

*На правах рукописи*

**Бахарев Николай Николаевич**

**ПОВЕДЕНИЕ БЫСТРЫХ ЧАСТИЦ В СФЕРИЧЕСКОМ  
ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель  
наук

доктор физико-математических  
главный научный сотрудник

Гусев В.К.

Официальные оппоненты

Батанов Герман Михайлович

доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник, ИОФ РАН

Днестровский Алексей Юрьевич

кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник, ГЕОХИ РАН

Ведущая организация

Институт Ядерной Физики  
им. Г.И. Будкера СО РАН

Защита состоится « » 2017г. в \_ : \_ на заседании Диссертационного Совета Д002.205.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук и на сайте [www.ioffe.ru](http://www.ioffe.ru)

Автореферат разослан « » 201 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

Кандидат физико-математических наук

Красильщиков А.М.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Диссертация посвящена актуальной проблеме удержания быстрых частиц в плазме сферического токамака. Работа выполнена на компактном сферическом токамаке Глобус-М.

Одним из наиболее перспективных способов приблизить начало практического использования ядерного синтеза является создание гибридных реакторов синтез-деление [1], проекты которых активно обсуждаются последние несколько лет. В такой системе токамак будет использован для управления подкритической зоной ядерного реактора деления с помощью потока нейтронов, возникающих в результате реакции синтеза. При этом для получения необходимой интенсивности потока нейтронов будет достаточно токамака, работающего по схеме пучок-плазма. В данном токамаке реакция синтеза будет осуществляться за счет взаимодействия ядер с энергией несколько сотен кэВ, возникающих при применении инжекции атомов высокой энергии, и ядер относительно холодной плазмы с температурой несколько кэВ. Это отличает гибридную установку от классических токамаков-реакторов, где происходит синтез ядер основной плазмы, нагретой до высокой температуры. Схема такого двухкомпонентного токамака-реактора была предложена Арцимовичем [2] и развита Jassby [3, 4]. Основное преимущество этой схемы – отсутствие необходимости в самоподдерживающейся термоядерной реакции, поскольку энергетические затраты на поддержание разряда будут компенсироваться за счет энергии, выделяемой при делении ядер урана или тория. Благодаря этому требования к токамаку-генератору нейтронов существенно ниже, чем к классическому термоядерному реактору.

Для создания прототипа такого токамака необходимо поддерживать температуру плазменной мишени на уровне в несколько кэВ при плотности

плазмы  $10^{20} \text{ м}^{-3}$ . Такие параметры уже достигнуты на крупных современных токамаках, а уменьшение их размеров и стоимости является вполне осуществимой задачей в недалекой перспективе. Гибридный реактор, состоящий из токамака-генератора нейтронов и ядерного blankets, обеспечивает безопасность, работая в подкритическом режиме, поскольку в нем принципиально невозможна неконтролируемая реакция деления ядер урана или тория. Кроме того, использование нейтронов синтеза с высокой энергией 14,1 МэВ позволяет повысить глубину выгорания ядерного топлива, а также проводить испытания материалов для классических термоядерных реакторов типа ITER и трансмутацию долгоживущих актинидов (отходов работы атомных электростанций). Отметим, что классический путь развития термоядерного синтеза, предполагающий, в случае успешной работы ITER, строительство демонстрационного реактора DEMO [5], также предусматривает сооружение нейтронного источника. Он будет необходим для тестирования и разработки новых материалов и компонентов будущего токамака.

Для снижения стоимости сооружения и эксплуатации будущего токамака-источника нейтронов в ряде проектов, например [6–9], предполагается использовать компактный сферический токамак.

Для того чтобы компактный источник нейтронов на основе сферического токамака был коммерчески привлекательным, необходимо решить ряд принципиальных проблем. Одна из таких проблем – недостаточно хорошее удержание быстрых частиц, возникающих при дополнительном нагреве плазмы в сферическом токамаке. Большие потери высокоэнергичных частиц будут снижать скорость реакции синтеза, что приведет к уменьшению эффективности генерации нейтронов. Также, покидая плазму, быстрые частицы будут разрушать первую стенку токамака, из-за чего стационарная работа станет невозможной. Отработка режимов с хорошим удержанием быстрых частиц является залогом успешной оптимизации параметров будущих компактных источников нейтронов,

однако для этого требуется исследование поведения частиц высокой энергии в компактных сферических токамаках.

Благодаря своей компактной геометрии и высокой плотности мощности дополнительного нагрева, токамак Глобус-М [10] является оптимальной установкой для изучения поведения частиц высокой энергии в компактных сферических токамаках [11, 12]. Помимо этого, полученные в результате таких исследований данные, будут представлять интерес для сферических токамаков среднего и большого размера [12, 13].

Таким образом, описанное в диссертации исследование поведения быстрых частиц, возникающих при дополнительном нагреве плазмы в токамаке Глобус-М методом нейтральной инжекции, является актуальным.

В данном автореферате под быстрыми частицами понимаются как инжектируемые в плазму токамака атомы высокой энергии, так и надтепловые (быстрые) ионы, возникающие из-за ионизации этих атомов.

**Степень разработанности темы исследования.** Поведение быстрых частиц в компактных сферических токамаках обладает рядом особенностей из-за малых размеров установки и относительно низкого значения магнитного поля при большом градиенте. В отличие от поведения частиц высокой энергии в классических установках, в сферических токамаках оно изучено довольно плохо. Это связано с новизной данного направления, а также с тем, что из всех существующих в мире сферических токамаков, инжектором – основным источником быстрых частиц – были оснащены только токамаки Глобус-М (Россия), NSTX (США), MAST (Великобритания) и START (Великобритания). Эксперименты на этих установках показали высокий уровень потерь быстрых частиц, а также ограниченную применимость классических методов расчетов потерь.

**Цели и задачи.** Цели научного исследования:

-Исследование поведения быстрых частиц в сферическом токамаке Глобус-М в режимах с ко- и контр-инжекцией высокоэнергетичных изотопов водорода.

-Оптимизация режимов работы токамака Глобус-М для снижения потерь быстрых частиц в режимах с дополнительным нагревом плазмы.

-Оценка потерь быстрых частиц в токамаке Глобус-М2.

В ходе работы решались следующие задачи:

1. Адаптировать код NUBEAM для применения в токамаке Глобус-М, провести модернизацию комплекса корпускулярной диагностики токамака, разработать численный алгоритм, оптимизированный для условий компактного сферического токамака, позволяющий проводить расчет потерь быстрых частиц.
2. Провести серию экспериментов по инжекции атомов высокой энергии в плазму сферического токамака Глобус-М в широком диапазоне токов плазмы (105 – 250 кА), значений тороидального магнитного поля (0.25 – 0.4 Тл), энергий инжекции (18 – 26 кэВ), плотностей ( $1.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  –  $6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ), при разном положении плазменного шнура внутри камеры (расстояние от стенки токамака до границы плазмы от 3 см до 8 см).
3. Изучить влияние плазменных неустойчивостей (пилообразных колебаний и альфвеновских мод) на потери быстрых ионов.
4. Провести измерения потерь надтепловых частиц в режиме с контр-инжекцией атомов высокой энергии в токамаке Глобус-М.
5. Провести моделирование поведения быстрых частиц в токамаке Глобус-М2.

#### **Научная новизна.**

- 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.

- Впервые на токамаке Глобус-М изучена зависимость потерь быстрых ионов от тока плазмы и тороидального магнитного поля.
- Впервые на компактном сферическом токамаке со стенкой, близко расположенной к плазме, исследована и объяснена зависимость удержания высокоэнергетичных ионов от зазора плазма-стенка.
- Впервые на компактном сферическом токамаке исследовано влияние пилообразных колебаний на потери быстрых ионов.
- Впервые на сферическом токамаке обнаружены потери высокоэнергетичных 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 в токамаке Глобус-М2.

**Научная и практическая значимость работы.** 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 высокоэнергетичных ионов, вызванных пилообразными колебаниями и альфвеновскими модами; об особенностях контр-инъекции 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 высокоэнергетичных атомов дейтерия и водорода. Методы расчета потерь быстрых частиц в сферических токамаках, внедренные на токамак Глобус-М, были использованы для определения

потерь при нейтральной инжекции в токамаке Глобус-М2 и могут быть применены при определении оптимальных параметров токамаков следующего поколения, таких как Глобус-М3.

**Методология и методы исследования.** Экспериментальные исследования проводились на сферическом токамаке Глобус-М. Для дополнительного нагрева и генерации быстрых частиц была использована инжекция пучков изотопов водорода высокой энергии. Для определения параметров плазмы применялся уникальный диагностический комплекс токамака. Магнитная конфигурация восстанавливалась с помощью кода EFIT. Моделирование поведения быстрых частиц проводилось с помощью разработанного орбитального кода, предназначенного для сферических токамаков. Основным принципом данного кода – решение уравнения движения частиц в магнитном и электрическом полях с учетом трехмерной геометрии для определения траекторий частиц и решение кинетического уравнения Больцмана с учетом диффузии по скоростям, углового рассеяния и потерь на перезарядку для описания торможения ионов высокой энергии в плазме. Также для моделирования поведения частиц высокой энергии был использован код NUBEAM, получивший широкое распространение на классических токамаках и ставший своего рода стандартом в области моделирования поведения частиц высокой энергии. При изучении удержания быстрых частиц при различных параметрах плазмы в токамаке Глобус-М ток плазмы менялся от 105 до 250 кА, а тороидальное магнитное поле – от 0.25 Тл до 0.4 Тл; плотность плазмы – от  $1.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  до  $6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , зазор плазма-стенка от 3 см до 8 см. Потери быстрых ионов при возникновении пилообразных колебаний и альфвеновских мод определялись с помощью анализатора атомов перезарядки и нейтронного детектора.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Адаптация кода NUBEAM для условий сферического токамака Глобус-М. Разработка компьютерного кода, позволяющего моделировать поведение

быстрых частиц при инжекции нейтрального пучка высокой энергии в плазму компактного сферического токамака.

2. Моделирование потерь частиц высокой энергии, возникающих при нейтральной инжекции в плазму сферического токамака Глобус-М и в плазму сооружаемого сферического токамака Глобус-М2 – установки с увеличенным магнитным полем и током плазмы.

3. Исследование удержания быстрых частиц в токамаке Глобус-М в зависимости от параметров плазмы.

4. Исследование потерь ионов высокой энергии в токамаке Глобус-М при возникновении неустойчивостей в плазме токамака.

5. Исследование потерь частиц высокой энергии в токамаке Глобус-М при инжекции атомов навстречу току плазмы (контр-инжекции).

**Достоверность и апробация результатов.** 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 обсуждались на российских и международных конференциях и на семинарах и совещаниях лаборатории Физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А. Ф. Иоффе и ЛФУУПТ СПбПУ.

**Личный вклад автора.** 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 в плазме токамака.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Диссертация изложена на 129 страницах, содержит 36 рисунков и 5 таблиц; список литературы содержит 127 наименований.

### **Содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, описывается степень разработанности темы исследования, формулируются цели, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов.

**Первая глава** представляет собой обзор литературы, посвященный теоретическим и экспериментальным методам исследования быстрых частиц в токамаках, а также основным результатам этих исследований на классических и сферических токамаках.

**В параграфе 1.1** рассмотрены общие принципы моделирования нейтральной инжекции, применяемого для исследования поведения быстрых частиц в токамаках. Моделирование, как правило, состоит из трех частей: расчет ионизации инжектируемого пучка (п. 1.1.1), вычисление орбит быстрых ионов (п. 1.1.2), моделирование их замедления (п. 1.1.3). В п. 1.1.4 описаны основные виды потерь быстрых частиц: прямые потери, включающие потери атомов высокой энергии напролет и потери быстрых

ионов с первой орбиты; потери высокоэнергетичных ионов при торможении; потери быстрых ионов из-за МГД неустойчивостей плазмы.

**В параграфе 1.2** дан обзор диагностических методов исследования ионов высокой энергии: детекторов потерь быстрых ионов (п. 1.2.1), гамма-диагностики (п. 1.2.2), диагностики коллективного томсоновского рассеяния (п. 1.2.3), D- $\alpha$  диагностики быстрых ионов (п. 1.2.4.), нейтронной диагностика (п. 1.2.5), и корпускулярной диагностики (п. 1.2.6), применяемой на токамаке Глобус-М.

**В параграфе 1.3** описаны основные результаты исследований поведения быстрых частиц в токамаках. В п. 1.3.1 говорится о классических токамаках, где поведение быстрых частиц достаточно хорошо изучено, а значительные потери связаны только с МГД-неустойчивостями плазмы, в особенности с альфвеновскими модами. Поведение частиц высокой энергии в сферических токамаках изучено гораздо хуже. В п. 1.3.2. описываются результаты исследований удержания частиц высокой энергии в сферических токамаках. В этих установках существуют благоприятные условия для развития альфвеновских мод, а также наряду с потерями, связанными с МГД-неустойчивостями, существенную роль могут играть прямые потери и потери при замедлении.

**В параграфе 1.4** изложены основные выводы к главе 1.

**Вторая глава** посвящена описанию токамака Глобус-М, используемых диагностик и компьютерных кодов.

**В параграфе 2.1** дано описание экспериментальной установки. В п. 2.1.1 приведены основные параметры сферического токамака Глобус-М и используемого инжектора атомов высокой энергии. Рассматривается диагностический комплекс установки. В п. 2.1.2 описывается нейтронный детектор, а также комплекс корпускулярной диагностики (рисунок 1), состоящий из двух анализаторов атомов перезарядки: АКОРД-12 и АКОРД-24М.

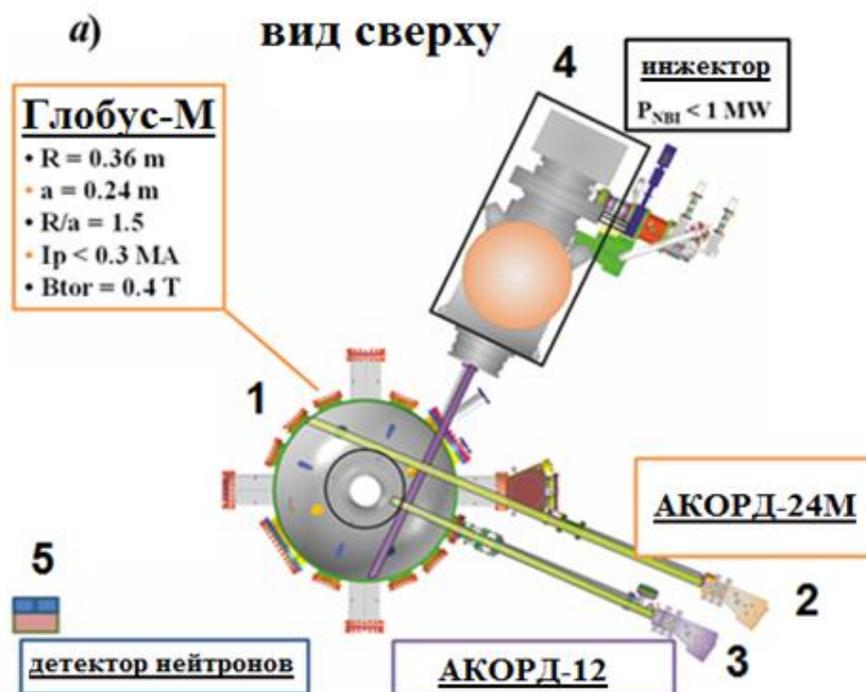


Рисунок 1. Основные диагностики сферического токамака Глобус-М (1), использованные в работе: 2 – анализатор АКОРД-24М, 3 – анализатор АКОРД-12, 4 – инжектор, 5 – нейтронный детектор.

В параграфе 2.2 рассмотрен код NUBEAM, в котором для расчета орбит быстрых ионов применяется обобщенное дрейфовое приближение, адаптированное для использования в сферических токамаках, а моделирование замедления быстрых ионов осуществляется с помощью статистического метода Монте-Карло.

В параграфе 2.3 описан разработанный при участии автора трехмерный алгоритм, вычисляющий траектории частиц, объединенный с решением уравнения Больцмана. Трехмерный алгоритм вычисляет орбиты ионов без приближений, путем решения уравнения движения в электрическом и магнитном полях. Замедление описывается кинетическим уравнением Больцмана со столкновительным членом Ландау с учетом диффузии по скоростям и потерь на перезарядку. В п. 2.3.1. рассмотрена основная часть кода, рассчитывающая функцию распределения быстрых ионов в плазме токамака. В п. 2.3.2. рассмотрена часть кода, моделирующая спектры атомов, регистрируемые анализатором атомов перезарядки, применяемая для сравнения с экспериментальными данными.

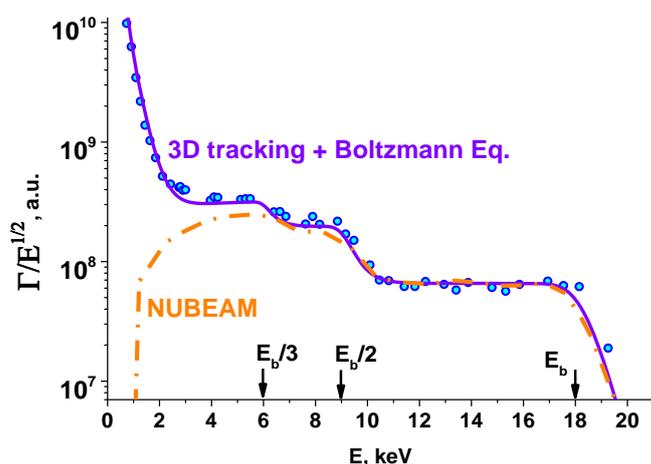


Рисунок 2. Спектры атомов перезарядки при инъекции водорода с энергией 18 кэВ, измеренные анализатором АКОРД-24М (круги, разряды #32990-32998) и полученные в результате моделирования. Сплошная линия – трехмерное отслеживание траекторий и решение уравнения Больцмана, штрихпунктирная – код NUBEAM.

## В параграфе 2.4

изложены основные выводы к главе 2.

## Третья глава посвящена

исследованию поведения быстрых частиц в сферическом токамаке Глобус-М в режимах с инъекцией атомов высокой энергии.

## В параграфе 3.1

рассмотрены основные особенности удержания

быстрых частиц в токамаке Глобус-М. Отмечается, что при инъекции пучков атомов водорода и дейтерия в токамаке Глобус-М существуют значительные потери быстрых частиц. Наименьшие потери быстрых частиц наблюдаются при инъекции водорода с энергией 18 кэВ и достигают до 40-50%. В этом случае прямые потери и потери на перезарядку при замедлении сравнимы. Результаты моделирования находятся в хорошем соответствии с экспериментом. Это проиллюстрировано на рисунке 2, где изображены спектры атомов перезарядки при инъекции водорода с энергией 18 кэВ, измеренные анализатором АКОРД-24М и полученные в результате моделирования. При инъекции дейтерия с энергией, увеличенной до 26 кэВ, потери существенно выше и достигают 80-90%. При этом преобладают потери с первой орбиты. Подчеркивается, что пилообразные колебания приводят к дополнительным потерям ионов высокой энергии. В п. 3.1.1. сформулированы основные выводы к параграфу 3.1.

**Параграф 3.2** посвящен исследованию удержания быстрых частиц в токамаке Глобус-М в зависимости от параметров плазмы: тока плазмы и тороидального магнитного поля (п. 3.2.1), положения плазменного шнура (п. 3.2.2.) и плотности плазмы (п. 3.2.3). Утверждается, что в токамаке Глобус-М

наблюдается сильная зависимость потерь с первой орбиты от величины тока плазмы и более слабая зависимость от значения тороидального магнитного поля. Отмечается, что сдвиг плазменного шнура внутрь приводит к улучшению удержания ионов высокой энергии. Приводятся основные причины этого улучшения: смещение орбит быстрых ионов внутрь в сторону сильного магнитного поля, связанное с более компактной магнитной конфигурацией; сжатие профиля плотности, приводящее к ионизации ближе к внутренней стенке токамака в области с большим магнитным полем; уменьшение потерь из-за пилообразных колебаний. Утверждается, что при низких плотностях ( $n < 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ) эффективность нагрева плазмы сильно возрастает при увеличении плотности плазмы. В первую очередь это связано с уменьшением потерь на пролет. В п. 3.2.4 сформулированы основные выводы к параграфу 3.2.

**В параграфе 3.4** рассматривается влияние альфвеновских мод на удержание быстрых ионов в токамаке Глобус-М. Отмечается, что тороидальные альфвеновские моды приводят к потерям быстрых ионов.

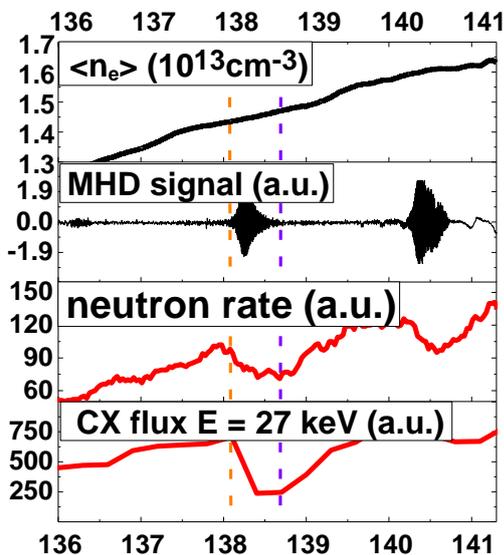


Рисунок 3. Корреляция тороидальных альфвеновских мод с падением нейтронного выхода и потока атомов перезарядки с энергией 27 кэВ (близкой к энергии инжекции) в разряде #31996 при инжекции дейтерия в дейтериевую плазму.

Наибольшие потери наблюдаются при инжекции дейтерия и составляют 25-30%. Корреляция тороидальных альфвеновских мод с падением нейтронного выхода и потока атомов перезарядки с энергией 27 кэВ (близкой к энергии инжекции) для этого случая показана на рисунке 3. В случае инжекции водорода потери быстрых ионов ниже, чем при инжекции дейтерия. Сделано заключение, что это связано с зависимостью ширины орбиты и радиуса ларморовского вращения иона от его

массы. В п. 3.3.1 сформулированы основные выводы к параграфу 3.3.

**В параграфе 3.4** обсуждается удержание быстрых частиц при контр-инжекции атомов высокой энергии. Отмечаются высокие потери вводимой мощности. Обращается внимание на то, что изменение тока плазмы и расстояния плазма-стенка не приводит к улучшению удержания быстрых ионов, как это происходит в экспериментах с ко-инжекцией атомов высокой энергии. Сформулированы возможные причины перехода в режим улучшенного удержания без ELMов: высокое значение электрического поля, связанное с большими потерями быстрых частиц, и уменьшение градиента давления на границе из-за существования моды  $m/n = 2/1$ . В п. 3.4.1 сформулированы основные выводы к параграфу 3.4.

**В параграфе 3.5** приведены результаты расчетов потерь частиц высокой энергии в сооружаемом токамаке Глобус-М2, в котором тороидальное магнитное поле будет увеличено до 1 Тл, а ток плазмы – до 500 кА. Моделирование показывает, что это приведет к заметному улучшению удержания быстрых ионов. Зависимость прямых потерь надтепловых частиц от среднехордовой электронной плотности для случая инжекции дейтерия 30 кэВ в токамаке Глобус-М (0.4 Тл), а также 30 и 50 кэВ (новый инжектор) в

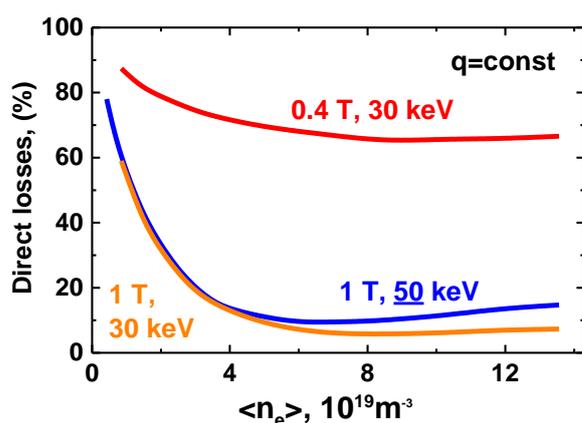


Рисунок 4. Зависимость прямых потерь надтепловых частиц от среднехордовой электронной плотности для случая инжекции дейтерия 30 кэВ в токамаке Глобус-М (0.4 Тл) и для случая инжекции дейтерия 30 и 50 кэВ в токамаке Глобус-М2 (1 Тл).

токамаке Глобус-М2 показана на рисунке 4. Отмечается, что повышение магнитного поля, тока плазмы и энергии инжекции позволит приблизить Глобус-М2 по параметрам к будущим источникам нейтронов. Оценка показывает, что нейтронный выход в токамаке Глобус-М2 будет  $\sim 10^{13} \text{c}^{-1}$ , что на два порядка выше, чем в рассмотренных экспериментах на

токамаке Глобус-М. Потери при контр-инжекции в токамаке Глобус-М2 все еще будут велики, однако, поглощенная мощность инжекции возрастет более чем на порядок по сравнению с токамаком Глобус-М. В п. 3.5.1. сформулированы основные выводы к параграфу 3.5.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Код NUBEAM адаптирован для условий сферического токамака Глобус-М. Разработан компьютерный код, позволяющий моделировать поведение быстрых частиц в сферическом токамаке. Он включает в себя трехмерный алгоритм, вычисляющий траектории ионов высокой энергии, объединенный с решением уравнения Больцмана для описания их замедления.
2. Выполнено моделирование потерь частиц высокой энергии, возникающих при нейтральной инжекции в плазму сферического токамака Глобус-М и в плазму сооружаемого сферического токамака Глобус-М2 – установки с увеличенным магнитным полем и током плазмы.
3. Исследовано удержание быстрых частиц в токамаке Глобус-М в зависимости от параметров плазмы: тока плазмы, тороидального магнитного поля, положения плазменного шнура, плотности плазмы.
4. Исследованы потери ионов высокой энергии в токамаке Глобус-М при возникновении неустойчивостей: пилообразных колебаний и тороидальных альфвеновских мод.
5. Исследованы потери частиц высокой энергии в токамаке Глобус-М при инжекции атомов навстречу току плазмы.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

Основные результаты работы представлены в 12 докладах на конференциях:

1. Bakharev N.N. Counter-NBI experiments on Globus-M. / Bakharev N.N., F.V. Chernyshev, P. R. Goncharov et al.// proc. of 26th IAEA FEC 2016 – Kyoto, 2016. – EX/P4-44.
2. Бахарев Н.Н. Первые эксперименты по контр-инжекции на сферическом

токамаке Глобус-М. /Бахарев Н.Н., Гончаров П.Р., Гусев В.К. и др.// В сб. XLIII Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС. – Звенигород, 2016. – с. 108.

3. Bakharev N.N., Globus-M plasma physics research for fusion application and compact neutron source development. / N.N. Bakharev, V.K. Gusev // proc. of 42nd EPS Conference on Plasma Physics – 2015, Lisbon – I5.120.

4. Bakharev N.N., Globus-M plasma physics research for fusion application and compact neutron source development. / N.N. Bakharev, F.V. Chernyshev, P.R. Goncharov et al. // proc. of 42nd EPS Conference on Plasma Physics – 2015, Lisbon – P5.127.

5. Бахарев Н.Н. Моделирование поведения быстрых частиц в токамаке ГЛОБУС-М / Бахарев Н.Н., Гончаров П.Р., Гусев В.К. и др. // В сб. XLII Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС – Звенигород, 2015. – с. 100.

6. Бахарев Н.Н. Удержание ионов высокой энергии в токамаках ГЛОБУС-М и ГЛОБУС-М2 / Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Дьяченко В.В. и др.// В сб. XLI Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС – Звенигород, 2014. – с. 57.

7. Petrov Yu.V. Fast particle losses induced by Toroidal Alfvén Eigenmodes on Globus-M / Yu.V. Petrov, N.N. Bakharev, V.K. Gusev et al. // Proc. of 41<sup>st</sup> EPS conference on Plasma Phys. – Berlin, 2014.– ECA Vol. 38F – P4.044.

8. Bakharev N.N. Fast ion confinement analysis in Globus-M / N.N. Bakharev, F.V. Chernyshev, V.K. Gusev и др.// Proc. of 41<sup>st</sup> EPS conference on Plasma Phys. – Berlin, 2014. – ECA Vol. 38F – P4.079.

9. Bakharev N.N. Fast Particle Behavior in Globus-M / Bakharev N.N., F. Chernyshev, P. Goncharov et al.// Proc. of 25th FEC IAEA conference – Saint-Petersburg, 2014.– EX/P1-33.

10. Бахарев Н.Н. Исследование ионного компонента плазмы в экспериментах со смещением плазменного шнура на токамаке Глобус-М / Н.Н. Бахарев, В.К. Гусев, А.Д. Мельник и др.// В сб. XL Звенигородская

конференция по физике плазмы и УТС – Звенигород, 2013. – с. 70.

11. Бахарев Н.Н. Исследование поведения плазмы при нагреве атомным пучком с помощью комплекса корпускулярной диагностики на токамаке Глобус-М / Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Ибляминова А.Д. и др. // В сб. конференции ДВП-15, – Звенигород, 2013. – с. 79 – 81.

12. Бахарев Н.Н. Исследование взаимодействия инжектируемых высокоэнергичных дейтронов с плазмой сферического токамака Глобус-М / Бахарев Н.Н., Гусев В.К. // в сб. конференции Физика Спб, – Санкт-Петербург, 2013. – С. 279-281.

и в 7 статьях в реферируемых журналах:

1. Gusev V. K. Globus-M plasma physics research for fusion application and compact neutron source development / V. K. Gusev, N. N. Bakharev, B. Ya. Ver. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion – 2016. –Т. 58 – с. 014032.

2. Petrov Yu. V. Effect of toroidal Alfvén eigenmodes on fast particle confinement in the spherical tokamak Globus-M / Yu. V. Petrov, N. N. Bakharev, V. K. Gusev et al. // J. Plasma Phys. –2015. – Т. 81 – с. 515810601.

3. Bakharev N.N. Fast particle behaviour in the Globus-M spherical tokamak / N.N. Bakharev, F.V. Chernyshev, P.R. Goncharov et al. // Nucl. Fusion – 2015. – Т. 55 – 55043023.

4. Петров Ю.В. Влияние тороидальных альфвеновских мод на удержание быстрых частиц в сферическом токамаке Глобус-М / Петров Ю.В., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Минаев В.Б. и др. // ПЖТФ – 2014. – Т. 40 – с. 99-106.

5. Gusev V.K. Globus-M Results as the Basis for Compact Spherical Tokamak with enhanced Parameters Globus-M2 / V.K. Gusev, E.A. Azizov, A.V. Alekseev et al. // Nuclear Fusion – 2013. – Т. 53 – с. 093013.

6. Бахарев Н.Н. Исследование процессов взаимодействия высокоэнергичных дейтронов с плазмой сферического токамака Глобус-М / Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Ибляминова А.Д. и др. // ПЖТФ – 2013. – Т. 39 – с. 22 – 30.

7. Бахарев Н.Н. Модернизация комплекса корпускулярной диагностики токамака Глобус-М / Н.Н. Бахарев, А.Д. Мельник, В.Б. Минаев и др. //

Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки – 2012. – Т. 158 – с. 74 – 79.

### **Литература, цитируемая в автореферате**

1. Freidberg J.P. Fusion–fission hybrids revisited / Freidberg J.P., Kadak A.C. // Nature Physics – 2009. – Т. 5 – № 6 – С.370–372.
2. Арцимович Л.А. Управляемые термоядерные реакции / Л. А. Арцимович / под ред. В.А. Лешковцева, Б.Л. Лившица. – М.: Физматгиз, 1961.– 468с.
3. Jassby D.L. Optimization of fusion power density in the two-energy-component tokamak reactor / Jassby D.L. // Nuclear Fusion – 1975. – Т. 15 – № 3 – С.453–464.
4. Jassby D.L. Neutral-beam-driven tokamak fusion reactors / Jassby D.L. // Nuclear Fusion – 1977. – Т. 17 – № 2 – С.309–365.
5. Hiwatari R. Demonstration tokamak fusion power plant for early realization of net electric power generation / Hiwatari R., Okano K., Asaoka Y., Shinya K., Ogawa Y. // Nuclear Fusion – 2005. – Т. 45 – С.96–109.
6. Menard J. Configuration Studies for an ST-Based Fusion Nuclear Science Facility. IAEA 25th Fusion Energy Conference. / J. Menard, M. Boyer, T. Brown, J. Canik, B. Covele, C. D. Angelo, A. Davis, S. Gerhardt, S. Kaye, C. Kessel, M. Kotschenreuther, S. Mahajan – St. Petersburg, 2014.– LLNL-PROC-661899с.
7. Zheng S. Neutronics analysis of the conceptual design of a component test facility based on the spherical tokamak / Zheng S., Voss G.M., Pampin R. // Fusion Engineering and Design – 2010. – Т. 85 – № 10–12 – С.2300–2304.
8. Kuteev B.V. Steady-state operation in compact tokamaks with copper coils / Kuteev B.V., Azizov E.A., Bykov A.S., Dnestrovsky A.Y., Dokuka V.N., Gladush G.G., Golikov A.A., Goncharov P.R., Gryaznevich M., Gurevich M.I., Ivanov A.A., Khairutdinov R.R., Khripunov V.I., Kingham D., Klishchenko A.V.,

Kurnaev V.A., Lukash V.E., Medvedev S.Y., Savrukhin P.V., Sergeev V.Y., Shpansky Y.S., Sykes A., Voss G., Zhirkin A.V. // Nuclear Fusion – 2011. – Т. 51 – № 7 – С.73013.

9. Menard J.E. Fusion nuclear science facilities and pilot plants based on the spherical tokamak / Menard J.E., Brown T., El-Guebaly L., Boyer M., Canik J., Colling B., Raman R., Wang Z., Zhai Y., Buxton P., Covele B., D'Angelo C., Davis A., Gerhardt S., Gryaznevich M., Harb M., Hender T.C., Kaye S., Kingham D., Kotschenreuther M., Mahajan S., Maingi R., Marriott E., Meier E.T., Mynsberge L., Neumeier C., Ono M., Park J.-K., Sabbagh S.A., Soukhanovskii V., Valanju P., Woolley R. // Nuclear Fusion – 2016. – Т. 56 – № 10 – С.106023.

10. Гусев В.К. Сферический токамак Глобус-М / Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З., Дьяченко В.В., Ирзак М.А., Минаев В.Б., Мухин Е.Е., Новохацкий А.Н., Подушникова К.А., Раздобарин Г.Т., Сахаров Н.В., Трегубова Е.Н., Узлов В.С., Щербинин О.Н., Беляков В.А., Кавин А.А., Косцов Ю.А., Кузьмин Е.Г., Сойкин В.Ф., Кузнецов Е.А., Ягнов В.А. // ЖТФ – 1999. – Т. 69 – № 9 – С.58–62.

11. Gusev V.K. Globus-M plasma physics research for fusion application and compact neutron source development / Gusev V.K., Bakharev N.N., Ber B.Y., Bulanin V. V, Chernyshev F. V, Dyachenko V. V, Goncharov P.R., Gusakov E.Z., Ibyaminova A.D., Irzak M.A., Kaveeva E.G., Khitrov S.A., Khromov N.A., Kornev V.A., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Minaev V.B., Mineev A.B., Mironov M.I., Novokhatsky A.N., Patrov M.I., Petrov A. V, Petrov Y. V, Rozhansky V.A., Sakharov N. V, Saveliev A.N., Senichenkov I.Y., Shchegolev P.B., Shcherbinin O.N., Tolstyakov S.Y., Varfolomeev V.I., Voronin A. V, Yashin A.Y. // Plasma Physics and Controlled Fusion – 2016. – Т. 58 – № 1 – С.14032.

12. Bakharev N.N. Globus-M plasma physics research for fusion application and compact neutron source development. 42nd EPS Conference on Plasma Physics / N. N. Bakharev, V. K. Gusev – Lisbon, 2015.– I5.120c.

13. Gi K. Conceptual design study of the moderate size superconducting spherical tokamak power plant / K. Gi, Y. Ono, M. Nakamura, Y. Someya, H. Utoh, K. Tobita, M. Ono – IOP Publishing, 2015.– 63036c.