

Учреждение Российской Академии Наук
Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе

На правах рукописи

АФАНАСЬЕВ Валерий Иванович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И СВЕРХТЕПЛОВЫХ ИОНОВ ПО
ПОТОКАМ АТОМОВ ИЗ ПЛАЗМЫ КРУПНЫХ ТОКАМАКОВ**

(специальность 01.04.08 - физика плазмы)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2 0 1 0 г.

Работа выполнена в

*Учреждении Российской Академии Наук
Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН (Санкт-Петербург)*

Официальные оппоненты:

- доктор физ.-мат. наук, академик РАН **В.П. Смирнов**
Институт высоких температур РАН (Москва)

- доктор физ.-мат. наук, профессор **В.С. Стрелков**
ИЯС Российский научный центр “Курчатовский институт” (Москва)

- доктор физ.-мат. наук **С.В. Лебедев**
*Учреждение РАН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
(Санкт-Петербург)*

Ведущая организация:

*Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры им.Д.В.Ефремова (Санкт-Петербург)*

Защита состоится 27 января 2011 г. в 14:00 на заседании Диссертационного совета Д 002.205.03 при Физико-техническом институте им.А.Ф.Иоффе РАН по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института им.А.Ф.Иоффе РАН

Автореферат разослан < ___ > _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.205.03,
кандидат физ.-мат. наук

А.М. Красильщиков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Результаты, вошедшие в диссертацию, охватывают период времени, начиная с 1990 года. К этому моменту на крупнейших токамаках мира осуществляется переход к дейтериево-тритиевым экспериментам. Параметры плазмы и мощность ее дополнительного нагрева достигают таких значений, которые приводят к появлению в плазме значительного количества частиц сверхтеплого мегаэлектронвольтового диапазона энергии. В этих условиях перед диагностикой плазмы по потокам, выходящих из нее атомов, называемой обычно “нейтральной диагностикой”, возникает сразу несколько актуальных задач, требующих своего решения.

Во-первых, необходимо создание нового поколения анализаторов, или “нейтральных анализаторов атомных частиц”, способных работать в условиях интенсивного нейтронного и радиационного излучения, характерного для дейтериево-тритиевой плазмы ($\sim 10^8$ – 10^9 1/см²/с в месте расположения диагностического оборудования). При этом требуется обеспечить измерение потоков атомов в энергетическом диапазоне до энергий в несколько МэВ, т.е. в диапазоне, превышавшем возможности имеющихся в то время приборов в ~ 30 – 100 раз.

Во-вторых, возникает необходимость исследования особенностей переноса ионов трития теплового диапазона энергии в плазме – одного из важнейших компонентов топливной смеси. Актуальность этой задачи непосредственно связана с решением проблемы управления изотопным составом термоядерной плазмы и обеспечения оптимального режима термоядерного горения.

В-третьих, появляется задача исследования потоков атомов из плазмы в новом, до этого времени недоступном, МэВ диапазоне энергии. Это позволяет получить информацию об эффективности удержания ионов МэВ энергий в плазме. Именно, ионы таких энергий, и в первую очередь альфа-частицы, рождающиеся в реакции синтеза ядер дейтерия и трития, будут основным источником энергии в токамаке-реакторе.

В-четвертых, исследования потоков атомов в МэВ диапазоне энергии приводят к необходимости определения и изучения новых механизмов нейтрализации ионов таких энергий. Проблема является актуальной, поскольку без знания этих механизмов невозможно корректно анализировать состав плазмы, а по энергетическому спектру выходящих атомов восстановить функцию распределения ионов в плазме.

Результаты разработки и применения новых нейтральных анализаторов для исследования ионов тепловых и сверхтепловых энергий в плазме оказываются наиболее актуальными к концу 2010 года, когда заканчивается концептуальное проектирование диагностических систем, в том числе и нейтральной диагностики, для экспериментального термоядерного реактора ITER, чему посвящена заключительная часть диссертации.

Цель настоящей работы заключалась в создании комплекса нейтральной диагностики – прототипа диагностического комплекса для термоядерного реактора и применении его на существующих крупных токамаках. Основной интерес работы направлен на: а) исследование ионов тепловых и сверхтепловых энергий в плазме по потокам выходящих из нее атомов, б) получение информации о механизмах нейтрализации и эффективности удержания ионов МэВ диапазона энергии в плазме с) изучение изотопного состава водородной плазмы и переноса в ней ионов трития, д) использование полученной информации для определения возможностей нейтральной диагностики при исследовании плазмы экспериментального токамака-реактора ITER и создания концептуального проекта такой диагностики.

Научная новизна работы заключается в том, что в результате ее выполнения:

- Создан комплекс нейтральной диагностики, не имеющий мировых аналогов. Комплекс позволяет проводить измерения потоков атомов изотопов водорода и гелия теплового и сверхтеплового диапазонов энергии в условиях высокого нейтронного и радиационного фона (до $\sim 10^8$ – 10^9 нейтронов/см²/с);
- Обнаружен новый механизм нейтрализации ионов водорода МэВ диапазона энергии в плазме, обусловленный процессами перезарядки на водородоподобных ионах легких примесей плазмы;
- Впервые экспериментально исследована относительная роль ионов He⁺ и C⁵⁺ в нейтрализации быстрых ионов водорода. При этом удалось разделить вклад этих ионов в нейтрализацию и показать, что: а) зависимость формы энергетических спектров атомов водорода от сорта основного ионного компонента плазмы и наличия нейтральной инжекции обусловлена соответствующим изменением нейтрализационной мишени для ионов водорода, б) нейтрализационная мишень, обусловленная ионами He⁺, локализована вблизи места инжекции в плазму нагревного пучка нейтральных атомов, а мишень, обусловленная ионами C⁵⁺, распределена равномерно по длине плазменного шнура.
- Впервые по потокам атомов в МэВ-диапазоне энергии определена энергетическая функция распределения ионов при ИЦР-нагреве плазмы на токамаке JT-60U и показано, что доминирующую роль в формировании этой функции играют пространственные потери.
- Впервые измерена локальная энергетическая функция распределения тритонов, рождающихся в термоядерной реакции d(d,n)t, в плазме и показано, что сама функция и ее временная эволюция находятся в хорошем согласии с предсказаниями классической теории.
- Впервые экспериментально обнаружено увеличение скорости нарастания потоков атомов трития с ростом их энергии при импульсном напуске

газообразного трития в дейтериевую плазму и получены коэффициенты переноса ионов трития в плазме.

- Впервые выполнена разработка концептуального проекта нейтральной диагностики для экспериментального термоядерного реактора ITER и показано, что диагностика может обеспечивать измерение изотопного состава дейтериево-тритиевой смеси, а также функций распределения ионов МэВ энергий с точностью и временным разрешением, соответствующим технологическим требованиям режима работы реактора.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные анализаторы нейтральных частиц вошли в состав диагностических комплексов крупнейших токамаков мира, таких как JET (Евратом, Великобритания), TFTR (США) и JT-60U (Япония), где с их помощью удалось реализовать на практике несколько диагностических методик, основанных как на пассивном анализе атомов, так и на активном - с инъекцией в плазму нейтральных пучков и пеллет. Полученные в работе результаты позволили сделать анализ возможностей нейтральной диагностики при исследовании плазмы экспериментального термоядерного реактора ITER и разработать ее концептуальный проект.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка и абсолютная калибровка анализаторов нейтральных частиц для измерения потоков атомов водорода, дейтерия, трития и гелия в тепловом и сверхтепловом диапазонах энергии, способных работать в условиях интенсивного нейтронного и гамма- излучения.
2. Проведение экспериментов и модельных расчетов по исследованию механизмов нейтрализации ионов водорода сверхтеплого диапазона энергии в плазме на установке JT-60U (Япония).
3. Исследование эффективности ВЧ-нагрева малой добавки ионов водорода на установке JT-60U. Определение основного канала потерь быстрых ионов, ускоренных ВЧ-нагревом.
4. Исследование эффективности удержания тритонов, рождающихся в термоядерной реакции $d(d,n)t$, в режимах мощного нагрева плазмы с помощью нейтральных дейтериевых пучков на установке JET (Великобритания).
5. Исследование изотопного состава дейтериево-водородной плазмы на установке JET. Изучение переноса ионов трития в плазме в экспериментах с импульсным газовым напуском трития в плазму.
6. Разработка концептуального проекта диагностики плазмы по потокам нейтральных атомов в тепловом и сверхтепловом диапазонах энергии для международного термоядерного реактора ITER (Франция).

Апробация работы и публикации. Результаты работы неоднократно докладывались на семинарах лаборатории процессов атомных столкновений и лаборатории физики высокотемпературной плазмы ФТИ им.А.Ф.Иоффе, лаборатории JET (Великобритания) и лаборатории JT-60U (Япония), представлялись на конкурсе лучших работ ФТИ им.А.Ф.Иоффе (премия им.Б.П.Константинова 1999 года, премия за лучшую работу ФТИ 2002 года) и на конкурсе лучших работ РНЦ “Курчатовский институт” (премия им.И.В.Курчатова 2009 года), а также на всероссийских и международных совещаниях и конференциях:

- EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics (Innsbruck-1992, Bournemouth-1995, Kiev-1996, Montreux-2002, St.Petersburg-2003, Lausanne-2004, Tarragona-2005).
- EPS Topical Conference on Radiofrequency Heating and Current Drive of Fusion Devices (Amsterdam-1992),
- ITER Meeting on Generics Access for Diagnostics (Garhing-1994),
- Topical Conference on Radio Frequency Power in Plasmas (Palm Springs-1995),
- International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (Seville-1994, Toki-1996),
- Совещание по Диагностике Высокотемпературной Плазмы (С.-Петербург-1997),
- International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Alushta-2004),
- Конференция по физике плазмы и УТС (Звенигород-2004),
- Всероссийская конференция по диагностике высокотемпературной плазмы (Звенигород-2005, Звенигород-2007, Звенигород-2009),
- International Workshop on Burning Plasma Diagnostics (Varenna-2007),
- IAEA Fusion Energy Conference (Montréal-1996, Daejon-2010),
- Совещание Международной группы по физике токамаков (ИТРА-2006, ИТРА-2007, ИТРА-2008, ИТРА-2009, ИТРА-2010).

Основное содержание диссертации опубликовано в 54 научных публикациях, из них 19 статей в рецензируемых журналах.

Личный вклад автора. Все изложенные в диссертации новые результаты получены при личном участии автора. При этом автор активно участвовал в разработке новых нейтральных анализаторов, представленных в работе, и им были проведены все модельные расчеты и калибровочные эксперименты по измерению параметров анализаторов. Автор принял активное участие в запуске комплексов нейтральной диагностики на токамаках JET и JT-60U. Автором была предложена оригинальная идея об основной роли водородоподобных примесных ионов в нейтрализации протонов МэВ диапазона энергии в плазме и проведены первые эксперименты по исследованию этого нейтрализационного

механизма. Результаты исследования эффективности удержания быстрых протонов, ускоренных ВЧ-нагревом, на установке JT-60U и термоядерных тритонов на установке JET были получены лично автором. Им были проведены эксперименты и получены основные результаты по изучению переноса ионов трития в плазме по потокам атомов в разрядах с тритиевым газонапуском на токамаке JET.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 278 страниц, включая 114 рисунков, 8 таблиц и список литературы из 163 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко сформулированы актуальность и научная значимость темы, обоснована постановка задачи исследований и сформулирована их основная цель, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен краткий обзор физических основ нейтральной диагностики теплового и сверхтеплового диапазонов энергии.

В параграфе 1 рассмотрены особенности измерения потоков нейтральных атомов, излучаемых плазмой. Показано, что нейтральная диагностика позволяет прямым методом измерять функции распределения и соотношение концентраций основных ионных компонентов плазмы.

В параграфе 2 рассматриваются источники ионов в плазме токамаков и физические процессы, влияющие на формирование их функции распределения. Для сверхтеплового диапазона энергии дана сравнительная характеристика таких источников ионов, как реакции синтеза с рождением заряженных термоядерных продуктов, инжекция в плазму пучков нейтральных атомов высокой энергии, ВЧ-нагрев плазмы на гармониках ионной циклотронной частоты и реакции лобовых столкновений термоядерных альфа-частиц с тепловыми ионами плазмы (образование “knock-on” ионов). Рассмотрены два случая, когда уравнение Фоккера-Планка, описывающее поведение функции распределения сверхтепловых ионов в плазме, имеет аналитическое решение: классическая изотропная функция распределения термоядерных частиц /1-3/ и функция распределения ионов малой добавки при ионном циклотронном нагреве плазмы, описываемой теорией Стикса /4/. Эти данные используются в главах III и IV диссертации при анализе результатов исследования поведения ионов сверхтепловых энергий на токамаках JT-60U и JET. Изложены подходы к вычислению функции распределения “knock-on” ионов /5, 6/. Этот материал использован в главе VII при анализе перспективы измерения относительных потоков нейтрализованных “knock-on” ионов дейтерия и трития для определения изотопного соотношения топливной смеси экспериментального термоядерного реактора ITER /7/.

В параграфе 3 подробно рассматриваются процессы нейтрализации ионов изотопов водорода и гелия в плазме. Знание этих процессов позволяет по энергетическим спектрам потоков атомов из плазмы восстановить функции распределения ионов в плазме. В п.3.1 представлены методы расчета пространственного распределения плотности “пассивной” (без инжекции нейтрального пучка) и “активной” (с инжекцией пучка) нейтральной мишени. При этом показана роль эстафетной перезарядки (п.3.1.1) и образования нейтрального гало пучка (п.3.1.2). Детально описан численный код DOUBLE-MS (п.3.1.3), основанный на методе Монте-Карло, который используется в диссертации для моделирования потоков нейтральных атомов, испускаемых плазмой в тепловом диапазоне энергии (0.1–100 кэВ).

В п.3.2-п.3.4 анализируется сверхтепловой диапазон энергии ионов изотопов водорода и гелия (100 кэВ – 4 МэВ). Представлены результаты экспериментов на установке JET, в которых впервые были зарегистрированы потоки атомов водорода МэВ диапазона энергии из плазмы (п.3.2) / [5], [6]/ и обнаружен механизм нейтрализации высокоэнергичных ионов на водородоподобных ионах легких примесей / [7], 8/.

В п.3.3 показаны особенности вычисления плотности водородоподобных и гелиевоподобных ионов примесей для случая “активной” диагностики и роль процессов “перекрестной” перезарядки при формировании ионного гало пучка / [16], [24]/. Использование нейтральных пучков является наиболее привлекательным с диагностической точки зрения, поскольку в этом случае нейтронизационная мишень детерминирована самим пучком. Именно с этим связано большое количество предложений по применению “активной” нейтральной диагностики для измерения функции распределения альфа-частиц /9, [1], [2], [3], [4], [8]/.

В п.3.4 обсуждаются различные методы расчета плотности водородоподобных и гелиевоподобных ионов примесей для случая “пассивной” диагностики: модель коронального равновесия (п.3.4.1), ноль-размерная модель (Zero-dimensional model) /10/ (п.3.4.2) и численный код ZIMPUR /11/ (п.3.4.3). Показано, что ноль-размерная модель может давать существенно завышенную оценку плотности гелиевоподобных примесей для центральной области горячей плазмы. В частности, для параметров установки ITER ошибка может составлять по величине $\sim 10^3$ - 10^5 раз и приводить к соответствующему завышению “пассивного” потока нейтрализованных альфа-частиц /12/.

Во второй главе представлены результаты разработки и калибровки атомного анализатора частиц сверхтеплого диапазона энергии ГЕММА, предназначенного для измерения абсолютных потоков и энергетических спектров атомов изотопов водорода (H^0 , D^0 или T^0) в диапазоне энергий 0.2-2 МэВ и атомов гелия ($^3He^0$ и $^4He^0$) в диапазоне энергий 0.4-4 МэВ /13, [12], [14]/.

В параграфе 1 рассмотрены устройство анализатора и принцип его работы, который основан на традиционной схеме ионизации входящего потока атомов и анализе образующихся при этом ионов по энергии и массе в дисперсионной системе с параллельными магнитным и электрическим полями. Прибор имеет восемь энергетических каналов регистрации ионов выделенной массы. Для регистрации ионов другой массы требуется перестройка анализатора, которая обычно осуществляется в перерыве между разрядами плазменной установки. Основные трудности при его создании были вызваны тем, что необходимо было обеспечить такие параметры прибора, которые существенно отличают его от анализаторов предыдущего поколения. Во-первых, чтобы иметь высокую эффективность ионизации входящего потока атомов в требуемом энергетическом диапазоне пришлось заменить традиционную газовую мишень на мишень тонкопленочную (углеродная пленка толщиной $\sim 300 \text{ \AA}$) [31]. С этим был связан определенный риск, поскольку на тот момент времени не было данных об устойчивости пленок к внешним воздействиям, которые существуют на больших плазменных установках (вибрация, тепловая нагрузка и т.п.). Однако дальнейший опыт работы с тонкопленочными мишенями показал их высокую стабильность при длительной эксплуатации и подтвердил правильность сделанного выбора.

Второе затруднение было связано с тем, что требуемый энергетический диапазон значительно превышал диапазон существующих анализаторов (в ~ 30 - 100 раз). При этом, с одной стороны, необходимо было значительно увеличить значение анализирующих полей, что легко было сделать, уменьшая зазоры дисперсионной системы, но с другой стороны, нужно было обеспечить пропускание пучка ионов возможно более широкого сечения для сохранения высокой светосилы прибора. Результаты поиска привели к созданию дисперсионной системы с магнитным полем $\sim 2 \text{ Тл}$ (в промежутке 10 мм) и электростатическим полем $\sim 40 \text{ кВ}$ (в промежутке 20 мм), способной пропускать пучок ионов с поперечным сечением до $5 \times 10 \text{ мм}$.

Наконец, третья проблема заключалась в необходимости создания новой детекторной системы, которая обеспечила бы работу анализатора в условиях высокого уровня радиационного излучения. Эта задача была решена в сотрудничестве с Санкт-Петербургским Политехническим университетом. Результаты разработки нового детектора представлены в параграфе 2 [21]. Детектор представляет собой спектрометрический сцинтилляционный счетчик, изготовленный на основе комбинации тонкого сцинтиллятора CsI(Tl) и фотоэлектронного умножителя. Для уменьшения эффективности регистрации фонового нейтронного и гамма-излучения толщина сцинтиллятора была выбрана минимальной ($\sim 8 \text{ мкм}$) из расчета, чтобы длина пробега альфа-частиц с наибольшей возможной энергией $\sim 3.5 \text{ МэВ}$ полностью бы укладывалась в сцинтилляционном слое. Сцинтилляционный детектор подобного типа обладает практически стопроцентной эффективностью регистрации частиц. Кроме того,

амплитуда сигнала, получаемая с такого детектора, пропорциональна энергии частиц, что позволяет спектрально разделить фоновые и полезные сигналы. Такой подход позволил снизить чувствительность детекторов к фоновому излучению на 3-5 порядков по сравнению с существующими детекторами (КЭУ, МКП, ВЭУ), что сделало возможным их успешное применение в приборах, работающих на современных крупных токамаках.

В параграфе 3 приведены основные результаты калибровки атомного анализатора ГЕММА, выполненные на циклотронном ускорителе Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН. Описаны схема установки для калибровки и методика ее проведения. При калибровке анализатора использовались пучки атомов гелия с энергией $E = 0.4-4$ МэВ и водорода с энергией $0.1-2$ МэВ. Для воспроизведения условий, максимально приближенных к реальным условиям эксперимента на плазме, поперечные размеры пучка были сделаны заведомо больше максимальной входной апертуры анализатора.

Для определения энергетических параметров дисперсионной системы и массового разрешения анализатора была использована методика, основанная на измерении, так называемых, контуров по магнитному и электрическому полям / [25]/. Динамический энергетический диапазон прибора составил величину ~ 4 . Энергетическое разрешение каналов анализатора изменяется в пределах 5-11% в зависимости от номера канала. Коэффициент паразитного проникновения атомов соседних масс для наиболее трудного случая - одновременной регистрации атомов ^3He и ^4He не превышает $\sim 10^{-1}$.

Для самой узкой апертуры анализатора (1×10 мм) абсолютная эффективность регистрации атомов изотопов водорода равна $\sim 0.05-0.4$ в диапазоне энергий $0.2-2$ МэВ и атомов гелия $\sim 0.2-0.4$ в диапазоне энергий $0.4-4$ МэВ. Для самой широкой апертуры (5×10 мм) эти значения ниже примерно в два раза.

В параграфе 4 приведены результаты калибровки параметров детекторной системы анализатора и проверки их в условиях эксперимента на токамаке / [12]/. Энергетическое разрешение детекторов составило $\sim 15-30\%$ в зависимости от энергии частиц. При одной и той же энергии амплитуда сигналов примерно в два раза выше для атомов водорода, чем для атомов гелия. Для измерения чувствительности детекторов к нейтронному и гамма излучению был использован радиоактивный источник ^{252}Cf , поскольку спектр излучения данного источника достаточно близок к спектру излучения плазмы. В частности, при регистрации альфа-частиц с энергией 0.4 МэВ чувствительность к нейтронам и гамма квантам составила величину $\sim 10^{-5}$ см²/нейтрон, а для энергии альфа-частиц 2 МэВ чувствительность равна $\sim 10^{-7}$ см²/нейтрон. Энергетическое разрешение детектора и его чувствительность к нейтронам являются ключевыми параметрами для определения возможности выделения сигнала частиц над фоном. Поэтому калибровочные значения этих параметров были проверены в реальных условиях работы токамака. Проводилась

регистрация дифференциальных спектров амплитуд импульсов фонового излучения и детектируемых ионов. Сравнительный анализ показал соответствие калибровочных данных и данных эксперимента на плазме. Это позволило оценить методику калибровочного эксперимента, как вполне приемлемую и перспективную для получения информации о параметрах детекторной системы, которые следует ожидать в полномасштабных плазменных экспериментах.

В дальнейшем анализатор ГЕММА вошел в состав комплексов нейтральной диагностики на токамаках JET (Евратом, Великобритания) / [7] /, TFTR (США) / [14] / и JT-60U (Япония) / [11], [27] / и послужил прототипом анализатора сверхтеплого диапазона энергии атомов HENPA для экспериментального термоядерного реактора ITER (см. главу VII).

В третьей главе представлены результаты исследования потоков атомов водорода МэВ диапазона энергии в экспериментах по ионному циклотронному нагреву малой добавки ионов водорода на установке JT-60U, которые были получены с помощью анализатора ГЕММА / [12], [13], [19], [24] /.

В параграфе 1 рассмотрены условия проведения экспериментов, размещение и параметры экспериментальной аппаратуры. Анализатор был установлен на верхнем патрубке установки и его линия видимости пересекала центр плазмы в вертикальном направлении. ВЧ-нагрев малой добавки водорода проводился в гелиевой и дейтериевой плазме на 2-ой гармонике ионной циклотронной частоты ионов водорода. При этом ВЧ резонансный слой находился в центре плазмы и совпадал с линией видимости анализатора. С целью дополнительного нагрева плазмы в нее также инжектировались пучки атомов дейтерия или водорода с энергией ~ 90 кэВ.

В параграфе 2 представлены результаты экспериментов по исследованию относительной роли ионов He^+ и C^{5+} в нейтрализации высокоэнергичных протонов. Идея этих экспериментов заключалась в следующем. Единственной доминирующей примесью на токамаке JT-60U является углерод, которым покрыты все внутренние элементы установки. Поэтому ожидалось, что в гелиевых плазменных разрядах основным механизмом нейтрализации ионов водорода в диапазоне энергии 0.2-1.0 МэВ (ускоренных с помощью ВЧ-нагрева) будет их перезарядка на ионах He^+ и C^{5+} . Вклад же остальных процессов, как следовало из модельных оценок, оказывался достаточно малым. С другой стороны, поскольку энергетическая зависимость сечений перезарядки протонов на ионах He^+ и C^{5+} в интересующей нас области энергии является существенно различной, была реализована уникальная возможность выделить роль каждого из этих ионов в нейтрализации протонов по энергетической области, где доминировал каждый из этих примесных ионов. Кроме того, с точки зрения выявления отличительных особенностей, особый интерес представлял сравнительный анализ дейтериевых разрядов с гелиевыми, где в

отличие от последних в качестве нейтрализационной мишени остаются только ионы C^{5+} . В этом параграфе приведены результаты изучения зависимости потоков атомов водорода от относительного тороидального положения инжектируемого пучка и атомного анализатора. При этом в гелиевую плазму инжектировались пучки атомов водорода из инжекторов, расположенных под разными тороидальными углами. Было обнаружено, что данная зависимость сильно пикирована при нулевом тороидальном угле (т.е. при совпадении положения инжектора и анализатора по тороидальному углу) для частиц со сравнительно малой энергией < 0.6 МэВ, в то время как, для частиц с большей энергией > 0.6 МэВ подобная зависимость не наблюдалась. Показано, что в первом случае нейтрализационной мишенью являются ионы He^+ , и пикированность тороидального профиля объясняется их пространственной локализацией вблизи инжектируемого пучка, поскольку ионизационная длина свободного пробега этих ионов в плазме сравнима с поперечными размерами пучка ~ 1 м и много меньше периметра токамака ~ 19 м. Второй случай соответствует подавляющему вкладу в нейтрализацию ионов C^{5+} , пространственное распределение которых по тору практически равномерно, поскольку ионизационная длина их свободного пробега больше периметра токамака и составляет величину ~ 25 м.

Далее представлены результаты подробного сравнительного анализа "активных" и "пассивных" энергетических спектров атомов водорода в гелиевых и дейтериевых плазменных разрядах. Было обнаружено, что в дейтериевых разрядах форма энергетического спектра атомов перезарядки не изменяется при инжекции в плазму пучка атомов. Напротив, в гелиевых разрядах наблюдался крутой подъем спектра в области энергий < 0.6 МэВ. Показано, что эффект подъема спектра связан с возрастанием вклада ионов He^+ по отношению к ионам C^{5+} в нейтрализации протонов во время инжекции пучка, а экспериментальная энергетическая зависимость относительной вероятности нейтрализации "активной" и "пассивной" фаз разряда находится в хорошем согласии с результатами модельных расчетов.

В параграфе 3 по энергетическому распределению атомов водорода восстановлена функция распределения быстрых протонов, образующихся при ВЧ-нагреве плазмы, в области энергии протонов $E \sim 0.1 - 1$ МэВ $\gg T_i$, где T_i – температура основной максвелловской части энергетического распределения протонов. Такие результаты представлены для дейтериевых и гелиевых плазменных разрядов. Показано, что в обоих случаях форма энергетического распределения протонов близка к экспоненциальной зависимости $f \sim \exp(-E/T_{tail})$, где температура "хвоста" высокоэнергичных протонов T_{tail} варьируется в пределах $\sim 100 - 350$ кэВ в зависимости от параметров разряда.

В параграфе 4 представлены результаты исследования зависимости температуры высокоэнергичного "хвоста" протонов от параметров плазмы и мощности ВЧ-нагрева /[12], [26]/. Показано, что она не подчиняется

зависимости, предсказываемой в теории Стикса /4/ $T_{\text{tail}} \propto P_{\text{IC}} T_e^{3/2} / n_e^2$, где P_{IC} – мощность ВЧ нагрева, T_e и n_e – температура и плотность электронов. Обнаружено, что в данном случае доминирующей оказывается ее зависимость от тока плазмы. Приведены данные по разрядам, где параметры плазмы и мощность ВЧ-нагрева меняются в достаточно широких пределах. Показано, что в полном диапазоне варьирования тока плазмы $I_p \sim 1.5 - 4$ МА, зависимость T_{tail} от тока близка к линейной. Для объяснения экспериментального скейлинга предложена модель, где в уравнении баланса мощности для ионов малой добавки учитываются также их потери, носящие диффузионный характер. Показано, что режимы ВЧ-нагрева плазмы на установке JT-60U соответствуют случаю значительных потерь быстрого ионного компонента, когда их энергетическая функция распределения формируется, как следствие баланса между уровнем вводимой ВЧ-мощности и пространственными потерями частиц. При этом найденный модельный скейлинг температуры быстрых ионов $T_{\text{tail}} \propto I_p (P_{\text{IC}} / n_e)^{1/2}$ хорошо согласуется с экспериментальными данными.

В четвертой главе представлены результаты исследования эффективности удержания тритонов, рождающихся в термоядерной реакции $d(d,n)t$, в плазме токамака JET /[34], [50]/.

В параграфе 1 рассмотрены условия проведения экспериментов, размещение и параметры экспериментальной аппаратуры. Атомный анализатор частиц ГЕММА был установлен на вертикальном патрубке октанта 4 токамака. Линия видимости прибора пересекала в вертикальном направлении центр плазмы и линию инжекции нейтрального нагревного пучка, мощность которого была равна 9.5 МВт. Поскольку по предварительным оценкам не ожидалась высокая интенсивность потока нейтрализованных тритонов, для исследования была выбрана серия одинаковых разрядов с мощной инжекцией в дейтериевую плазму дейтериевого пучка, для которых характерно хорошее удержание энергии в плазме - разрядов с так называемой горячей ионной H-модой.

В параграфе 2 проанализирована временная зависимость потоков атомов трития различных энергий. Показано, что в эксперименте наблюдается увеличение времени нарастания потока атомов трития с уменьшением их энергии. В частности, для энергии тритонов 720 кэВ оно составляет величину $\sim 0.75^{\pm 0.25}$ с, а для энергии 380 кэВ время нарастания равно $\sim 1.5^{\pm 0.25}$ с. Теоретическое значение времени установления стационарного состояния для фиксированной энергии при торможении быстрых тритонов в плазме в отсутствие их потерь оценивалось по формуле $\tau_{\text{st}}(v) \sim \tau_{\text{se}} / 3 \ln \{ (v_0^3 + v_c^3) / (v^3 + v_c^3) \}$, где τ_{se} – время торможения тритонов в плазме, v_0 - скорость, с которой рождаются тритоны в реакции синтеза ядер дейтерия, а v_c – критическая скорость /15/. Для параметров плазмы выбранной серии это время составило величину $\tau_{\text{st}} \sim 0.5$ с для энергии 720 кэВ и $\tau_{\text{st}} \sim 1.3$ с для энергии 380 кэВ, что близко к экспериментальным значениям. Таким образом, было показано, что

временная эволюция функции распределения термоядерных тритонов по энергии находится в хорошем соответствии с теоретическими оценками. Это свидетельствует о классическом торможении тритонов в плазме при отсутствии их потерь.

В параграфе 3 приведены результаты расчета вероятности нейтрализации высокоэнергичных тритонов. Значения плотности ядер основных примесей в центре плазмы были измерены с помощью спектроскопической диагностики /16/ и составили следующие значения для центра плазмы: $n_{\text{He}^{2+}}/n_{e0} = 1.3 \%$, $n_{\text{Be}^{4+}}/n_{e0} = 0.41 \%$ и $n_{\text{C}^{6+}}/n_{e0} = 0.8 \%$. Нейтральное гало пучка, образующееся на тепловых ионах дейтерия, рассчитывалось с помощью программы численного моделирования, основанной на использовании метода Монте-Карло. При этом плотность нейтралов гало в центре пучка составила существенную ($\sim 80 \%$) долю от средней плотности пучка. Было обнаружено, что при инжекции нагретого пучка в сечении, где расположен анализатор, перезарядка на атомах дейтериевого пучка и его нейтрального дейтериевого гало является доминирующим процессом в нейтрализации быстрых тритонов, а вклад примесных ионов мал. Это соответствует случаю классической активной нейтральной диагностики и обеспечивает возможность локальных измерений функции распределения тритонов в центре плазмы.

В параграфе 4 представлены результаты вычисления локальной функции распределения термоядерных тритонов по энергии для стационарной фазы разряда /50/. Показано, что она находится в хорошем согласии с классической изотропной функцией распределения быстрых ионов, когда форма энергетического распределения ионов определяется только процессом их торможения в плазме, а потери пренебрежимо малы. При этом величина объема плазмы, где удерживаются замедляющиеся тритоны, оказалась равной $\sim 20 \text{ м}^3$ ($\sim 20 \%$ от общего объема плазмы). С другой стороны, объем “горячей” зоны, т.е. области плазмы, где рождаются термоядерные тритоны, можно было также вычислить из измерений пространственных профилей интенсивности нейтронного излучения /17/. Этот объем оказался равным $\sim 15 \text{ м}^3$, т.е. сравнимым с объемом области удержания тритонов, что позволило сделать вывод, о том, что профиль плотности термоядерных тритонов, удерживаемых в плазме, близок к профилю их рождения.

В пятой главе представлены результаты разработки и калибровки атомного анализатора ISEP (ion separator, ионный сепаратор) /35/, который был задуман как прототип прибора, предназначенного для измерения изотопного состава дейтериево-тритиевой смеси в плазме термоядерного реактора /28], [36], [37]/. Анализатор позволяет проводить одновременное измерение абсолютных потоков и энергетических спектров атомов изотопов водорода (H^0 , D^0 , T^0) в тепловом диапазоне энергии $\geq 5 \text{ кэВ}$.

Разработка анализатора ISEP, в отличие от анализатора ГЕММА, описанного во второй главе, потребовала решения дополнительных серьезных проблем. Во-первых, при уменьшении минимальной энергии регистрируемых частиц с ~ 200 кэВ до теплового уровня ~ 5 кэВ значительно возрастает фоновая составляющая сигнала, обусловленная радиационным излучением (примерно в $\sim 10^2$ - 10^3 раз). Во-вторых, для надежного измерения соотношения потоков атомов изотопов водорода требовалось существенно более высокое массовое разрешение. При этом для измерения небольших относительных концентраций ионов необходимо было обеспечить высокую эффективность регистрации соответствующих потоков атомов. Наконец, в-третьих, получение экспериментальных калибровочных параметров анализатора ISEP для атомов трития являлось практически невозможным, вследствие радиоактивности трития.

Первую из перечисленных проблем было предложено решить методом доускорения вторичных ионов, образовавшихся после обдирки потока атомов в углеродной пленке с помощью напряжения до $+100$ кВ. Для решения второй проблемы предполагалось разработать дисперсионную анализирующую систему, которая позволяла бы иметь фокусировку пучка вторичных ионов всего регистрируемого энергетического диапазона на линии расположения детекторов, чтобы уменьшить перемешивание потоков ионов соседних масс и одновременно иметь высокую эффективность их сбора. Наибольшую трудность вызвала третья проблема, для решения которой автором была предложена специальная методика, основанная на использовании результатов численного моделирования параметров анализатора.

В параграфе 1 рассмотрены конструкция и принцип работы прибора, который основан на ионизации входящего потока атомов в тонкой углеродной пленке (300\AA) / [44]/, доускорении вторичных ионов напряжением до $+100$ кВ и анализе их по энергии и массе в параллельных магнитном и электрическом полях. В п.1.1 описан ускорительный модуль анализатора, разработанный на базе односекционной высоковольтной колонны с вытягивающим промежутком равным 20 мм. В п.1.2 представлено устройство системы электромагнитной дисперсии по энергии и массе с использованием параллельных магнитного и электрического полей специально подобранной формы. Это позволило получить острую фокусировку ионов в плоскости дисперсии и в плоскости перпендикулярной ей. Детекторная система анализатора рассматривается в п.1.3. Она состоит из трех линеек детекторов для регистрации атомов водорода, дейтерия и трития, соответственно. Всего в анализаторе установлено 32 детектора, каждый из которых представляет собой фотоэлектронный умножитель Hamamatsu R2248, на входное окно которого с помощью оптически прозрачного клея крепится кварцевое стекло с напыленным сцинтиллятором CsI(Tl). Толщина сцинтиллятора зависит от номера энергетического канала анализатора и изменяется в пределах от 1 до 7 микрон.

Толщина подбиралась равной длине свободного пробега ионов с энергией, которая регистрируется в данном канале. Далее приведены результаты проверки чувствительности детекторов к нейтронному и гамма излучению, выполненные с помощью радиоактивного источника ^{252}Cf по методике, описанной в главе II. Результаты тестирования позволили рассчитать суммарные амплитудные спектры частиц и фонового излучения и показать, что анализатор ISEP позволяет надежно регистрировать атомы изотопов водорода в условиях наличия (n, γ)- потока до $\sim 10^9$ 1/см²/с в месте установки прибора на токамаке JET.

В параграфе 2 подробно изложены результаты построения ускорительно-дисперсионной системы анализатора, которое включало в себя проведение экспериментов по измерению углового рассеяния атомов из калибровочного источника при прохождении их через тонкую углеродную пленку (п.2.1), изучение фокусирующих свойств ускорительного модуля (п.2.2) и численное моделирование траектории ионов в системе дисперсии анализатора (п.2.3). Главным результатом этой работы явилось создание ускорительно-дисперсионной системы, которая обладает фокусирующими свойствами, которые в значительной степени позволяют скомпенсировать рассеяние вторичных ионов в обдирочной пленке, достичь высокой эффективности их сбора в детекторную систему анализатора (~ 20 -50%) и низкого коэффициента паразитного проникновения атомов соседних масс ($\leq 10^{-3}$). В экспериментах по измерению углового рассеяния атомов водорода и дейтерия в обдирочной пленке было обнаружено отсутствие изотопного эффекта, что дало возможность использовать результаты численного моделирования параметров анализатора и для атомов трития / [30] /.

В параграфе 3 приведен анализ сравнения результатов этого численного моделирования с результатами калибровочного эксперимента, выполненного в ФТИ им.А.Ф.Иоффе с помощью пучка атомов калибровочного стенда. Анализ показал хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений энергетических параметров анализатора и эффективности регистрации атомов в доступном для эксперимента энергетическом диапазоне < 30 кэВ, что позволило использовать данные численного моделирования для определения калибровочных параметров прибора для более высоких энергий атомов > 30 кэВ.

В параграфе 4 представлены суммарные экспериментальные и модельные данные о калибровочных параметрах анализатора для различных энергетических настроек анализатора, рекомендованных для измерения изотопного соотношения плазмы в различных режимах работы плазменной установки.

В дальнейшем прибор вошел в состав диагностического комплекса нейтральной диагностики установки JET (Евратом, Великобритания).

В шестой главе представлены результаты применения анализатора ISEP для исследования потоков атомов изотопов водорода теплового диапазона энергии на установке JET / [39], [40], [53]/.

В параграфе 1 описаны условия проведения экспериментов, размещение и параметры экспериментальной аппаратуры. Анализатор нейтральных частиц ISEP был установлен в экваториальной плоскости токамака на расстоянии 9.5 м от центра плазмы, обеспечивая телесный угол сбора атомов $\sim 5.2 \times 10^{-6}$ см²стер. Линия видимости прибора располагалась в горизонтальной плоскости и проходила через центр плазмы вдоль большого радиуса.

В параграфе 2 приведены результаты измерения изотопного состава водородно-дейтериевой плазмы по потокам нейтральных атомов. Для того, чтобы по измеренным потокам атомов водорода и дейтерия, выходящим из плазмы, восстановить соотношение концентраций ионов водорода и дейтерия в плазме был использован компьютерный код DOUBLE-MS, описанный в главе I. С помощью кода моделировались энергетические спектры атомов водорода и дейтерия, наблюдаемые в эксперименте, и вычислялись соответствующие им значения концентраций ионов водорода и дейтерия в плазме. Кроме того, код позволял рассчитать функцию светимости атомов (зависимость интенсивности излучения атомов от радиуса плазмы), и тем самым определить пространственную область, из которой выходят потоки атомов разных энергий. Было показано, что в разрядах токамака с омическим нагревом (п.2.1), где плотность плазмы не превышает значения $\sim 1-2 \times 10^{13}$ см⁻³, возможно восстановление изотопного соотношения n_H/n_D в центральной области плазменного шнура $0 < r/a < 0.5$. В разрядах с нагревом плазмы нейтральными пучками дейтерия (п.2.2), где плотность плазмы достигает значения $\sim 1 \times 10^{14}$ см⁻³, пространственная область, где возможно определить изотопное соотношение, ограничена периферией плазмы $r/a > 0.7$. Центральная область плазмы оказывается недоступной для измерения, во-первых, из-за сильного поглощения потока атомов, выходящего из центра плазмы и, во-вторых, из-за искажения энергетического спектра атомов дейтерия в диапазоне энергии > 30 кэВ частицами нагревного пучка.

В параграфе 3 рассматриваются результаты экспериментов по измерению коэффициентов переноса ионов трития в экспериментах с малым газовым напуском трития в дейтериевую плазму. Идея использования нейтральной диагностики для таких измерений заключается в следующем (п.3.1) / [29]/. Атомы более высоких энергий несут информацию о более глубоких слоях плазмы. При напуске инородного газа в плазму нарастание соответствующих потоков атомов более высоких энергий будет происходить с запаздыванием. Следовательно, если измерить это запаздывание, то можно восстановить пространственно-временную картину проникновения ионов инородного газа вглубь плазмы.

Такое запаздывание удалось экспериментально обнаружить в разрядах токамака JET / [40] /, когда в дейтериевую плазму напускалось небольшое количество газа трития (Tritium Trace Experiment). Длительность напуска была равна ~ 100 мс, а количество напускаемого трития $\sim 2.8 \times 10^{20}$ частиц, что много меньше общего количества частиц в плазме. Это не оказывало заметного влияния на глобальные параметры плазмы. Несмотря на невысокую интенсивность потоков атомов трития из плазмы, удалось выделить полезный сигнал частиц над нейтронным фоном, благодаря высокой светосиле анализатора и его низкой чувствительности к нейтронному излучению. Кроме того, впервые в такого рода эксперименте удалось обнаружить увеличение скорости нарастания потоков атомов трития с ростом их энергии в диапазоне ~ 5 - 28 кэВ (п.3.2). По эволюции энергетических спектров атомов трития во времени была восстановлена временная эволюция пространственного профиля ионов трития и определены соответствующие транспортные коэффициенты процесса переноса ионов трития в плазме: скорость конвективного переноса составила величину ~ -0.5 м/с, а коэффициент диффузии ~ 0.1 м²/с. Это позволило сделать вывод о том, что перенос ионов трития в плазме близок к неоклассическому переносу / [53] /. Этот результат имеет большое значение для проблемы подпитки термоядерного реактора топливом.

Седьмая глава посвящена разработке концептуального проекта нейтральной диагностики теплового и сверхтеплового диапазона энергии для экспериментального реактора ITER / [37], [41], [43], [45], [47], [54] /.

В параграфе 1 сформулированы основные проблемы, которые необходимо было решить при концептуальном проектировании: определить задачи нейтральной диагностики на установке ITER, провести моделирование потоков нейтральных атомов дейтерия, трития и гелия, рассчитать параметры атомных анализаторов, осуществить интеграцию диагностики в комплекс оборудования на ITER, провести радиационные испытания детектирующей системы анализаторов, получить расчетные значения скоростей счета нейтральных атомов и (n, γ) - фона в энергетических каналах анализаторов частиц.

В параграфе 2 кратко перечислены задачи нейтральной диагностики на ITER и выделена главная задача - измерение изотопного соотношения термоядерного топлива (отношения плотностей ионов дейтерия и трития в плазме), которой уделяется наибольшее внимание в диссертации.

В параграфе 3 приведены результаты моделирования потоков атомов D^0 , T^0 и ${}^4He^0$, которые ожидаются на установке ITER / [47] /. Для этого был выбран стационарный режим работы реактора (п.3.1) /7/. В расчет включены следующие источники ионов (п.3.2): ионы дейтерия и трития тепловых энергий; ионы дейтерия нагревного и диагностического пучков; термоядерные альфа-частицы; “knock-on” ионы дейтерия и трития сверхтепловых энергий, образующиеся в результате лобовых столкновений тепловых ионов дейтерия и

третия с тормозящимися альфа-частицами. Вычисление пространственного распределения плотности основных нейтрализационных мишеней для ионов изотопов водорода (п.3.3) и гелия (п.3.4) было выполнено с помощью кода DOUBLE-MS (нейтральные атомы тепловых энергий) и кода ZIMPUR (водородоподобные и гелиеподобные ионы примесей Be и C) /11/.

Результаты расчета потоков атомов D^0 и T^0 в тепловом диапазоне энергии представлены в п.3.5. Показано, что атомы с энергией выше $E > 150$ кэВ излучаются в основном центральными областями плазмы $r < 0.4a$ (a – малый радиус установки), а атомы более низких энергий преимущественно выходят из внешних областей плазмы. При этом, в центральных областях плазмы нейтрализация ионов D^+ и T^+ теплового диапазона энергии происходит, в основном, за счет их перезарядки на ионах He^+ и радиационной рекомбинации на электронах, а вблизи периферии плазмы доминирующим процессом становится перезарядка ионов на тепловых нейтралах D^0 и T^0 . Анализ энергетических спектров атомов позволил сделать вывод о том, что надежные измерения n_D/n_T изотопного соотношения возможны только при ограничении энергетического диапазона регистрации потоков атомов D^0 и T^0 энергией ~ 100 - 110 кэВ, где энергетические спектры атомов не возмущены нетепловыми частицами. При этом измерения будут ограничены, в свою очередь, пространственной областью плазмы $r > 0.4a$.

Результаты расчета потоков атомов D^0 и T^0 в сверхтепловом диапазоне энергии представлены в п.3.6. Показано, что в области относительно низких энергий $E < 1$ МэВ необходимо учитывать вклад всех процессов в нейтрализацию ионов: перезарядки на ионах He^+ , Be^{3+} и C^{5+} и радиационной рекомбинации. Для энергий ионов выше $E > 1.2$ МэВ определяющими становятся два последних из перечисленных процессов. Анализ энергетических спектров атомов показал, что поток нейтрализованных “knock-on” ионов дейтерия значительно искажается присутствием частиц нагревного пучка в области энергии < 1.2 МэВ. Поток нейтрализованных “knock-on” ионов трития также перемешивается с потоком атомов, обусловленным тепловой частью энергетического распределения ионов, в области энергии ~ 350 кэВ. Таким образом, сверхтепловой диапазон энергии ограниченный энергиями $E_D > 1.2$ МэВ для дейтерия и $E_T > 0.4$ МэВ для трития, соответственно, оказывается наиболее надежным для проведения измерений n_D/n_T изотопного соотношения плазмы на установке ITER. При этом измерения будут усреднены по центральной области плазмы, где происходит рождение и удержание замедляющихся термоядерных альфа-частиц.

В этом же п.3.6 представлены результаты расчета потоков нейтрализованных альфа-частиц, которые показывают, что измерение функции распределения альфа-частиц методом пассивной нейтральной диагностики оказывается невозможным вследствие очень низкой плотности гелиеподобных ионов Be^{2+} и C^{4+} , которые необходимы для нейтрализации альфа-частиц.

В параграфе 4 описывается комплекс нейтральной диагностики на установке ITER, создаваемый по заказу Центральной команды ITER. Он состоит из двух анализаторов HENPA (High Energy Neutral Particle Analyzer) и LENPA (Low Energy Neutral Particle Analyzer), предназначенных для регистрации потоков атомов в энергетических диапазонах 0.1–4.0 МэВ и 10–200 кэВ, соответственно (п.4.1) /[41], [45]/.

Основные параметры приборов приведены в п.4.2. При их разработке необходимо было удовлетворить следующие требования: 1) Одновременное измерение потоков нейтральных атомов различных масс (после обдирки входящего потока - регистрация ионов всех водородных изотопов H^+ , D^+ , T^+ в анализаторе LENPA и регистрация ионов D^+ , T^+ , $^4He^+$, $^4He^{2+}$ в анализаторе HENPA); 2) Высокое массовое разрешение 3) Высокая эффективность регистрации нейтральных атомов; 4) Низкая чувствительность к нейтронному и гамма излучению и высокая радиационная стойкость.

Для обеспечения изложенных требований были успешно проведены следующие разработки. Во-первых, были изготовлены и протестированы углеродные пленки (толщина $\sim 100\text{\AA}$) увеличенного диаметра 20 мм /[44]/, используемые в анализаторах для ионизации входящего потока атомов. Во-вторых, были разработаны дисперсионные анализирующие системы, обладающие высокой эффективностью сбора ионов $\sim 40 - 50\%$ во всем энергетическом диапазоне детектируемых атомов (п.4.2.1). В-третьих, были разработаны многоканальные детекторные системы на основе многоанодного фотоэлектронного умножителя HAMAMATSU H8500D (п.4.2.2). В-четвертых, для анализатора LENPA был разработан ускорительный модуль на напряжение до +100кВ на базе многосекционной высоковольтной колонны (п.4.2.3), который обладает высокой электрической прочностью (напряженность поля со стороны атмосферы не превышает 15кВ/см). Численное моделирование параметров анализаторов (п.4.2.4) показало, что дисперсионные системы анализаторов обеспечивают высокое значение коэффициента паразитного проникновения соседних масс ионов $\leq 10^{-3}$, т.е. позволяют различать эти ионы с точностью $\sim 0.1\%$.

В параграфе 5 приведены результаты исследования влияния радиационного излучения на работоспособность анализаторов. Самым критичным элементом в них является тонкая обдирочная углеродная пленка, подверженная прямому нейтральному излучению плазмы, которое может привести к изменению параметров пленки и даже к ее разрушению. Изучение радиационной стойкости обдирочной мишени (п.5.1) показало, что в этом случае наиболее существенное влияние на пленку оказывают потоки нейтральных атомов с энергией около 1 кэВ, распыляющие материал пленки /[44], [46]/. Оценка времени жизни пленки (времени сохранения пленкой стабильности свойств) составили величину $\sim 2.6 \times 10^6$ с. Поскольку в анализаторах предлагается использовать механизм смены пленок, состоящий из 5-ти пленок, то время жизни такого модуля

оказывается равным $\sim 1.3 \times 10^7$ с или ≥ 20000 разрядов установки ITER (каждый разряд длится около 10 мин.). Важность проблемы изменения свойств пленки под воздействием излучения из плазмы потребовала разработки специальной системы контроля качества пленочной мишени (п.5.2). Автором был предложен метод контроля / [46], [51]/, идея которого заключается в том, что пленка просвечивается пучком щелочных ионов из вспомогательного источника с энергией, при которой длина пробега частиц в материале пленки в $\sim 2-3$ раза превышает ее толщину. При таком условии энергетический спектр, прошедших сквозь пленку частиц оказывается чувствительным как к толщине пленки, так и к числу дефектных ячеек в ней. При этом для измерения энергетического спектра предложено использовать электромагнитные анализирующие системы самих атомных анализаторов LENPA и HENPA, а не создавать специально для решения этой задачи дополнительные спектрометрические системы. Экспериментальное исследование этого метода подтвердило его высокую информативность и показало, что наиболее оптимальным для контроля качества углеродных пленок толщиной $\sim 100 \text{ \AA}$ является использование пучков ионов натрия с энергией ~ 15 кэВ, который обеспечивает измерение толщин пленок в диапазоне $30-250 \text{ \AA}$ с погрешностью не хуже 30 \AA и измерение доли дефектных ячеек пленки в пределах $0.1-100 \%$ с погрешностью не хуже 0.01% .

Другим критичным элементом анализаторов является их детекторная система. Испытания детекторов на чувствительность к нейтронному и гамма фону и радиационную стойкость были выполнены на циклотроне МГЦ20 НИИЯФ СПбГПУ (п.5.3) / [49], [52]/. При этом энергетические спектры нейтронного и гамма излучений были подобраны максимально близкими к спектрам, ожидаемым в условиях работы токамака-реактора (нейтронный поток со сплошным спектром и максимальной энергией близкой к 14 МэВ). Интегральная чувствительность детекторов к фоновому излучению составила величину $\sim 10^{-3}$ для энергии дейтерия ~ 10 кэВ и существенно падала до $\sim 10^{-5} - 10^{-7} 1/(\Phi_n \text{ см}^2 \text{ с})$ для энергии дейтерия $\sim 100 - 300$ кэВ (Φ_n обозначает поток нейтронов и гамма-квантов). В той же серии экспериментов была исследована и радиационная стойкость детекторов. Ресурсные испытания показали, что для условий установки ITER, где в среднем ожидается поток нейтронов $\sim 10^7 1/\text{см}^2/\text{с}$ в месте расположения диагностического оборудования, время стабильной работы детекторных систем анализаторов составляет не менее 10^7 с, т.е. около 3000 часов непрерывной эксплуатации или около 18000 разрядов установки ITER.

В параграфе 6, на основе результатов моделирования потоков нейтральных атомов (параграф 3) и результатов расчетов и измерений параметров анализаторов нейтральных частиц (параграфы 4 и 5), выполнен расчет скоростей счета как нейтральных атомов дейтерия и трития, так и нейтронного и гамма фона, которые ожидаются в энергетических каналах анализаторов. Показано, что регистрация потоков атомов в тепловом диапазоне энергии $E_D =$

$E_T = 10 - 120$ кэВ (LENPA) обеспечивает измерение изотопного соотношения во внешней области плазмы $\Gamma/a > 0.4$, при этом величина отношения сигнал/фон ожидается лучше, чем 100. Регистрация потоков атомов в сверхтепловом диапазоне энергии $E_D = 1.2 - 2$ МэВ и $E_T = 0.4-2$ МэВ (HENPA), обеспечивает измерение изотопного соотношения непосредственно в зоне горения, при этом величина отношения сигнал/фон ожидается лучше, чем 10 [54]. В обоих диапазонах энергии нейтральная диагностика удовлетворяет технологическим требованиям, предъявляемым к измерению изотопного состава плазмы на установке ITER, и обеспечивает точность 10% и временное разрешение 0.1с.

В Заключение сформулированы **основные результаты работы:**

1. Проведены разработка и абсолютная калибровка анализаторов нейтральных частиц для измерения потоков и энергетических спектров атомов (H, D, T и He) теплового (10 – 200 кэВ) и сверхтеплового (200 кэВ – 4 МэВ) диапазонов энергии, обеспечивающих работу в условиях высокого нейтронного и радиационного фона ($\sim 10^8-10^9$ см⁻²с⁻¹). Приборы вошли в состав диагностических комплексов крупнейших токамаков мира (JET, JT-60U, TFTR).
2. Обнаружен механизм нейтрализации ионов МэВ диапазона энергии на водородоподобных ионах легких примесей плазмы и предложена модель для расчета плотности нейтрализационной мишени.
3. Проведены эксперименты по исследованию нейтрализационной мишени высокоэнергичных (0.1 – 1.5 МэВ) ионов водорода на установке JT-60U, в которых:
 - Обнаружена зависимость формы энергетических спектров атомов водорода от сорта основного ионного компонента плазмы и наличия нейтральной инжекции. Показано, что эффект связан с изменением относительной роли ионов He⁺ и C⁵⁺ в нейтрализации быстрых протонов.
 - Развитая нейтрализационная модель применена для восстановления энергетической функции распределения протонов сверхтеплового диапазона энергии по энергетическому спектру атомов перезарядки.
 - В гелиевых плазменных разрядах обнаружена зависимость интенсивности потока атомов водорода от удаленности инжектируемого нейтрального пучка от места, где регистрируется поток атомов. Показано, что эффект обусловлен пространственной локализацией ионов He⁺ вблизи места инжекции;
4. Выполнены эксперименты по исследованию эффективности ВЧ-нагрева ионов на установке JT-60U, в которых впервые по потокам атомов водорода в МэВ диапазоне энергии измерена энергетическая функция распределения высокоэнергичных ионов водорода и показано, что доминирующую роль в ее формировании играют пространственные потери.
5. Проведены исследования эффективности удержания тритонов, рождающихся в термоядерной реакции d(d,n)t, в режимах мощного нагрева

дейтериевой плазмы с помощью нейтральных дейтериевых пучков на установке JET, в которых:

- Путем регистрации потоков атомов трития обнаружено, что в таких сценариях плазменного разряда определяющую роль в нейтрализации термоядерных тритонов играет их перезарядка на атомах пучка и его гало, что позволяет определить локальную функцию распределения тритонов в центре плазмы;
 - Впервые по потокам атомов перезарядки измерена локальная энергетическая функция распределения термоядерных тритонов. Показано, что сама функция и ее временная эволюция находятся в хорошем согласии с предсказаниями классической теории торможения быстрых частиц в плазме, а размер пространственной области, где удерживаются термоядерные тритоны, соответствует размеру области, где они рождаются.
6. Проведены эксперименты по изучению изотопного состава дейтериево-водородной плазмы на установке JET в различных режимах нагрева плазмы (омический нагрев, нейтральная инжекция). Выполнено численное моделирование потоков атомов и определены величины изотопного соотношения ионного компонента плазмы.
7. Выполнены эксперименты по исследованию переноса ионов трития в разрядах с импульсным газовым напуском трития в плазму на установке JET, в которых:
- Впервые обнаружена зависимость скорости нарастания потоков атомов трития от их энергии. Показано, что данная зависимость обусловлена процессом переноса ионов трития от края к центру плазмы;
 - По экспериментальным потокам атомов восстановлена эволюция профиля плотности ионов трития во времени и в рамках диффузионной модели определены коэффициент поперечной диффузии ($D \sim 0.1 \text{ м}^2/\text{с}$) и скорость пинчевания ионов ($V \sim 0.5 \text{ м/с}$).
8. Выполнена разработка концептуального проекта диагностики по потокам нейтральных атомов из плазмы для международного термоядерного реактора ITER, в котором:
- Проведен анализ механизмов нейтрализации ионов дейтерия и трития в тепловой и сверхтепловой областях энергии и рассчитаны величины скорости нейтрализации ионов;
 - Показано, что измерения изотопного соотношения плазмы необходимо проводить в энергетических диапазонах $120 \text{ кэВ} > E_D > 1.2 \text{ МэВ}$ и $120 \text{ кэВ} > E_T > 0.4 \text{ МэВ}$, что исключит влияние нагревных и диагностического пучков на измерения;
 - Показано, что регистрация потоков атомов в тепловом диапазоне энергии (10-120 кэВ) обеспечивает измерение изотопного соотношения во внешней области плазмы $r/a > 0.4$, при этом величина отношения сигнал/фон ожидается лучше, чем 100;

- Показано, что регистрация потоков атомов сверхтеплого диапазона энергии ($E_D = 1.2-2$ МэВ и $E_T = 0.4-2$ МэВ) обеспечивает измерение изотопного соотношения непосредственно в зоне горения, при этом величина отношения сигнал/фон ожидается лучше, чем 10;
- Показано, что диагностика удовлетворяет технологическим требованиям, предъявляемым к измерению изотопного состава плазмы на установке ИТЕР, и обеспечивает точность 10% и временное разрешение 0.1с.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

- [1]. В.И.Афанасьев, А.А.Басалаев, А.И.Кисляков, А.А.Коротков, К.О.Ложкин и М.Н.Панов. Состояние работ по диагностике быстрых альфа-частиц с использованием перезарядки на мегаэлектронвольтовых пучках атомов, Препринт ФТИ, -1369, 1989.- 37с.
- [2]. V.I.Afanasyev, A.B.Izvozchikov, A.A.Korotkov and A.V.Khudoleev. Prospects of Fast Alpha-Particle Diagnostics by the Low Energy Helium Atomic Beam, - ITER Diagnostics Meeting, - ITER-IL-PH-79510, 1989.
- [3]. V.I.Afanasyev, A.B.Izvozchikov, A.A.Kislyakov. Ion component diagnostics on ITER by means of atomic beams, - ITER Diagnostics Meeting, - ITER-IL-PH-07-0-27, 1989.
- [4]. V.I.Afanasyev, A.A.Basalaev, A.B.Izvozchikov, A.A.Kislyakov, K.O.Looskin and M.N.Panov. The possibilities active neutral particle diagnostics of the fast fusion products in ITER, - ITER Diagnostics Meeting, - ITER-IL-PH-79510, 1989.
- [5]. A.V.Khudoleev, V.I.Afanasyev, S.Corti, A.Gondhalekar, A.Maas and M.Petrov. Measurements of MeV Energy ICRF Driven Minority Ions in JET, 19th EPS Conf. on Control. Fusion and Pl. Heating, Innsbruck, 1992, vol. I. - p.151-155.
- [6]. A.V.Khudoleev, V.I.Afanasyev, S.Corti, A.Gondhalekar, A.Maas and M.Petrov, Measurements of MeV Hydrogen Minority Ions in JET. - EPS Top. Conf. on Radiofrequency Heating and Current Drive of Fusion Devices, vol. 16E, 1992. - pp. 117-120.
- [7]. M.P.Petrov, V.I.Afanasyev, S.Corti, A.Gondhalekar, A.V.Khudoleev, A.A.Korotkov and A.C.Maas. Neutral Particle Analysis in the MeV Range in JET, - 19th EPS Conf. on Control. Fusion and Pl. Physics, vol. 16C(II), 1992. - pp.1031-1034.
- [8]. V.Afanasyev, A.Kislyakov, M.Mironov, M.Petrov, S.Petrov, M.Turniansky, A.Khudoleev and F.Chernyshev. Proposals on the Neutral Particle Diagnostics for ITER, - ITER Meeting on Generics Access for Diagnostics, Garching, 1994. - IP58 94-06-16F.
- [9]. Y.Kusama, K.Tobita, T.Nishitani, K.Tani, K.Nagashima, M.Nemoto, S.Petrov, V.I.Afanasyev, Y.Koide, A.Morioka, M.Hoek and K.Ishigusa. The effect of toroidal ripple on fast ion loss in JT-60U, 15th Int. Conf. on Pl. Physics and Control. Nucl. Fusion Research, Seville, 1994. - IAEA-CN-60/A-2IV-5.
- [10]. Y.Kusama, V.I.Afanasyev, S.Ya.Petrov, M.Nemoto, H.Kimura, A.Morioka, M.Satoh, Y.Tsukahara, M.Saigusa, T.Kondoh, S.Moriyama, T.Fujii, S.S.Kozlovskij, A.I.Kislyakov, M.P.Petrov, T.Nishitani and K.Ushigusa. Direct measurement of MeV-range atomic hydrogen using a charge-exchange neutral particle analyzer in ICRF-heated JT-60U plasmas, JAERI-Research 94-036, 1994. - 24с.
- [11]. Y.Kusama, M.Nemoto, M.Satoh, Y.Tsukahara, K.Tobita, H.Takeuchi, V.I.Afanasyev, S.S.Kozlovskij, A.I.Kislyakov, S.Ya.Petrov and M.P.Petrov.

Charge-exchange neutral particle measurement in MeV energy range // Review of Scientific Instruments, 66(1), 1995. – c. 339-341.

- [12]. V.I.Afanassiev, Y.Kusama, M.Nemoto, T.Nishitani, S.S.Kozlovskij, S.Ya.Petrov, M.Satoh, A.Morioka, Y.Tsukahara, T.Kondoh, H.Kimura, K.Hamamatsu, S.Moriyama, M.Saigusa, T.Fujii. Measurement of atomic hydrogen fluxes in MeV-energy range in ICRF-heated JT-60U plasmas, - 22nd Europ. Phys. Society Conf. on Contr. Fusion and Pl. Phys., Bournemouth, 1995, v.19C(II), - p.57-60.
- [13]. H.Kimura, O.Naito, M.Saigusa, S.Ide, M.Nemoto, Y.Ikeda, S.Moriyama, T.Kondoh, T.Fujii, M.Seki, Y.Kusama, V.I.Afanassiev, A.A.Tuccillo, S.Podda, Y.Fang, K.Ushigusa, Y.Kamada, S.Ishida, Y.Neyatani, K.Kamamatsu and K.Tobita. Recent Results on Radio Frequency Experiments in JT-60U, - 11th Topical Conf. on radio frequency Power in Plasmas, AIP Conf. Proceedigs, 1995. - p. 81-89.
- [14]. Y.Kusama, M.Nemoto, V.I.Afanassiev, S.S.Kozlovskij, S.Ya.Petrov, M.Satoh, Y.Tsukahara, A.I.Kislyakov, M.P.Petrov. Neutral particle analyzer with energy range up to 4 MeV for both alpha particles and protons. - 7th Int. Toki Cof. on Pl. Phys. and Control. Nucl. Fusion, 1996. - D-2-P2-58.
- [15]. M.I.Mironov, V.I.Afanassiev and A.V.Khudoleev, Possibility of Using Li^+ Fraction of Lithium Beam for Fusion Alpha-Particle Diagnostics. - 23d EPS Conf. on Control. Fusion and Pl. Phys., vol. 20C (III), 1996. - pp.1043-1046.
- [16]. A.V. Khudoleev, V.I. Afanassiev and M.I. Mironov, He^+ Halo Formation during Neutral Beam Injection into Magnetically Confined Plasma. - 23d EPS Conf. on Control. Fusion and Pl. Phys., vol. 20C (III), 1996. - pp.1039-1042.
- [17]. H.Kimura, S.Moriyama, M.Saigusa, T.Fujii, K.Kamamatsu, S.Ishida, Y.Kamada, T.Kondoh, M.Nemoto, Y.Neyatani, K.Tobita, V.I.Afanassiev, C.Z.Cheng and G.Y.Fu. ICRF Heating and TAE Modes in Reactor-Relevant JT-60U Discharges, - IAEA Energy Conf., 1996.
- [18]. M.Saigusa, Y.Kusama, T.Ozeki, H.Kimura, T.Fujita, S.Moriyama, T.Fujii, M.Azumi, V.I.Afanassiev, Y.Neyatani, G.Y.Fu and C.Z.Cheng. Effect of shear in toroidal rotation on toroidicity-induced Alfvén eigen mode // Nuclear Fusion, 1997. – p.1559.
- [19]. M.Nemoto, Y.Kusama, V.I.Afanassiev, K.Kamamatsu, H.Kimura, T.Fujii and S.Moriyama. Ion heating in MeV energy range with higher harmonic ICRF wave on JT-60U // Pl. Phys. and Control. Fusion, 39, 1997. – p.1599.
- [20]. Y.Kusama, M.Nemoto, V.I.Afanassiev, S.S.Kozlovskij, M.Satoh, A.Morioka, Y.Tsukahara, A.I.Kislyakov, M.P.Petrov, H.Takeuchi. Neutral particle analyzer with energy range up to 4 MeV for both alpha particles and protons // Fusion Engineering and Design, 1997. - p.34-37.
- [21]. С.С.Козловский, В.И.Минеев, В.В.Гребенщиков, А.В.Худолеев, В.И.Афанасьев и Ф.И.Гарсия. Сцинтилляционный детектор для регистрации частиц в диапазоне энергий 0.1-4МэВ с низкой чувствительностью к

- нейтронному и гамма излучению. – 9-е Совещание по Диагностике Высокотемпературной Плазмы, С.-Петербург, 1997.
- [22]. А.В.Худолеев, В.И.Афанасьев, Ф.В.Чернышев, Возможности контроля изотопного состава плотной плазмы по потокам атомов перезарядки. 9-е Совещание по Диагностике Высокотемпературной Плазмы, С.-Петербург, 1997.
- [23]. A.V.Khudoleev, V.I.Afanassiev, A.I.Kislyakov. The Neutral Particle Analysis System for D-T Plasma Composition Control in ITER, - ITER Report, 1997.
- [24]. V.I.Afanassiev, Y.Kusama, M.Nemoto, T.Kondoh, S.S.Kozlovskij, S.Ya.Petrov, M.Satoh, A.Morioka, Y.Tsukahara, T.Nishitani, H.Kimura, K.Hamamatsu, S.Moriyama, M.Saigusa, T.Fujii. Neutral particle analysis in MeV energy range and relative role of He⁺ and C⁵⁺ ions in fast proton neutralization in ICRF and combined ICRF/NBI-heated JT-60U plasmas // Plasma Physics and Control. Fusion, 39, 1997. - pp.1509-1524.
- [25]. В. И. Афанасьев, А. Б. Извозчиков, С. Я. Петров и Ф. В. Чернышев. Влияние массового разрешения многоканального атомного анализатора на определение изотопного состава водородной плазмы // Журнал технической физики, том 67, № 4, 1997. - с.13-18.
- [26]. F. V. Tchernyshev, V. I. Afanassiev, Y. Kusama et al, Experimental Scaling for Fast Ion Temperature during Ion Cyclotron Heating in JT-60U. - Review of JT-60U Experimental Results in 1997, JAERI-Research 98-039, 1998. - pp. 89-92.
- [27]. А.В.Худолеев, В.И.Афанасьев, А.И.Кисляков, М.П.Петров и С.С.Козловский. Корпускулярная диагностика частиц в МэВ -диапазоне энергий на крупных современных токамаках // Физика плазмы, т. 24, № 2, 1998. с. 1-9.
- [28]. A.I.Kislyakov, V.I.Afanassiev, A.V.Khudoleev, S.S.Kozlovskij and M.P.Petrov. NPA at ITER: Physical Basis and Conceptual Design // Diagnostics for Experimental Fusion Reactors, Plenum Press, New York, 1998. - p.353-360.
- [29]. V.I.Afanasyev, A.Gondhalekar, A.I.Kislyakov. On the Possibility of Determining the Radial Profile of Hydrogen Isotope Composition of JET Plasmas, and of Deducing Radial Transport of the Isotope Ions, - JET-R(00)04, 2004. pp. 1-16.
- [30]. П.Ю.Бабенко, С.С.Козловский, В.И.Афанасьев, М.И.Миронов, С.Я.Петров, А.В.Худолеев и Ф.В.Чернышев. Угловые распределения ионов легких элементов после прохождения тонкой углеродной пленки // Письма в Журнал Технической Физики, т.27, вып.19, - с.44-49.
- [31]. V.K.Liechtenstein, V.I.Afanasyev, P.Y.Babenko et al. Development and Characterization of Ultra-thin Diamond-like Carbon Foils for Particle Diagnostics in Laboratory and Space Plasmas, Proc. of 29th EPS Conf. on Pl. Phys. and Control. Fusion, Montreux, 2002, - ID P-2.128.

- [32]. M.P. Petrov, V.I. Afanasiev, A.I. Kislyakov, S.S. Kozlovski, B.V. Ljublin, S. Ya. Petrov, E.V. Suvorkin. Neutral Particle Analysis on ITER. Problems of Atomic Science and Technology, 4, 2003. / Series: Plasma Physic (7), - p.80.
- [33]. V.I. Afanasiev, A.I. Kislyakov, S.S. Kozlovski, B.V. Ljublin, M.P. Petrov, S.Ya. Petrov and E.V. Suvorkin. Neutral Particle Analysis on ITER-FEAT. 30th EPS Conf. on Contr. Fusion and Pl. Phys., 27A, 2003. - O-4.4D.
- [34]. V.I. Afanasyev, A.V. Khudoleev, A. Gondhalekar. Neutral Particle Analyzer Measurement of the Local Energy Distribution Function of MeV Energy DD Fusion Tritons in JET, EFDA–JET–PR(03)43, 2003.
- [35]. V.I. Afanasiev, A. Gondhalekar, P. Yu. Babenko, P. Beaumont, P. De Antonis, A.V. Detch, A.I. Kislyakov, S.S. Kozlovski, M.I. Mironov, M.P. Petrov, S.Ya. Petrov, F.V. Tschernyshev and C.H. Wilson. A Neutral Particle Analyzer/Isotope Separator for Measurement of Hydrogen Isotope Composition of JET Plasmas // Review of Scientific Instruments, 74, 4, 2003. - pp.2338-2352.
- [36]. V.I. Afanasiev, A.I. Kislyakov, S.S. Kozlovski, E.G. Kuzmin, B.V. Ljublin, M.P. Petrov, S.Ya. Petrov. Engineering Design of the Neutral Particle Analyser System on ITER. Plasma Devices and Operations, 12, 3, 2004. - pp.209-215.
- [37]. В.И. Афанасьев, А.И. Кисляков, С.С. Козловский, М.И. Миронов, М.П. Петров, С.Я. Петров, Ф.В. Чернышёв. Диагностика горячей плазмы по потокам нейтральных атомов. Состояние и перспективы. - XXXI Звенигородская конф. по физике плазмы и УТС, Москва, 2004.
- [38]. M.P. Petrov, V.I. Afanasiev, F.V. Chernyshev, A.I. Kislyakov, S.S. Kozlovski, M.I. Mironov, S.Ya. Petrov. New Trends in the Plasma Diagnostic Using Neutral Particle Analysis (Apparatus and Experimental Results). Proc. of Int. Conf. and School on Pl. Phys. and Control. Fusion, Alushta (Crimea), 2004. - p.27.
- [39]. M. Mironov, V. Afanasyev, A. Murari, M. Santala, P. Beaumont. Tritium Transport Studies with JET ISEP NPA During the Trace Tritium Experimental Campaign. 31st EPS Conf. on Contr. Fusion and Pl. Phys., 28G, 2004. – p.1.149.
- [40]. A. Murari, L. Bertalot, G. Bonheure, S. Conroy, G. Ericsson, V. Kiptily, K. Lawson, S. Popovichev, M. Tardocchi, V. Afanasyev, M. Angelone, A. Fasoli, J. Kallne, M. Mironov, J. Mlynar, D. Testa, K.D. Zastrow. ‘Burning plasma’ diagnostics for the physics of JET and ITER // Pl. Phys. and Control. Fusion, 47, 2005. – pp. B249–B262.
- [41]. В.И. Афанасьев, Д.Б. Гаркуша, А.И. Кисляков, С.С. Козловский, Е.Г. Кузьмин, Е. Ламзин, Б.В. Люблин, М.П. Петров, С.Я. Петров, Ф.В. Чернышев, Г.Е. Шаталов, С.В. Шелудяков. Прогресс в разработке инженерного проекта системы диагностики плазмы реактора ИТЭР по потоку атомов: Тез. Докл. 11-й Всеросс. Конф. по диагностике высокотемпературной плазмы. - Троицк – Звенигород, 2005. с.89 – 91.
- [42]. A.N. Karpushov, B.P. Duval, Ch. Schlatter, H. Weisen, V.I. Afanasyev, F.V. Chernyshev, M.I. Mironov. Determination of the Radial Profile of Hydrogen

- Isotope Composition in TCV plasmas. - 32nd EPS Plasma Phys. Conf., Tarragona, Spain, 29C, 2005. - pp.4.097.
- [43]. A.Murari, L.Bertalot, S.Conroy, G.Ericsson, V.Kiptily, S.Popovichev, H.Schuhmacher, J.M.Adams, V.Afanasyiev, M.Angelone, G.Bonheure, B.Esposito, J.Kallne, M.Mironov, M.Pillon, M.Reginato, D.Stork, A.Zimbal. New developments in JET neutron, gamma-ray and particle diagnostics with relevance to ITER. // Nucl. Fusion, v.45, 10, 2005. p.S195-S202.
- [44]. В.Х.Лихтенштейн, В.И.Афанасьев, К.Ю.Вуколов, Т.М.Ивкова, Е.Д.Ольшанский, М.П.Петров. Разработка и радиационные испытания тонкоплёночных алмазоподобных мишеней для корпускулярной диагностики термоядерной плазмы в ИТЭР / Вопросы атомной науки и техники, Сер. Термояд. синтез, вып. 4, 2006. - с.45—52.
- [45]. В.И. Афанасьев, М.И. Миронов, А.И. Кисляков, С.С. Козловский, А.Д. Мельник, М.П. Петров, С.Я. Петров, А.В. Худолеев, Ф.В. Чернышев. Диагностика по анализу нейтральных атомов на ИТЭРе. - XII Всерос. конф. «Диагностика Высокотемпературной Плазмы», г. Звенигород, Московской области, 2007.
- [46]. А.Д. Мельник, В.И. Афанасьев, С.С. Козловский, В.Х. Лихтенштейн, М.П. Петров, С.Я. Петров, Ф.В. Чернышев. Ресурсные испытания тонкой алмазоподобной углеродной пленки и разработка системы контроля за качеством пленки для анализаторов HENPA и LENPA.. - XII Всерос. конф. «ДВП-12», г. Звенигород, 2007.
- [47]. V. I. Afanasyev, M. I. Mironov, S. V. Konovalov, A. V. Khudoleev, M. P. Petrov, S. S. Kozlovsky, V. G. Nesenevich, B. V. Lyublin, S. Ya. Petrov, A. I. Kislyakov, F. V. Chernyshev, and A. D. Melnik. Neutral particle analysis on ITER and requirements for DEMO // AIP Conf. Proc., v.988, 2008. - pp.177-184.
- [48]. В.И. Афанасьев, С.С. Козловский, В.Х. Лихтенштейн, Б.В. Люблин, А.Д. Мельник, М.И. Миронов, В.Г. Несеневич, М.П. Петров, С.Я. Петров, Ф.В. Чернышев. Система контроля параметров обдирочной мишени в атомных анализаторах для ИТЭР'а. – XIII Всерос. конф. «ДВП-13», г. Звенигород, 2009.
- [49]. В.И. Афанасьев, С.С. Козловский, Д.В. Макарьин, А.Д. Мельник, М.И. Миронов, В.Г. Несеневич, М.П. Петров, С.Я. Петров, Ф.В. Чернышев. Фоновые и ресурсные испытания детекторов атомных анализаторов для ИТЭР'а на пучке быстрых нейтронов. – XIII Всерос. конф. «ДВП-13», г. Звенигород, 2009.
- [50]. В.И.Афанасьев, А.В.Худолеев. Измерение потоков атомов перезарядки термоядерных тритонов на установке ДЖЕТ // Физика плазмы, том 36, №8, 2010. – с.706-711.
- [51]. В.И.Афанасьев, С.С.Козловский, В.Х.Лихтенштейн, Б.В.Люблин, А.Д.Мельник, М.И.Миронов, В.Г.Несеневич, М.П.Петров, С.Я.Петров, Ф.В.Чернышев. Метод контроля параметров обдирочной мишени в атомных

анализаторах для ITER // Приборы и техника эксперимента, № 2, 2010. - с.1–5.

- [52]. В.И.Афанасьев, С.С.Козловский, Д.В.Макарьин, А.Д.Мельник, М.И.Миронов, В.Г.Несеневич, М.П.Петров, С.Я. Петров, Ф.В.Чернышев. Фоновые и ресурсные испытания детекторов атомных анализаторов для ИТЭРа на пучке быстрых нейтронов // Физика плазмы, Т.36, 2010.
- [53]. M.Mironov, V.Afanasyev, A.Murari, M.Santala, P.Beaumont, Tritium transport studies with use of ISEP NPA during tritium trace experimental campaign on JET // Plasma Physics and Control Fusion, 2010 (находится в печати).
- [54]. V.I.Afanasyev, F.V.Chernyshev, A.I. Kislyakov, S.S.Kozlovskia, B.V.Ljublinb, M.I.Mironov, A.D.Melnik, V.G.Nesenevich, M.P.Petrov, S.Ya.Petrov. Neutral Particle analysis on ITER: present status and prospects // Nuclear Instruments and Methods A 621, 2010. – pp.456-467.

ЛИТЕРАТУРА, ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ:

1. J.G.Cordey et al // Nuclear Fusion, vol. 15, 1975. - p.441.
2. Ya.I.Kolesnichenko, The Role of Alpha Particles in Tokamak Reactors // Nuclear Fusion, vol. 20, No. 6, 1989. - pp. 727-780.
3. S.V.Putvinskii et al, in Reviews of Plasma Physics, vol. 1, New York, 1993, - p. 239.
4. T.H.Stix, Fast-Wave Heating of a Two-Component Plasma // Nuclear Fusion, vol. 15, No. 4, 1975. - pp. 737-754.
5. P.Helander, M.Lisak and D.D.Ryutov, Formation of Hot Ion Populations in Fusion Plasmas by Close Collisions with Fast Particles // Plasma Physics and Controlled Fusion, vol. 35, 1993, pp.363-377.
6. L.Ballabio, G.Gorini, J.Kallne, α -particle knock-on signature in the neutron emission of DT plasmas // Phys. Rev. E 55, 1997, pp.3358-3368.
7. ITER Physics Basis // Nuclear Fusion, vol. 39, 1999, pp.2137-2638.
8. A.A.Korotkov, A.Gondhalekar and A.J. Stuart // Nucl. Fusion, 37, 1997. -p.35-51.
9. D.E.Post, D.R.Mikkelsen, R.A.Hulse et al, Techniques for Measuring the Alpha-Particle Distribution in Magnetically Confined Plasmas // J.of Fusion Energy, vol. 1, No. 2, 1981. - pp.129-142.
- 10.K.-D.Zastrow, J.H.Brzozowski, P.Horling and E.Rachlew-Kallne. An elegant method to estimate helium-like ion densities from visible and VUV plasma spectroscopy // Plasma Phys. Control. Fusion 35, 1993, p.1553.
- 11.V.M.Leonov and V.E.Zhogolev // Plasma Phys. Control. Fusion 47, 2005. - pp.903-918.
- 12.A.A.Korotkov and A.M.Ermolaev. Impurity Induced Neutralization of Alpha Particles and Application to ITER Diagnostics, - 22nd EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, vol. 19C(III), 1995, pp. 389-372.
- 13.A.B.Izvozchikov, A.V.Khudoleev, M.P.Petrov et al, Charge-Exchange Diagnostics of Fusion Alpha-Particles and ICRF Driven Minority Ions in MeV Energy Range in JET Plasma, JET Report, JET-R (91) No.12, 1991.
- 14.S.S.Medley, D.K.Mansfield, A.L.Roquemore et al, Design and Operation of the Pellet Charge Exchange Diagnostic for Measurement of Energetic Confined Alpha Particles and Tritons on the Tokamak Fusion Test Reactor // Review of Scientific Instruments, vol. 67, Issue 9, 1996, - pp. 3122-3135.
- 15.Д.В.Сивухин, Вопросы теории плазмы / Под ред. М.А.Леонтовича. М.: Госатомиздат, Вып.4, 1964. - с.81.
- 16.M. von Hellermann and H.P.Summers, Atomic Modeling and Spectroscopic Diagnostics // Review of Scientific Instruments, vol. 63, Issue 10, 1992. - pp. 5132-5139.
- 17.O.N.Jarvis et al. Neutron profile measurements in the Joint European Torus // Fusion Engineering and Design 34-35, 1997. - p.59.