

Мельник Андрей Дмитриевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННОГО КОМПОНЕНТА ПЛАЗМЫ
В ТОКАМАКАХ ПРИ НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ
МЕТОДОМ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

Санкт-Петербург

2017

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

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук,
старший научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Чернышев Федор Всеволодович

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук,
заместитель руководителя Отделения токамаков
блока термоядерных исследований КЯТК НИЦ "Курчатовский Институт"
Мельников Александр Владимирович
НИЦ "Курчатовский Институт", Москва

кандидат физ.-мат. наук, начальник лаборатории
проблем физики токамаков отделения физики
токамаков-реакторов АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ"
Кащук Юрий Анатольевич
АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", Троицк

Ведущая организация: АО "НИИЭФА им. Д.В. Ефремова"

Защита состоится 25 января 2018 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.205.03 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе и на сайте института: <http://www.ioffe.ru/>.

Автореферат разослан _____ 201 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.205.03
кандидат физ.-мат. наук _____ **А.М. Красильщиков**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Научно-технический прогресс, темпы которого в последнее время значительно ускорились, а также продолжающийся рост населения планеты требуют постоянного увеличения производства энергии. При этом многие традиционные источники энергии, связанные с использованием таких природных ресурсов, как нефть, газ и уголь будут постепенно исчерпаны. Кроме того, при сжигании природных энергетических ресурсов неизбежно возникает проблема загрязнения окружающей среды. Эти обстоятельства дали толчок исследованиям по управляемому термоядерному синтезу (УТС), начавшимся еще в середине прошлого столетия.

В настоящее время, в области УТС, связанной с магнитным удержанием горячей плазмы, можно выделить два наиболее перспективных направления. Во-первых, это работы по созданию термоядерного реактора с положительным выходом энергии на основе токамака. Продемонстрировать возможность управляемого термоядерного синтеза с мощностью и временем горения промышленного масштаба должен будет сооружаемый в настоящее время международный термоядерный токамак-реактор ИТЭР [1], который начнет свою работу предположительно в 2025 году. Параллельно с использованием в целях УТС классических токамаков, к которым принадлежит ИТЭР, также проводятся исследования, направленные на создание термоядерного реактора на основе токамаков с малым аспектным соотношением (отношением большого радиуса тора R к малому a) и, в частности, на основе сферических токамаков.

Во-вторых, в последнее время возникло новое направление – разработка гибридных реакторов, сочетающих в себе синтез и деление ядер. В рамках этого подхода в качестве источника нейтронов для реактора деления предполагается использовать компактный сферический токамак, работающий по схеме пучок-плазма.

Особую роль при реализации УТС будет играть нейтральная инжекция (НИ). В термоядерном реакторе, основанном как на классическом, так и сферическом токамаках, пучок атомов высокой энергии будет применяться для нагрева плазмы до температуры зажигания реакции синтеза. В случае гибридного реактора атомарный пучок при взаимодействии с плазмой создаст источник нейтронов, которые будут использоваться в ядерном реакторе деления для размножения нейтронов.

Общим принципом разработки сложных и дорогостоящих устройств является то, что, как правило, перед их строительством проводятся

эксперименты на уменьшенных моделях или макетах. Аналогичный подход применяется и при разработке термоядерных и гибридных реакторов на основе токамаков. При этом целью экспериментов на относительно малых токамаках является отработка режимов плазменных разрядов, изучение поведения основной плазмы и быстрых частиц с последующей экстраполяцией результатов на реактор.

В начале 2000-ых годов на токамаках Глобус-М [2], ТУМАН-3М [3] (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Россия) и COMPASS [4] (Институт физики плазмы Академии наук Чешской Республики) начались плазменные эксперименты с НИ. Актуальность экспериментов на этих установках обусловлена тем, что две первые из них относятся к токамакам с малым аспектным отношением. Установка Глобус-М представляет собой единственный в России сферический токамак и позволяет получать уникальные экспериментальные данные, необходимые для развития обоих вышеуказанных направлений – как термоядерного ректора, так и источника быстрых нейтронов для гибридного реактора. Работы на токамаке COMPASS обусловлены интересом к изучению плазмы в конфигурации (аспектное отношение, форма крайней замкнутой магнитной поверхности), подобной той, которая ожидается на установке ИТЭР. После запуска инжекторов нейтральных атомов на этих установках появилась необходимость в изучении нагрева основной плазмы за счет НИ, а также поведения возникающих при этом надтепловых частиц. Эти задачи обусловили актуальность диссертационной работы.

Одним из основных методов исследования поведения ионов плазмы, как тепловых ($E \sim T_i$, T_i – температура ионов), так и надтепловых ($E \gg T_i$), является метод корпускулярной диагностики (КД). КД плазмы основана на регистрации и анализе потоков атомов, испускаемых плазмой, что дает возможность получать данные об энергетическом распределении ионов, находящихся в плазме. Важно отметить, что КД является практически прямым методом измерения параметров ионного компонента плазмы.

Основными целями настоящей работы являлись:

- разработка и запуск комплексов КД на токамаках Глобус-М, ТУМАН-3М, COMPASS, позволяющих проводить регистрацию энергетических распределений как тепловых, так и надтепловых ионов;
- изучение с их помощью особенностей поведения ионов при пучковом нагреве плазмы.

На защиту выносятся следующие **положения:**

1. Разработка новой модификации многоканального атомного анализатора серии АКОРД для токамака Глобус-М, обладающей эквидистантным шагом каналов по энергии, улучшенным до 10% энергетическим разрешением и возможностью одновременной регистрации потоков атомов водорода и дейтерия, испускаемых плазмой.

2. Модернизация комплексов корпускулярной диагностики на токамаках Глобус-М, ТУМАН-3М, COMPASS для изучения поведения тепловых и надтепловых ионов плазмы при нейтральной инжекции.

3. Измерение энергетических распределений надтепловых ионов в плазменных экспериментах при максимальных значениях энергии нейтрального пучка $E_b=(25-30)$ кэВ на токамаке Глобус-М. Исследование основных особенностей функции распределения ионов в этом режиме.

4. Исследование зависимостей нагрева тепловых ионов и удержания ионов высоких энергий от параметров инжектируемого пучка и плазмы в опытах с использованием нейтральной инжекции на токамаке ТУМАН-3М.

5. Измерение энергетических распределений тепловых и надтепловых ионов на токамаке COMPASS. Определение ионной температуры плазмы по потокам атомов перезарядки.

Научная новизна работы.

Разработан новый модифицированный анализатор атомов перезарядки АКОРД-24М, оптимизированный для задач изучения поведения надтепловых ионов.

На установке Глобус-М создан уникальный комплекс КД, оптимизированный как для измерений ионной температуры, так и для изучения поведения надтепловых ионов.

Впервые на сферическом токамаке Глобус-М в режиме с дополнительным нагревом плазмы нейтральным пучком дейтерия с энергией 25 – 30 кэВ измерены энергетические распределения надтепловых ионов и проведено изучение их особенностей.

Впервые на токамаке ТУМАН-3М проведено совместное исследование поведения тепловых и надтепловых ионов в плазме с НИ.

Впервые на токамаке COMPASS в плазме с НИ проведены измерения ионной температуры и спектров надтепловых ионов.

Научная и практическая значимость

Научная значимость работы определяется исследованиями поведения надтепловых ионов на токамаках Глобус-М, ТУМАН-3М и COMPASS в

режиме с НИ. На установках Глобус-М и ТУМАН-3М обнаружены дополнительные каналы потерь частиц нейтрального пучка, которые следует учитывать при изучении поглощения мощности НИ плазмой в этих установках. Также обнаружены факторы, снижающие потери частиц пучка и улучшающие нагрев плазмы за счет НИ. На токамаке COMPASS впервые экспериментально определено значение ионной температуры, а также измерено энергетическое распределение надтепловых ионов в режиме с НИ. Эти данные необходимы для дальнейшего анализа энергобаланса плазмы, а также особенностей передачи мощности от пучка плазме на этом токамаке.

Практическая значимость заключается в том, что разработана новая модификация анализаторов атомарных частиц АКОРД-24М, оптимизированная для задач изучения надтепловых ионов. На токамаках Глобус-М, ТУМАН-3М и COMPASS созданы комплексы КД, позволяющие проводить исследования поведения тепловых и надтепловых ионов во время НИ.

Достоверность полученных результатов обеспечена воспроизводимостью экспериментальных данных, а также приемлемой согласованностью с аналитическими и численными расчетами. Результаты работы были представлены на российских и международных конференциях и опубликованы в реферируемых журналах.

Апробация работы и публикации

Основные результаты работы были представлены на 1 российской и 4 международных конференциях, а также опубликованы в 5 статьях в реферируемых журналах.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем составляет 168 страниц. Диссертация содержит 56 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 108 наименований.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в:

- разработке и создании анализатора АКОРД-24М
- калибровке приборов АКОРД-24 и АКОРД-24М на атомарном пучке
- запуске диагностик на токамаках Глобус-М, ТУМАН-3М, COMPASS
- применении комплексов КД в экспериментах на указанных токамаках с целью получения данных об ионном компоненте плазмы
- анализе и интерпретации экспериментальных данных, полученных в опытах по НИ.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, а также сформулированы цели исследования и приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору литературы. В разделе 1.1 дано представление о том, какое место занимают эксперименты на токамаках Глобус-М, ТУМАН-3М и COMPASS в ряду исследований по УТС. Раздел 1.2 посвящен особенностям дополнительного нагрева плазмы в токамаках методом НИ. Отдельное внимание в этом разделе уделено особенностям функции распределения надтепловых ионов, образующихся в результате НИ. Рассмотрены различные виды потерь инжектированных частиц, и их влияние на функцию распределения надтепловых ионов. В частности, проанализированы прямые потери (потери атомов пучка на пролет и орбитальные потери образовавшихся надтепловых ионов), а также потери ионов во время их торможения. Раздел 1.3 посвящен диагностическим методам исследования поведения ионного компонента плазмы. Подробно рассмотрены спектроскопическая, нейтронная и корпускулярная диагностики, их преимущества и ограничения для изучения тепловых и надтепловых ионов.

Вторая глава посвящена анализаторам потоков атомов и, в частности, анализаторам серии АКОРД, используемым на токамаках Глобус-М, ТУМАН-3М и COMPASS. На примере анализатора АКОРД-12 [5] рассмотрен принцип действия подобных приборов, основанный на ионизации входящего потока атомов в газовой мишени и последующем анализе образовавшихся ионов по массе и энергии в электрическом и магнитном полях.

В разделе 2.1 рассмотрена возможность применения анализатора АКОРД-12 для изучения поведения ионов при НИ. Показано, что на токамаках Глобус-М и COMPASS, анализаторы АКОРД-12 (имеющиеся к началу работ на этих установках) не позволяли регистрировать надтепловые частицы с энергиями, близкими к энергии инжекции E_{NBI} , в то время как на установке ТУМАН-3М аналогичный анализатор подходил для этих целей. Также рассмотрены другие ограничения применения анализатора АКОРД-12, связанные с невысоким энергетическим разрешением, малым числом каналов и относительно низкой скоростью счета детекторов.

Разделы 2.2, 2.3 посвящены анализатору АКОРД-24 и вновь разработанной модификации – анализатору АКОРД-24М, соответственно. В этих разделах представлены данные, полученные в ходе калибровки анализаторов на атомарном пучке в лаборатории атомных столкновений ФТИ

им. А.Ф. Иоффе, а также сравнение параметров этих приборов друг с другом и с анализатором АКОРД-12.

Анализатор АКОРД-24М был разработан с целью оптимизировать регистрацию спектров надтепловых ионов. Основные его особенности по сравнению с анализатором АКОРД-24 заключаются в эквидистантном расположении каналов по энергии и улучшенном энергетическом разрешении прибора. Показано, что эти особенности позволяют более подробно и за меньшее число плазменных разрядов одной серии измерять распределение надтепловых ионов.

Третья глава посвящена исследованию поведения ионов на токамаке Глобус-М в условиях НИ с максимальной энергией нагревного пучка (24-30 кэВ). На этой установке для одновременной регистрации функций распределения тепловых и надтепловых ионов был создан комплекс, состоящий из двух анализаторов серии АКОРД [А1]. Анализатор АКОРД-12 был расположен так, что его линия наблюдения направлена перпендикулярно к оси плазменного шнура. Такое положение прибора наиболее оптимально для регистрации тепловой части спектра и определения температуры ионов. Анализатор АКОРД-24М был установлен так, что его линия наблюдения расположена тангенциально к оси плазменного шнура. Прицельный параметр линии наблюдения анализатора ($R_{NPA} \approx 0.30$ м) был примерно равен прицельному параметру центральной хорды нагревного пучка ($R_{NBI} \approx 0.32$ м). Такое положение прибора обеспечивало возможность измерения энергетических распределений надтепловых инжектированных частиц. Описание созданного комплекса корпускулярной диагностики дано в разделе 3.1.

Раздел 3.2 посвящен изучению особенностей энергетических распределений надтепловых ионов, зарегистрированных в экспериментах с использованием НИ с максимальной возможной энергией [А2]. Энергетические спектры надтепловых ионов были получены в серии, состоящей из нескольких подобных плазменных разрядов ($I_p \approx 200$ кА, $B_t \approx 0.4$ Т, $\langle n_e \rangle \approx 5 \cdot 10^{19}$ м⁻³) при инжекции дейтериевого пучка ($E_{NBI} \approx 25$ кэВ, $W_{NBI} \approx 0.6$ МВт) в дейтериевую плазму.

Особенностью зарегистрированных спектров (рис. 1) является их специфическая форма, которая обладает, по сравнению со спектрами, полученными ранее при малых энергиях инжекции (18 кэВ) [6], двумя характерными особенностями [А3, А4]. Во-первых, распределение имеет сильный провал ниже энергии инжекции, который не наблюдается в случае

малой энергии инжекции. Во-вторых, в диапазоне между энергетическими компонентами пучка E_{NBI} и $1/2E_{NBI}$ имелся сильный изгиб функции распределения, который также отсутствует при низкой энергии пучка.

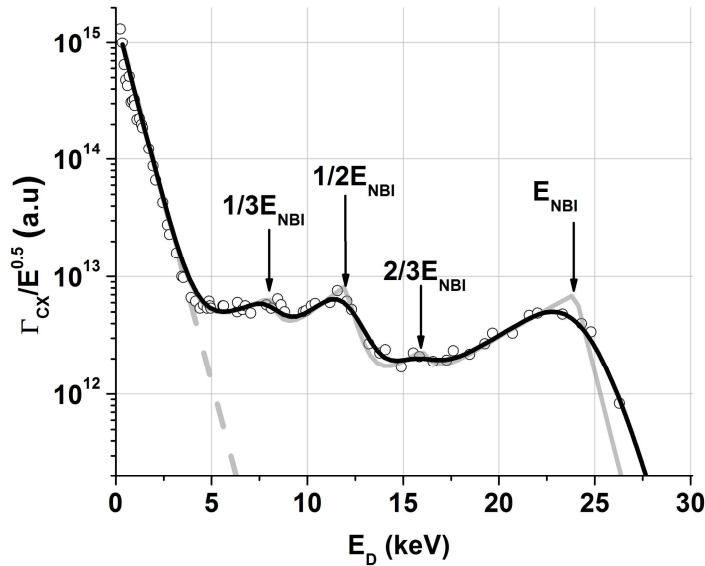


Рис. 1. Аппроксимация энергетического спектра атомов перезарядки (кружки): серая линия - суперпозиция решений уравнения Фоккера – Планка, пунктир – тепловая часть; черная линия – аппроксимация с учетом конечного энергетического разрешения прибора. E_{NBI} , $2/3E_{NBI}$, $1/2E_{NBI}$, $1/3E_{NBI}$ – энергетические компоненты пучка.

Для объяснения особенностей функции распределения надтепловых ионов был проведен анализ возможных вариантов ее формирования. Было найдено две причины, определяющие указанный вид функции распределения. Во-первых, было обнаружено, что в рассматриваемом режиме существующие в плазме пилообразные колебания оказывают сильное влияние на надтепловые частицы. Это влияние заключается в потерях надтепловых ионов из плазмы и частичном перераспределении удерживаемых ионов по питч-углу. Причем, действие этих двух факторов проявляется на спектрах атомов перезарядки аналогично действию дополнительных прямых потерь (общее снижение уровня спектра) и дополнительных потерь во время торможения (появление провала ниже энергии инжекции) надтепловых ионов.

Во-вторых, в нейтральном дейтериевом пучке помимо трех энергетических компонент (E_{NBI} , $1/2E_{NBI}$, $1/3E_{NBI}$) был обнаружен четвертый компонент с энергией $2/3E_{NBI}$, появляющийся вследствие диссоциации иона HD^+ в нейтрализаторе инжектора. Его присутствие в нейтральном пучке было подтверждено при помощи эксперимента по инжекции в газ. Наличие этого

энергетического компонента приводило к образованию в плазме ионов с энергией $2/3 E_{NBI} \approx 16.5$ кэВ. Было показано, что распределение этих ионов накладывается на спад распределения основного компонента $E_{NBI} = 25$ кэВ и образует изгиб на спектре надтепловых частиц.

Анализ влияния пилообразных колебаний на спектры надтепловых ионов позволил дополнительно обнаружить следующие закономерности. Замечено, что смещение плазмы к центральному столбу уменьшает воздействие пилообразных колебаний на надтепловых ионы. Кроме того, обнаружено, что период пилообразных колебаний является одним из факторов, определяющим потери надтепловых ионов в рассматриваемом режиме.

В четвертой главе представлены исследования ионного компонента плазмы на токамаке ТУМАН-3М. В разделе 4.3 рассмотрены результаты, полученные при различной мощности нейтрального пучка, а в разделе 4.4 – при смещении плазмы по большому радиусу.

Для изучения поведения ионов на токамаке ТУМАН-3М был использован анализатор АКОРД-12. Изначально анализатор был расположен перпендикулярно к плазменному витку. Такое положение позволило в первых экспериментах по нейтральной инжекции определить ионную температуру [A5], но при этом создавало сложности при регистрации надтепловых ионов [A6]. Для обеспечения возможности регистрации надтепловых частиц были проведены работы по перемещению анализатора в тангенциальное положение с прицельным параметром линии наблюдения, близким к прицельному параметру инжекционного пучка. После этого была выполнена серия экспериментов по инжекции дейтериевого пучка различной мощности в дейтериевую плазму. Параметры плазменных разрядов этой серии были следующими: $R \approx 0.53$ м, $a \approx 0.23$ м, $B_t \approx 0.7$ Тл, $I_p \approx 150$ кА, $\langle n_e \rangle = (2-3) \cdot 10^{19}$ м⁻³, $E_{NBI} < 22$ кэВ, $W_{NBI} < 0.5$ МВт. Анализатором попеременно регистрировалась как тепловая часть спектра, по которой в дальнейшем определялась температура ионов, так и высокоэнергичная.

В эксперименте были обнаружены следующие основные особенности поведения ионов [A7]. Исследование тепловой области спектра показало, что при увеличении мощности инжекции выше 0.17 МВт максимальная ионная температура прекращала возрастать и была ограничена значением около 280 эВ. При исследовании надтепловой области было обнаружено, что при увеличении мощности с 0.17 МВт до 0.25 МВт, потоки атомов Γ^{CX} , регистрируемый анализатором, практически не менялись, в то время как при меньших мощностях они возрастали с увеличением мощности. При

дальнейшем увеличении мощности до 0.42 МВт было обнаружено падение величины потоков атомов (рис. 2).

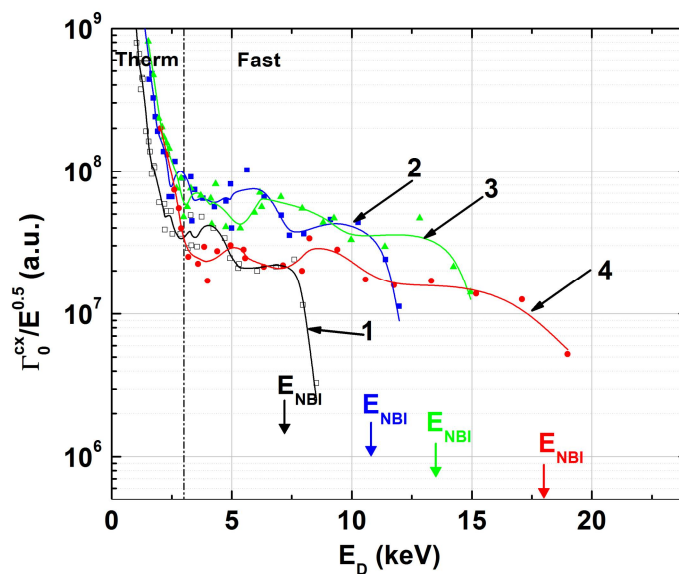


Рис. 2. Спектры ионов, зарегистрированные на токамаке ТУМАН-3М при различной мощности инжекции. 1(□) – 8 кэВ (0.08 МВт), 2(■) – 12 кэВ (0.17 МВт), 3(▲) – 15 кэВ (0.25 МВт), 4 (●) – 20 кэВ (0.42 МВт). E_{NBI} – основная энергия нейтрального пучка.

Были рассмотрены несколько основных причин этого падения: (i) рост прямых потерь в плазме при увеличении мощности инжекции, (ii) изменение концентрации нейтрализационной мишени, а также (iii) рост потерь частиц до входа в плазму. Обнаружено, что все три причины могут вносить вклад в падение потоков атомов. При этом изменение величины прямых потерь и изменение концентрации нейтрализационной мишени могли обеспечить уменьшение потоков примерно на 30 %, в то время как в эксперименте обнаруживалось падение примерно в 3 раза относительно расчетного уровня. Расчет спектров атомов перезарядки осуществлялся при помощи кода [7]. Этот код позволяет моделировать функцию распределения надтепловых ионов в плазме на основании решения уравнения Больцмана, и, учитывая распределение нейтрализационной мишени вдоль линии видимости анализатора, выводит энергетическое распределение потока атомов, попадающих в анализатор.

При рассмотрении причины (iii) было сделано предположение, что одним из возможных объяснений снижения мощности пучка мог быть эффект, связанный с потерями инжектируемых частиц за счет реионизации в трубке токамака [8] на остаточном и выбитом со стенок газе.

Для подтверждения предположения о потерях частиц пучка на реионизацию были проведены эксперименты по фотосъемке пучка. Они показали, что пучок начинает активно взаимодействовать с переходным патрубком при энергиях инжекции 12 – 15 кэВ (мощность 0.17 – 0.25 МВт). Дополнительно к фотосъемке были проведены спектральные измерения в области линии D_{α} . Идея этих измерений заключалась в том, чтобы по интенсивности свечения проследить изменение мощности нейтрального пучка, прошедшего в камеру токамака, при изменении мощности пучка в инжекторе. Было обнаружено, что при энергии 18 кэВ наблюдается недостаток не менее чем 20% сигнала D_{α} , что интерпретировано как снижение тока нейтрального пучка, по сравнению с ожидаемой величиной.

Из представленных наблюдений был сделан вывод о том, что взаимодействие нейтрального пучка с патрубком является, скорее всего, главной причиной насыщения ионной температуры и падения потоков надтепловых атомов при высоких мощностях инжекции (выше 0.2 – 0.3 МВт). Это взаимодействие приводит к потерям частиц нейтрального пучка на реионизацию. Кроме того, взаимодействие пучка со стенками патрубка может оказывать непосредственное влияние и на основную плазму, т.к. оно сопровождается десорбцией примесей. Выбитые пучком примеси могут поступать в плазму и приводить к ее охлаждению.

Раздел 4.4. посвящен изучению поведения ионов при смещении плазмы в условиях НИ. Было обнаружено, что в случае установки ТУМАН-3М существенное влияние на потоки надтепловых частиц в этих условиях оказывало смещение плазмы по большому радиусу [A8]. Смещение плазмы осуществлялось на начальной стадии разряда и происходило по направлению уменьшения большого радиуса. Величина смещения составляла примерно 1 см. Параметры разряда были следующими: $I_p \approx 150$ кА, $B_t \approx 0.7$ Тл, $\langle n_e \rangle = (2-3)10^{19}$ м⁻³, $E_{NBI} \approx 18$ кэВ.

Было обнаружено, что при смещении плазмы наблюдается изменение в абсолютной величине зарегистрированных потоков атомов перезарядки: для режима со смещением потоки были в 1.9 раза выше, чем при стандартном положении. Также было замечено, что это отношение потоков не зависит от энергии. Было обнаружено, что такая особенность не связана с ростом плотности атомов мишени n_0 , а свидетельствует об увеличении количества надтепловых ионов. Это предположение также подтверждали измерения ионной температуры, которая при переходе от стандартного положения к смещению на 1 см возросла от 250 эВ до 350 эВ. Рост числа надтепловых

частиц при увеличении смещения плазмы качественно подтверждали также и нейтронные измерения. При смещении плазмы наблюдался рост интенсивности потока нейтронов в 1.2 раза, хотя объем плазмы при этом уменьшался на 10%.

Анализ причин роста числа надтепловых частиц показал, что он обусловлен совместным воздействием нескольких факторов. Во-первых, в смещенном шнуре улучшаются условия захвата надтепловых ионов. Это приводит к увеличению их числа на 5-10 %. Во-вторых, увеличивается время торможения надтепловых ионов вследствие повышения электронной температуры, наблюдаемого при смещении. Этот фактор обуславливает увеличение числа ионов на 20-30 %.

Пятая глава посвящена экспериментам на установке COMPASS [A9, A10]. Анализатор АКОРД-24, модернизированный в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, был установлен в тангенциальное положение в направлении наблюдения против тока инжекции с прицельным параметром, равным прицельному параметру инжекционного пучка для обеспечения возможности регистрации инжектированных частиц.

На первом этапе работ была проведена регистрация спектров в тепловом диапазоне энергий при омическом режиме нагрева плазмы. Параметры типичного разряда были следующие: $R \approx 0.56$ м, $a \approx 0.16$ м, $B_t \approx 1.1$ Тл, $I_p \approx 180$ кА, $\langle n_e \rangle = (3-5) \cdot 10^{19}$ м⁻³, длительность импульса $t \approx 250$ мс, рабочий газ – дейтерий. При помощи анализатора АКОРД-24 были зарегистрированы потоки атомов, испускаемых установкой COMPASS. Для определения ионной температуры была использована часть спектра в диапазоне энергий 0.8 - 2.5 кэВ, который примерно соответствовал рекомендуемому диапазону $E = (2-8) T_i$ с ожидаемой ионной температурой около 300 эВ. Необходимо отметить, что в этой области энергий наблюдалось высокое (>3) соотношение сигнал/фон, что значительно повышало достоверность оценки ионной температуры. Если не учитывать влияния процессов ослабления потоков атомов, выходящих из внутренних областей плазмы, то оценка ионной температуры по спектру атомов давала величину $T_i = 340 \pm 15$ эВ.

Для учета эффектов, связанных с непрозрачностью плазмы на токамаке COMPASS, был использован код DOUBLE [9]. Оценка центральной ионной температуры при помощи кода DOUBLE осуществлялась на основании ее вариации и подгонки расчетного спектра атомов, выходящих из плазмы, к экспериментально зарегистрированному. Наилучшее соответствие экспериментальных точек и расчетной зависимости достигалось при значении центральной ионной температуры около 400 эВ.

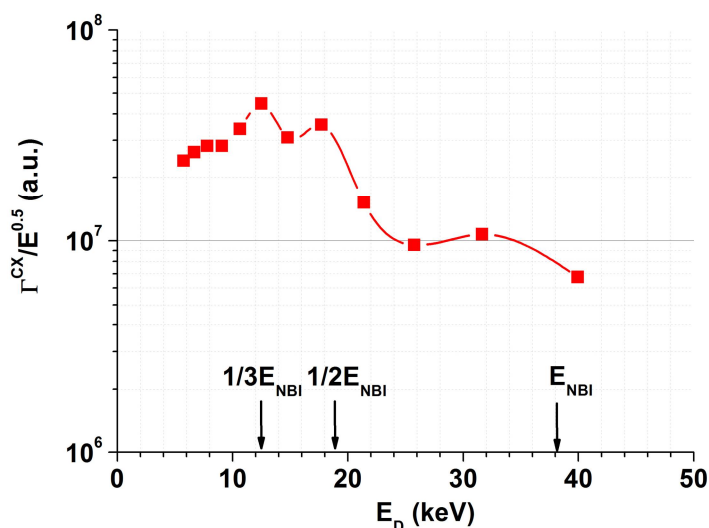


Рис. 3. Энергетический спектр надтепловых частиц, зарегистрированный при помощи анализатора АКОРД-24 в момент инжекции на токамаке COMPASS.

На втором этапе работ была проведена регистрация потоков атомов в режиме с НИ. Дейтериевый пучок с энергией $E_{NBI} \approx 40$ кэВ и мощностью $W_{NBI} \approx 0.27$ МВт инжектировался в дейтериевую плазму по направлению тока плазмы (ко-инжекция). Измерения спектра надтепловых частиц были произведены в разряде #8959 со следующими параметрами: $R \approx 0.56$ м, $a \approx 0.16$ м, D-образная форма сечения плазмы с вытянутостью $\kappa = 1.8$, $B_t = 1.15$ Тл, $I_p \approx 160$ кА, $\langle n_e \rangle \approx 4.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Обнаружено, что форма спектра соответствует распределению надтепловых ионов, тормозящихся в плазме за счет кулоновских столкновений. На спектре (рис. 3) хорошо идентифицируются энергетические компоненты E_{NBI} , $1/2 E_{NBI}$, $1/3 E_{NBI}$. Отсутствие провалов ниже энергии инжекции E_{NBI} свидетельствует об отсутствии сильных потерь ионов во время торможения.

Тепловая часть спектра во время НИ была зарегистрирована в разряде #8956 (дейтериевая плазма, $R \approx 0.56$ м, $a \approx 0.16$ м, D-образная форма сечения плазмы с вытянутостью $\kappa=1.8$, $B_t = 1.15$ Тл, $I_p \approx 185$ кА, $\langle n_e \rangle \approx 4.7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, дейтериевый пучок $E_0 \approx 40$ кэВ, $W_{NBI} \approx 0.27$ МВт по направлению тока плазмы). Обнаружено, что в момент инжекции наблюдается рост потока атомов, что свидетельствует о взаимодействии нейтрального пучка с плазмой. Во время включения дополнительного нагрева зарегистрирован прирост ионной температуры примерно на 70 эВ (с 350 до 420 эВ) относительно омического уровня.

В заключении представлены **основные результаты работы:**

1. Разработан новый анализатор атомов перезарядки АКОРД-24М, оптимизированный для задач изучения поведения надтепловых ионов.

Анализатор прокалиброван на атомарном пучке. Сравнение основных параметров нового анализатора АКОРД-24М и стандартного анализатора АКОРД-24, а также их эксплуатационных качеств в плазменных экспериментах, подтвердило, что вновь созданный прибор, обладая эквидистантным шагом каналов по энергии, лучше подходит для регистрации спектров надтепловых частиц при нейтральной инжекции. Он позволяет регистрировать достаточно подробное распределение ионов за один плазменный разряд, а улучшенное до 10% энергетическое разрешение данного анализатора позволяет получать более детальные спектры надтепловых частиц.

2. На токамаках Глобус-М, ТУМАН-3М, COMPASS модернизированы и введены в действие комплексы корпускулярной диагностики.

На установке Глобус-М создан комплекс корпускулярной диагностики, оптимизированный как для измерений ионной температуры, так и для изучения поведения надтепловых ионов. Он включает в себя анализатор АКОРД-24М, направленный тангенциально, и анализатор АКОРД-12, направленный перпендикулярно к плазменному шнуру. Наличие двух анализаторов и их расположение относительно плазменного шнура позволило производить одновременную регистрацию спектров, как термализованных, так и надтепловых ионов, возникающих в результате применения нейтральной инжекции.

Применение вновь созданных комплексов корпускулярной диагностики на установках ТУМАН-3М и COMPASS позволило провести изучение основных особенностей поведения тепловых и надтепловых ионов в экспериментах по нагреву плазмы методом нейтральной инжекции.

Сравнение эксплуатационных качеств трех введенных в действие диагностических комплексов показало, что для изучения ионного компонента плазмы в условиях нейтральной инжекции продуктивнее использовать сочетание двух анализаторов, подобно тому, как это реализовано на токамаке Глобус-М.

3. На токамаке Глобус-М в режиме с дополнительным нагревом плазмы нейтральным пучком дейтерия с энергией 24 – 30 кэВ измерены энергетические распределения надтепловых ионов. Обнаружено, что эти распределения имеют особую форму, отличную от формы распределений при низкой энергии инжекции (18 кэВ). Показано, что специфическая форма является следствием влияния пилообразных колебаний на надтепловые ионы, а также наличия компонента с энергией $2/3E_{NBI}$ в инжекционном пучке. Обнаружено, что пилообразные колебания приводят к потерям и, вероятно, перераспределению

надтепловых ионов по питч- углам и объему плазмы, вследствие чего происходит снижение потоков и увеличение наклона спектров надтепловых ионов ниже энергии инжекции. Замечено, что период пилообразных колебаний является одним из факторов, связанных с уровнем потерь надтепловых ионов.

Обнаружено влияние смещения плазменного шнура по большому радиусу на спектры надтепловых ионов. Сделан вывод об уменьшении потерь мощности нейтральной инжекции при смещении плазменного шнура к центральной колонне.

4. При помощи модернизированного комплекса корпускулярной диагностики на установке ТУМАН-3М были проведены исследования поведения ионного компонента плазмы при различной мощности нагревного пучка, а также при различном положении плазменного шнура. Обнаружено, что при увеличении мощности нейтральной инжекции выше примерно 0.3 МВт возникают потери надтепловых частиц, и наблюдается насыщение ионной температуры на уровне 280 эВ. Указаны наиболее вероятные причины этого явления: прямые потери частиц, а также взаимодействие пучка со стенками переходного патрубка, приводящее к потерям частиц пучка на реионизацию и загрязнению плазмы примесями.

При исследовании смещения плазмы по большому радиусу к центру обнаружено увеличение популяции надтепловых ионов и рост ионной температуры с 250 эВ до 350 эВ. Указаны две основные причины этого явления: улучшение удержания надтепловых частиц и возрастание времени их торможения.

5. При помощи корпускулярной диагностики на токамаке COMPASS проведены первые на этой установке измерения ионной температуры. Обнаружено, что в омическом режиме значение центральной ионной температуры составляет около 400 эВ. В режиме с пучковым нагревом зарегистрировано увеличение ионной температуры примерно на 70 эВ во время включения инжекции. Измерено энергетическое распределение надтепловых частиц, возникающих в результате действия нейтральной инжекции. Сделан вывод о том, что торможение надтепловых ионов проходит без их существенных потерь.

Список основных публикаций по теме диссертации:

А1. *Бахарев Н.Н., Мельник А.Д., Минаев В.Б. и др.* Модернизация комплекса корпускулярной диагностики токамака Глобус-М // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2012. –

Вып. 4 – С. 74. (запуск анализатора АКОРД-24М на токамаке Глобус-М, измерения распределений тепловых и надтепловых ионов)

A2. *Gusev V.K., Azizov E.A., Alekseev A.B., ..., Melnik A.D. et al.* Globus-M results as the basis for a compact spherical tokamak with enhanced parameters Globus-M2 // Nucl. Fusion. – 2013. – V.53 – N. 9 – P.093013. (измерение и анализ энергетических распределений тепловых и надтепловых ионов)

A3. *Мельник А.Д., Бахарев Н.Н., Гусев В.К. и др.* Энергетические распределения надтепловых ионов в режиме с пилообразными колебаниями при пучковом нагреве на токамаке Глобус-М. // Физ. Плазмы. – 2017. – Т. 43. – N. 8. – С. 651. (подготовка публикации, измерение и анализ энергетических распределений надтепловых ионов)

A4. *Melnik A.D., Bakharev N.N., Chernyshev F.V. et. al.* Study of fast ion losses during NBI heating on Globus-M tokamak: Proc. of 40-th EPS Conference on Plasma Phys. – 2013 – V. 37D – P-1.141. (подготовка публикации, измерение и анализ энергетических распределений надтепловых ионов)

A5. *Askinazi L.G., Barsukov A.G., Chernyshev F.V., ..., Melnik A.D. et. al.* First experiments on NBI in the TUMAN-3M tokamak: Proc. of 32-nd EPS Conference on Plasma Phys. – 2005 – V. 29C – P-1.102. (измерение и анализ температуры ионов)

A6. *Мельник А.Д., Аскинази Л.Г., Вильдэжюнас М.И. и др.* Применение металлического отражателя для измерения спектров замедляющихся частиц пучка на установке ТУМАН-3М: В сб. XXXIV Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. – Звенигород, 2007. – С. М-41. (подготовка публикации, измерение и анализ энергетических распределений надтепловых ионов)

A7. *Мельник А.Д., Аскинази Л.Г., Белокуров А.А. и др.* Исследование энергетических распределений быстрых ионов при нагреве плазмы нейтральным пучком на токамаке ТУМАН-3М: В сб. XLIII Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. – Звенигород, 2016. – С. М-28. (подготовка публикации, модернизация корпускулярной диагностики на токамаке ТУМАН-3М, измерение и анализ энергетических распределений тепловых и надтепловых ионов)

A8. *Корнев В.А., Чернышев Ф.В., Мельник А.Д. и др.* Влияние смещения плазмы по большому радиусу на потоки нейтронов и нейтральных атомов при инжекционном нагреве на токамаке ТУМАН-3М // Письма ЖТФ. – 2013. – Т. 39 – Вып. 22 – С. 64. (измерение и анализ энергетических распределений тепловых и надтепловых ионов)

A9. *Mitosinkova K., Melnik A., Tomes M. et al.* First results from the Neutral Particle Analyzer on the COMPASS tokamak: Proc. of Science 1-st EPS Conf. on Plasma Diagnostics. POS(ECPD2015) – 2015. – P.074. (запуск корпускулярной диагностики на токамаке COMPASS, измерение и анализ энергетических распределений тепловых и надтепловых ионов)

A10. *Мельник А.Д., Митошинкова К., Томеш М. и др.* Первые измерения потоков атомов перезарядки на установке COMPASS с помощью анализатора АКОРД-24: В сб. XVI Всероссийская конференция “Диагностика высокотемпературной плазмы ДВП-16”. – Звенигород, 2016. – С. 104. (подготовка публикации, измерение и анализ энергетических распределений тепловых и надтепловых ионов)

Список цитируемой литературы:

1. ITER Technical Basis. // ITER EDA Documentation Series. IAEA: Vienna – 2002. – N. 24.

2. *Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З. и др.* Сферический Токамак Глобус-М. // ЖТФ – 1999. – Т. 69 – В. 9 – С. 58.

3. *Аскинази Л.Г., Барсуков А.Г., Голант В.Е. и др.* Подготовка эксперимента по нагреву плазмы в токамаке ТУМАН-3М путем инжекции пучка нейтральных атомов // Препринт – 1763. ФТИ, СПб. – 2003. – 29 с.

4. *Panek R., Adamek J., Aftanas M. et al.* Status of the COMPASS tokamak and characterization of the first H-mode // Plasma Phys. Control. Fusion – 2016. – V. 58 – P. 014015.

5. *Извозчиков А.Б., Петров М.П., Петров С.Я. и др.* Многоканальный анализатор для одновременной регистрации спектров атомов водорода и дейтерия “АКОРД-12” // ЖТФ – 1992. – Т. 62 – Вып. 2 – С. 157.

6. *Chernyshev F.V., Afanasyev V.I., Gusev V.K., ..., Melnik A.D. et al.* Study of Fast Ion Losses in Experiments on Neutral Beam Injection on the Globus-M Spherical Tokamak // Plasma Physics Reports – 2011. – V. 37 – N. 7 – P. 553.

7. *Goncharov P.R., Kuteev B.V., Ozaki T. et al.* Analytical and semianalytical solutions to the kinetic equation with Coulomb collision term and a monoenergetic source function // Physics of Plasmas – 2010. – V. 17 – P. 112313.

8. *Stewart L.D., Eubank H.P., Grisham L.R., et al.* Reionization losses in neutral beam ducts: Proc. of the 8th Symposium on Engineering Problems in Fusion Research – 1979. – V. 2 – P. 844.

9. *Dnestrovskij Yu.N., Lysenko S.E. and Kislyakov A.I.* Recombination-induced neutral particle flux in tokamaks // Nucl. Fusion – 1979. – V. 19 – N. 3 – P. 293.