндрической ловушке с учётом столкновений, проведении вычислительных экспериментов для нахождения распределения плотности плазмы в области инверсных магнитных пробок.

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

**Личный вклад** автора заключается в разработке и программной реализации численных методов расчёта динамики заряженных частиц в самосогласованных электромагнитных полях без учёта рассеяния, проведении вычислительных экспериментов, исследовании динамики катодных электронов и определении ионного тока, исходящего из ловушки-мишени.

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

**Личный вклад** автора заключается в разработке и программной реализации численных алгоритмов расчёта динамики заряженных частиц с постоянной массой, проведении вычислительных экспериментов для нахождения траекторий частиц в магнитных полях с большими пространственными градиентами.

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

**Личный вклад** автора заключается в разработке параллельных алгоритмов с учётом балансировки вычислительной нагрузки для моделирования динамики плазмы в ловушке-мишени, проведении вычислительных экспериментов по исследованию распределения потоков плазмы по стенке мишени, а также для оценки общих потерь плазмы из ловушки.

5. Берендеев, Е.А. Моделирование осесимметричных плазменных ловушек методом частиц в ячейках // *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.

В данной работе представлена модель плазменной ловушки-мишени и численный метод нахождения плотности тока в цилиндрической системе координат для произвольных форм ядер модельных частиц. Доказана корректность предложенных подходов, а также приведены результаты моделирования основных закономерностей изучаемых плазменных процессов в ловушке-мишени. Все результаты получены лично автором

**Все выносимые на защиту результаты принадлежат соискателю лично.** Соавторы согласны с авторским вкладом соискателя в совместных работах.

**На диссертацию и автореферат поступили отзывы:** на автореферат поступило 4 отзыва. **Все отзывы положительные.** В них отмечается актуальность проблематики диссертационного исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Отмечается, что диссертационная работа выполнена на высоком профессиональном уровне, удовлетворяет требованиям к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, соответствует специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

1. Отзыв на автореферат, составленный Семёновым Владимиром Николаевичем, доктором физико-математических наук, заместителем заведующего отделением анализа безопасности ядерных энергетических установок Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасности развития атомной энергетики Российской академии наук, г. Москва. Отзыв положительный, содержит следующее замечание:

Полное отсутствие информации об экспериментах и сопоставлении их результатов с расчетами – это основное общее замечание к реферату. Такое сопоставление – один из основных этапов разработки расчетного кода, оно показывает предсказательную способность кода и заслуживает существенно большего внимания при изложении результатов работы.

2. Отзыв на автореферат, составленный Мееровым Иосифом Борисовичем, кандидатом технических наук, доцентом кафедры математического обеспечения и суперкомпьютерных технологий Института информационных технологий, математики и механики Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород. Отзыв положительный, содержит следующие замечания:

- Схема организации параллельных вычислений и балансировки нагрузки в автореферате описана поверхностно. Более подробное описание позволило бы понять достоинства, недостатки и границы применимости указанной схемы. Представляет интерес вопрос о сравнении данной схемы с другими возможными.
- На рисунке 2 присутствует неточность. Судя по приведенным в автореферате пояснениям, подпись «общее число процессоров» следует заменить на «общее число ядер».

3. Отзыв на автореферат, составленный Захаровым Юрием Николаевичем, доктором физико-математических наук, заведующим кафедрой ЮНЕСКО по информационным вычислительным технологиям Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кемеровский государственный университет», г. Кемерово. Отзыв положительный, содержит следующие замечания:

- При описании математической модели (1) - (5) не приведены начально-краевые условия.
- Не приведено количественного сравнения проведённых численных экспериментов с результатами лабораторных экспериментов.

4. Отзыв на автореферат, составленный Астрелиным Виталием Тимофеевичем, кандидатом технических наук, старшим научным сотрудником лаборатории № 10 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.. Отзыв положительный, не содержит критических замечаний.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью своими достижениями в области математического моделирования физики плазмы и разработки численных методов решения уравнений Максвелла, наличием у них публикаций по соответствующим направлениям и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.**

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработан** новый численный метод нахождения плотности тока в цилиндрической системе координат, позволяющий согласовать вычисление плотности тока и плотности заряда без дополнительных коррекций;

**предложена** новая численная модель, описывающая нелинейную динамику плазмы в ловушке-мишени с мультипольными магнитными стенками и инверсными магнитными пробками;

**доказана** на основе вычислительных экспериментов адекватность предложенной численной модели, описывающей кинетические эффекты в плазме с учётом процессов ионизации и рассеяния, нелинейным процессам в ловушке-мишени; перспективность использования численного моделирования для оценки удержания плазмы в осесимметричных магнитных ловушках;

**введен** новый подход к согласованию вычислений плотности тока и плотности заряда в методе частиц в ячейках.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказана** возможность согласования вычисления плотности тока и плотности заряда методом частиц в ячейках в цилиндрической системе координат;

**применительно к проблематике диссертации результативно использованы** методы вычислительной математики и математического моделирования, элементы теории конечно-разностных уравнений, элементы теории вероятности и математической статистики, метод частиц в ячейках;

**изложены** основные положения, преимущества и проблемы численного моделирования динамики плазмы в магнитных ловушках, как при разработке технологических плазменных систем, так и при изучении фундаментальных свойств плазмы;

**раскрыты** проблемы использования метода частиц в ячейках в цилиндрической системе координат за счёт несогласованности вычисления плотности тока и плотности заряда и предложен способ устранения несогласованности путём решения уравнения неразрывности;

**изучено** влияние мультипольной магнитной системы и инверсной магнитной пробки на истечение плазмы из ловушки при заданных параметрах ионизации;

**проведена модернизация** существующих математических моделей для учета процессов ионизации водорода, вычислительных методов для согласованного вычисления плотности тока и плотности заряда при движении заряженных частиц в цилиндрической геометрии, вычислительных методов движения частиц в магнитных полях с сильными градиентами, а также параллельных алгоритмов для их реализации на суперЭВМ.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработаны и внедрены** вычислительные алгоритмы и их программная реализация для численного моделирования динамики плазмы в осесимметричных магнитных ловушках-мишениях. Созданный комплекс методик и научно-исследовательских программ для моделирования динамики плазмы, используется в лаборатории параллельных алгоритмов решения больших задач Федерального государственного бюджетного учреждение науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, а также в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук для определения параметров истечения плазмы из магнитной ловушки;

**определены** перспективы практического использования разработанной численной модели для исследования фундаментальных свойств плазмы в условиях удержания магнитным полем сложной геометрии;

**создан** комплекс программ с применением параллельных вычислительных технологий для расчёта динамики плазмы в осесимметричных магнитных ловушках;

**представлены** выводы о применимости предложенной модели для описания кинетических процессов в плазме, удерживаемой сильным магнитным полем, с учётом процессов ионизации и рассеяния, а также возможные направления дальнейшего развития разработанных математических моделей, для учёта столкновений заряженных частиц между собой и объединения с МГД-моделями плазмы.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ** показана воспроизводимость результатов исследования – соответствие полученных результатов вычислительных экспериментов существующим теориям и лабораторным экспериментам;

**теория** построена на основе фундаментальных законов физики плазмы, аппарате теории вероятности и вычислительной математики, полностью согласуется с теоретическими и экспериментальными данными по теме диссертации;

**идея базируется** на анализе практики и общении передового опыта ведущих российских и зарубежных исследователей в области численного моделирования динамики заряженных частиц в самосогласованных электромагнитных полях;

**использованы** сравнения результатов вычислительных экспериментов, полученных с помощью разработанных авторских методик, с теоретическими оценками угла потерь частицы в пробкотроне, а также с экспериментальными данными по удержанию плазмы инверсным магнитным полем;

**установлено** качественное и количественное соответствие полученных автором результатов с аналитическими данными, с результатами лабораторных экспериментов, и с результатами, представленными в независимых источниках по рассматриваемой тематике;

**использованы** современные методики сбора тестовой информации и обработки результатов вычислительных экспериментов.

**Личный вклад соискателя состоит в:**

- разработке кинетической численной модели динамики плазмы в магнитной ловушке-мишени, позволяющей учесть процессы ионизации и рассеяния;
- разработке нового численного алгоритма расчёта плотности тока в цилиндрической системе координат для метода частиц в ячейках, позволяющего согласовать вычисление плотности тока и плотности заряда;
- программной реализации численных методов расчёта динамики плазмы с использованием технологий параллельных вычислений и разработке алгоритма балансировки вычислительной нагрузки;
- проведении вычислительных экспериментов для определения параметров плазмы в ловушке-мишени;
- анализе и оценке результатов вычислительных экспериментов;

- подготовке публикаций по выполненным работам.

На заседании **10 октября 2017 года** диссертационный совет принял решение присудить Берендееву Е.А. **ученую степень кандидата физико-математических наук**.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **17** человек, из них **13** докторов наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, участвовавших в заседании, из **24** человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту **0** человек, проголосовали: за **16**, против **1**, недействительных бюллетеней **0**.

Председатель

диссертационного совета Д 003.061.02

доктор физико-математических наук

член-корреспондент РАН, профессор

Кабанихин С.И.



Сорокин С.Б.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 003.061.02

доктор физико-математических наук,

доцент

Дата

«18» октября 2017 года