

ФАНО России

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук

(ИЯФ СО РАН)

Проспект ак. Лаврентьева, д. 11, г. Новосибирск, 630090

телефон: (383) 329-47-60, факс: (383) 330-71-63

<http://www.inp.nsk.su>, e-mail: inp@inp.nsk.su

ОКПО 03533872 ОГРН 1025403658136

ИНН/КПП 5408105577 / 540801001

от 21 МАР 2017 № 15311 – 44/6215-232
на № _____ от _____

Утверждаю:

Зам. директора ИЯФ СО РАН,
д. ф. – м. н., с.н.с.,
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт ядерной физики им. Г. И,
Будкера Сибирского отделения
Российской академии наук,
Иванов Александр Александрович

21.03.2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Бахарева Николая Николаевича

«Поведение быстрых частиц в сферическом токамаке Глобус-М»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «физика плазмы»

Актуальность темы исследования

Диссертация Бахарева Н.Н. посвящена исследованию поведения быстрых частиц, возникающих при дополнительном нагреве плазмы в токамаке Глобус-М методом нейтральной инжекции.

Актуальность исследования определяется назревшей к настоящему времени потребностью создания компактного источника нейтронов, который мог бы использоваться как для изучения проблем термоядерного материаловедения, так и в качестве драйвера гибридного реактора. Разработка такого источника нейтронов на основе сферического токамака представляется весьма перспективным направлением дальнейшего развития. Учитывая компактную геометрию и высокую мощность нагрева плазмы, сферический токамак Глобус-М может быть использован для изучения удержания частиц с энергиями термоядерного диапазона, что является ключевым моментом при проектировании будущих установок реакторного класса.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертационная работа Н.Н. Бахарева изложена на 129 страницах, содержит 36 рисунков и 5 таблиц; список литературы содержит 127 наименований. Работа состоит из введения, трех глав и заключения.

Во введении автор обосновывает актуальность проведенного исследования, его научную новизну и практическую значимость, формулирует научные положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 рассмотрены методы исследования поведения частиц высокой энергии, возникающих в процессе нейтральной инжекции, и результаты таких исследований, полученные на классических и сферических токамаках. Описаны основные принципы численного моделирования поведения быстрых частиц в современных токамаках. Перечислены типы потерь частиц из плазмы, на основании изучения которых автор в дальнейшем формулирует выводы работы. Дано описание основных видов диагностик, применяемых для исследования удержания быстрых ионов в токамаке.

Глава 2 посвящена описанию токамака Глобус-М, используемого диагностического комплекса и компьютерных кодов. Описан нейтронный детектор, а также комплекс корпускулярной диагностики, рассмотрены два численных кода, один из которых работает в дрейфовом приближении и для моделирования замедления частиц использует метод Монте-Карло, а второй напрямую решает уравнение движения частицы с использованием кинетического уравнения Больцмана со столкновительным членом Ландау.

Глава 3 содержит основные экспериментальные результаты работы по исследованию поведения быстрых частиц в сферическом токамаке Глобус-М в режимах с инжекцией атомов высокой энергии. Показано хорошее соответствие измеренных спектров атомов перезарядки и результатов моделирования трехмерным кодом. Проведено исследование эффективности удержания быстрых частиц в Глобусе-М в зависимости от параметров разряда. Также изучен вопрос влияния альфвеновских мод на удержание быстрых ионов. Описан переход к режиму улучшенного удержания при инжекции атомарных нагревных пучков навстречу току плазмы, приведены возможные причины такого перехода. Также проведено численное моделирование удержания быстрых частиц в сооружаемом токамаке Глобус-М2, показано заметное уменьшение уровня потерь при проектируемых параметрах установки.

В заключении автором сформулированы основные выводы работы.

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и теме диссертации

Содержание диссертации соответствует заявленной научной специальности 01.04.08 – «Физика плазмы» (физико-математические науки) и пунктам паспорта специальности:

– п. 1 «Управляемый термоядерный синтез с магнитным и инерциальным удержанием, пинчи и т.п.»

– п. 2 «Термодинамика, кинетика (в т.ч. явления переноса), оптика, элементарные процессы в плазме (ионизация, излучение, столкновения и т.п.).»

– п. 3 «Диагностика плазмы: волны, неустойчивости, течения, нелинейные явления (самоорганизация, структуры, турбулентность и т.п.), аномальный перенос, электромагнетизм и т. п.»

– п. 4 «Диагностика плазмы»

Соответствие автореферата диссертации её содержанию

Текст автореферата соответствует содержанию диссертации

Личный вклад соискателя в получение результатов исследования

Личное участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии. При непосредственном участии автора был разработан компьютерный код, позволяющий моделировать поведение быстрых частиц в плазме сферического токамака, код NUBEAM был адаптирован для условий сферического токамака, была проведена модернизация комплекса корпускулярной диагностики. Автору принадлежит определяющая роль в расчете потерь частиц высокой энергии в сферическом токамаке Глобус-М и в сооружаемом сферическом токамаке Глобус-М2. Автор принимал активное участие в экспериментах на токамаке Глобус-М, осуществляя измерения спектров атомов перезарядки, ионной температуры и изотопного состава плазмы. Автору принадлежит определяющая роль в исследованиях зависимости удержания быстрых частиц в токамаке Глобус-М от параметров плазмы и нейтральной инжекции, а также потерь ионов высокой энергии в токамаке Глобус-М при возникновении неустойчивостей.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность полученных результатов обеспечена хорошим соответствием экспериментальных результатов, полученных в результате многократного повторения измерений, с результатами моделирования с помощью нескольких компьютерных кодов. Полученные данные не противоречат результатам экспериментов на других сферических токамаках. Описываемые в работе результаты были опубликованы в реферируемых журналах, а также доложены на российских и международных конференциях и на семинарах и совещаниях лаборатории Физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А. Ф. Иоффе и ЛФУУПТ СПбПУ.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором диссертации результатов

Научная значимость работы заключается в расширении знаний о поведении частиц высокой энергии в сферических токамаках, в том числе о зависимости потерь быстрых частиц от тока плазмы и тороидального магнитного поля, плотности плазмы и положения плазмы внутри камеры; о потерях высокоэнергичных ионов, вызванных пилообразными колебаниями и

альфвеновскими модами; об особенностях контр-инжекции в сферических токамаках.

Практическая значимость работы заключается в разработке и внедрении методов моделирования поведения частиц высокой энергии, а также в модернизации комплекса корпускулярной диагностики сферического токамака Глобус-М. Применение диагностического комплекса и компьютерных кодов позволило провести исследования поведения быстрых частиц в токамаке при инжекции высокоэнергичных атомов дейтерия и водорода. Внедренные на токамак Глобус-М методы расчета потерь быстрых частиц были использованы для определения потерь при нейтральной инжекции в Глобус-М2 и могут быть применены при определении оптимальных параметров токамаков следующего поколения, таких как Глобус-М3.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Разработанные в диссертации коды и методы расчета потерь быстрых частиц могут быть использованы при моделировании режимов работы термоядерных реакторов и источников нейтронов на основе сферических токамаков. Также при проектировании будущих установок должны быть учтены приведенные в диссертации результаты исследований поведения быстрых частиц в зависимости от параметров плазмы – ток плазмы должен быть как можно выше, но не превышать критического значения, после которого возникают неустойчивости на границе, приводящие к дополнительным потерям быстрых частиц; расстояние плазма-стенка не должно быть слишком мало; для уменьшения потерь на пролет плотность плазмы не следует выбирать слишком низкой. Контр-инжекция атомов высокой энергии может быть использована для получения режима улучшенного удержания без ELM-ов, однако, из-за высоких потерь с первой орбиты ее следует совмещать с ко-инжекцией для эффективного нагрева плазмы и генерации токов увлечения.

Новизна полученных результатов

Впервые на компактный сферический токамак Глобус-М внедрен численный код, рассчитывающий траектории частиц с помощью решения уравнения движения в электрическом и магнитном полях и замедление быстрых ионов с помощью решения кинетического уравнения Больцмана.

Впервые на компактном сферическом токамаке подробно исследованы потери быстрых частиц в режимах с инжекцией водорода и дейтерия высокой энергии, изучена зависимость потерь быстрых ионов от тока плазмы и тороидального магнитного поля, изучено влияние пилообразных колебаний на потери быстрых ионов.

Впервые на компактном сферическом токамаке со стенкой, близко расположенной к плазме, исследована и объяснена зависимость удержания высокоэнергичных ионов от зазора плазма-стенка.

Впервые на сферическом токамаке обнаружены потери высокоэнергичных ионов при развитии единичных тороидальных альфвеновских мод.

Впервые на токамаке Глобус-М исследованы потери быстрых частиц в режиме с контр-инжекцией водорода высокой энергии.

Впервые выполнены расчеты потерь быстрых частиц для токамака Глобус-М2.

Замечания по диссертационной работе

1. Стр. 38: «Например, ионы, движущиеся перпендикулярно магнитному полю, стабилизируют пилообразные колебания, в то время как ионы, движущиеся вдоль магнитного поля, возбуждают альфвеновские моды.» Эти утверждения хотелось бы подкрепить ссылками на опубликованные работы.
2. Стр. 54: перезарядка на быстрых ионах - учитывается ли превращение получившегося "быстрого атома" обратно в ион? Как говорилось выше, пучок из инжектора почти полностью захватывается. Значит, вероятность ионизации "быстрого атома" также высока и такой процесс надо учитывать. Если этот процесс учитывается, то возникает следующий вопрос: насколько сильно различаются параметры орбит этого иона до его перезарядки (пока ещё он не столкнулся с частицей пучка и не превратился в "быстрый атом") и после превращения его опять в ион?
3. Стр. 64: Как выбираются границы интервала $[u_L, u_R]$? Как выбирается количество ячеек на этом интервале? Последний вопрос связан с заменой дельта-функции на гауссовский профиль (формула 2.39). Если бы размер ячейки оказался больше малого параметра d , то не было бы разницы, какой профиль использовать - дельта-функциональный или гауссовский. Поэтому либо замена 2.39 не нужна, либо количество ячеек определяется малым параметром d . Если всё же принять, что замена 2.39 необходима, то не следует ли отказаться от равномерной сетки (формула 2.40) и вести расчёты на неравномерной со сгущениями около пиков гауссовских профилей?
4. Как построен код из параграфа 2.3, в котором решение кинетического уравнения объединено с расчётом траекторий? В параграфе 2.3 описано, как находить траектории в бесстолкновительном случае и как решать кинетическое уравнение (правда, всего с одной, энергетической координатой), но ничего не написано, как две эти части связать между собой.
5. Стр. 84, рисунок 3.11. Неясно, сплошная линия на рисунке - это аппроксимация или результаты расчётов. Экспериментальные точки, с учётом ошибок измерений, оказываются достаточно близко к сплошной линии. Однако, вызывает вопрос, насколько хорошо эта линия совпадает с экспериментальными точками. Сплошная линия показывает плавный спад параметра «neutron rate drop» на всём промежутке Δ от 3 до 8 см.

Экспериментальные точки ведут себя по-другому, они делятся на две группы: первая с $\Delta < 4.5-5$ см и «neutron rate drop» $> 15\%$, вторая с $\Delta > 4.5-5$ см и «neutron rate drop» $< 15\%$. То есть при переходе через границу $\Delta = 4.5-5$ см величина «neutron rate drop» довольно сильно меняется, а слева и справа от границы меняется не очень существенно. Это может указывать на изменение режима пилообразных колебаний при пересечении этой границы.

6. Стр. 94, рисунок 3.17. Не подписана ось абсцисс.

7. В тексте работы присутствует некоторое количество мелких грамматических и пунктуационных ошибок.

Заключение по диссертации о соответствии ее требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» по пунктам 9 и 10.

Диссертация Бахарева Николая Николаевича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является законченной научно-квалификационной работой, обладающей научной новизной и содержащей научные положения, имеющие существенное значение для физики удержания плазмы в сферических токамаках.

Работа соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Заключение рассмотрено на заседании семинара лабораторий физики плазмы ИЯФ СО РАН

21.03.2017, № протокола 1

Заключение составлено:

Солдаткина Елена Ивановна, к.ф.-м.н., с. н. с. лаб. 9-1 ИЯФ СО РАН, научная специальность 01.04.08 – «физика плазмы»

630090 г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11, тел. 8(383)3294224, email E.I.Soldatkina@inp.nsk.su

Солдаткина Е.И.

Дата 21.03.2017

Подпись Солдаткиной Е.И. заверил Учёный секретарь ИЯФ СО РАН

к. ф.- м. н. Ракшун Яков Валерьевич,

тел.: 8(383) 329-44-13

Ya.V.Rakshun@inp.nsk.su