

Учреждение Российской академии наук  
Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН

---

На правах рукописи



Миронов Максим Игоревич

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗОТОПНОГО  
СОСТАВА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ ПО  
ПОТОКАМ ВЫХОДЯЩИХ АТОМОВ

(специальность 01.04.08 - физика плазмы)

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

Санкт-Петербург

2 0 1 0 г.

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник, Афанасьев В.И.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник, Лебедев С.В.  
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург)

кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник, Заверяев В.С.  
(ИЯС РНЦ "Курчатовский Институт", Москва)

Ведущая организация ГОУ Санкт-Петербургский Государственный  
Политехнический Университет

Защита состоится 28 октября 2010 г. в 15:30 на заседании Диссертационного  
совета Д 002.205.03 при Учреждении Российской академии наук Физико-  
технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН по адресу: 194021, Санкт-  
Петербург, ул. Политехническая, д. 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской  
академии наук Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

Автореферат разослан 27 сентября 2010 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук



Красильщиков А.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации.

К настоящему времени в области управляемого термоядерного синтеза достигнуты значительные успехи. Обнаружены и исследованы свойства режимов с улучшенным удержанием плазмы и режимов с транспортными барьерами. Идентифицированы основные физические явления, ведущие к срыву плазменного разряда, и разработаны схемы подавления неустойчивостей и стабилизации плазмы. Современные методы дополнительного нагрева позволяют нагреть плазму до термоядерных температур, а благодаря средствам безындукционного поддержания тока возможно получение длительного (десятки секунд) разряда. Накопленные теоретические и экспериментальные сведения стали основанием для физической концепции первого международного экспериментального термоядерного реактора с магнитным удержанием плазмы токамака ИТЭР /1/, строительство которого начато в 2008 году в Кадараше (Франция). Необходимым условием успешной реализации проекта ИТЭР является развитый комплекс диагностик, без которого невозможно управление таким сложным физическим объектом, как плазменный шнур в камере токамака. Одной из первостепенных диагностических задач является измерение и контроль изотопного состава плазмы, так как в качестве термоядерного топлива в реакторе ИТЭР планируется использовать смесь дейтерия и трития. Кроме того, такие измерения актуальны для контроля плотности ионов малой добавки при ионно-циклотронном нагреве, который будет использоваться в ИТЭР, в частности, для формирования и поддержания режимов с улучшенным удержанием плазмы. Поэтому наряду с измерением других базовых параметров плазмы, измерение изотопного соотношения в плазме внесено в список приоритетных диагностических задач ИТЭР /2/.

Существует целый ряд диагностических методов для исследования состава ионной составляющей плазмы. Одним из первых для этой цели был применен анализ потока атомов, выходящих из плазмы /3/, который стал стандартным способом для измерения изотопного состава плазмы и в данный момент рассматривается как основной метод диагностики состава топлива в ИТЭРе. Однако для успешного применения диагностики плазмы по потоку испускаемых атомов на токамаке-реакторе требуются дальнейшие усилия по развитию возможностей такого метода, так как условия измерения потоков атомов на ИТЭРе будут значительно отличаться от условий на существующих исследовательских установках, в первую очередь из-за высокого уровня нейтронного и гамма-излучений. Развитию в этом направлении исследования потока атомов из плазмы, и в первую очередь его изотопного состава, и посвящена данная работа.

Цели настоящей работы заключались в следующем: 1) создание атомного анализатора, позволяющего проводить одновременные измерения

интенсивностей и энергетических спектров всех трех изотопов водорода и способного работать в условиях высоких уровней нейтронного и гамма-излучений; 2) использование этого прибора в плазменных экспериментах для совершенствования диагностики изотопного состава плазмы; 3) оценка перспективности метода для изучения изотопного состава в будущих термоядерных реакторах.

Научная новизна и практическая ценность работы заключаются в том, что в результате ее выполнения создан новый анализатор атомных частиц ISEP, который впервые позволяет проводить измерение изотопного соотношения высокотемпературной плазмы при высоком нейтронном фоне (до  $10^9$  нейтронов/см<sup>2</sup>/с) без использования дополнительной защиты. Этот анализатор вошел в состав диагностического комплекса действующего крупнейшего в мире токамака JET (Великобритания).

Развита методика калибровочных экспериментов. Впервые создана полноценная численная модель характеристик анализатора, достоверность которой была подтверждена в ходе калибровочных экспериментов, и которая была использована для определения эксплуатационных параметров прибора (эффективность, энергетическое разрешение, коэффициент паразитного проникновения атомов соседних масс) в недоступных для калибровки областях высоких энергий и сортов частиц (третий).

Разработан программный код на основе метода Монте-Карло, позволяющий восстанавливать по потокам атомов из плазмы функцию распределения и изотопное соотношение тепловых ионов в многокомпонентной плазме с пространственно неоднородным распределением мишени, на которой происходит нейтрализация ионов плазмы.

На установке JET в экспериментах с напуском малого количества газообразного трития впервые обнаружен эффект запаздывания появления потоков атомов трития более высоких энергий, что связано с динамикой проникновения ионов трития вглубь плазмы.

Проведен анализ и сделаны выводы о перспективности диагностики по потокам атомов для определения топливного состава в будущих термоядерных установках.

#### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка и абсолютная калибровка атомного анализатора частиц для измерения потоков и энергетических спектров атомов водорода, дейтерия и трития, испускаемых плазмой в тепловом диапазоне энергий.

2. Создание программы численного моделирования потоков атомов, позволяющей восстанавливать функцию распределения тепловых ионов в высокотемпературной многокомпонентной плазме, в которой нейтрализация ионов изотопов водорода происходит на пространственно неоднородной мишени.

3. Проведение экспериментов по определению изотопного соотношения ионного компонента плазмы на токамаке JET.

4. Исследование переноса ионов трития в разрядах с напуском тритиевого газа в дейтериевую плазму на установке JET.

5. Изучение возможностей диагностики по потокам нейтральных атомов для определения изотопного состава топлива будущих термоядерных реакторов.

#### Апробация работы и публикации.

Результаты, вошедшие в диссертацию, представлены в 5 докладах на международных конференциях, опубликованы в 6 статьях в реферируемых журналах, а также в виде препринтов. Кроме того материалы, вошедшие в диссертацию, представлялись на совместном симпозиуме, проводимом Калэмским научным центром (Великобритания) и ФТИ им.А.Ф.Иоффе.

#### Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем работы составляет 137 страниц печатного текста, в том числе: 56 рисунков, 7 таблиц и список литературы, включающий 62 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко сформулированы актуальность и научная значимость темы, обоснована постановка задачи исследований и сформулирована их основная цель.

Первая глава посвящена подробному сравнительному анализу различных диагностических методов определения изотопного соотношения плазмы, как уже реализованных на практике в современных экспериментальных установках, так и существующих в качестве предложения.

Рассмотрены преимущества, недостатки и перспективы применения этих методов для измерения изотопного состава термоядерного топлива в будущем токамаке-реакторе.

В параграфе 1.1 описаны принципы спектроскопического метода определения изотопного состава, основанного на регистрации относительной интенсивности свечения Бальмеровских линий атомов изотопов водорода. Преимуществом метода является простая схема измерения, которую легко реализовать с помощью стандартного оборудования. Кроме того метод обладает высокой статистической надежностью. Однако, следует отметить, что спектроскопический метод не позволяет получать информацию об изотопном составе в центральной горячей области плазмы из-за теплового уширения спектральных линий, а также ионизации атомов. В результате источником свечения линий возбужденных атомов является только узкий граничный слой холодной плазмы. Поэтому в будущем токамаке-реакторе ИТЭР спектроскопию

в видимой области предполагается использовать для определения изотопного состава в диверторе и на периферии плазмы.

Параграф 1.2 посвящен методу, основанному на спектрометрии нейтронов, которые возникают при протекании  $d-d$  и  $d-t$  термоядерных реакций. К достоинствам нейтронной спектрометрии можно отнести прямую зависимость измеряемого сигнала от величины изотопного соотношения  $n_D/n_T$ . Применение многохордовой схемы наблюдения позволяет восстанавливать распределение плотности изотопов по всей плазме, включая центральную зону. Недостатками этого метода можно считать сложность и высокую стоимость технической реализации и эксплуатации диагностики. Кроме того, предварительный расчет спектров нейтронного излучения на ИТЭРе показывает, что из-за малой скорости реакции  $d-d$  синтеза, поток DD нейтронов на энергии их рождения будет иметь ту же интенсивность, что и тормозной спектр высокоэнергичных DT нейтронов. Это может создать трудности при выделении сигнала DD нейтронов из-за ожидаемых значительных статистических ошибок измерения.

В следующих двух параграфах обсуждаются перспективные диагностические методы, использующие особенности взаимодействия электромагнитного излучения с многокомпонентной плазмой.

В параграфе 1.3 рассмотрен метод диагностики коллективного томсоновского рассеяния. Отмечены широкие возможности метода, благодаря его чувствительности к локальным флуктуациям электронной плотности. Относительно недавно метод был предложен для определения изотопного состава. Для этого предлагается использовать локальное рассеяние микроволнового излучения от ионных Бернштейновских колебаний. Для многокомпонентной плазмы спектр рассеяния при этом состоит из нескольких гармоник, по относительной интенсивности которых, можно судить об изотопном составе плазмы. Значительным достоинством метода является то, что его реализация не требует вакуумного доступа в установку. К принципиальным трудностям относятся проблемы неразличимости ионов с одинаковым отношением заряда к массе, проблемы детектирования слабого рассеянного излучения и его отделения от значительного сигнала электрон-циклотронного излучения.

Физические принципы ион-ионной рефлектометрии изложены в параграфе 1.4. Идея этого, относительно нового, метода основана на свойстве электромагнитных волн определенной частоты отражаться от слоя плазмы с соответствующим этой частоте изотопным соотношением [4]. Измеряя время, необходимое волне для того, чтобы распространиться до слоя отражения и обратно до приемной антенны, можно определить координаты слоя. К достоинствам данной диагностики следует отнести локальность измерений и высокое временное разрешение, а также простоту идеи и реализации, особенно в случае запуска зондирующей волны с внешней стороны токамака.

Сканирование частотой пробной волны позволяет оперативно получать данные о пространственном распределении изотопного отношения в плазме. Недостатками метода является косвенный характер измерений, зависимость от надежности теоретической модели распространения электромагнитной волны в горячей плазме. А в применении к термоядерному реактору ИТЭР - принципиальная неразличимость ионов с одинаковым отношением заряда к массе  $Z/A$  и как следствие неспособность с его помощью отличить дейтерий от гелиевой золы.

В параграфе 1.5 рассмотрен метод диагностики по нейтральным атомам. Принцип ее заключается в следующем. В составе любой водородной или гелиевой плазмы помимо заряженных частиц (электронов и ионов) имеются также нейтральные и не полностью ионизованные атомы. Благодаря процессам захвата при электрон-ионных столкновениях (рекомбинация) и при ион-ионных столкновениях (перезарядка) в любой плазме появляются атомы, которые сохраняют величину и направление движения тех ионов, из которых они образовались. Интенсивность потока этих атомов пропорциональна плотности соответствующих ионов до нейтрализации. В случае многокомпонентной плазмы измерение соотношения потоков атомов  $H^0/D^0/T^0$  может быть использовано для определения изотопного состава плазмы. Для этого необходимо по полученным в эксперименте энергетическим спектрам атомов перезарядки определить функции распределения ионов. Затем, используя вид этих распределений и учитывая прозрачность плазмы, можно по отношению потоков атомов определить соотношение плотности ионов для центральной области плазмы или, если это требуется, найти распределение этой величины по сечению плазменного шнура. С точки зрения измерения изотопного состава термоядерного топлива  $n_D/n_T$ , несомненным достоинством данного метода является «чистый» сигнал дейтерия. То есть в нем нет вклада от частиц гелия, которые присутствуют в термоядерной плазме как продукт  $d-t$  реакции синтеза и обладают тем же отношением заряда к массе  $Z/A$ , что и дейтерий. При реализации метода на термоядерном реакторе его недостатком являются высокие затраты при обеспечении вакуумного тракта, соединяющего прибор с главной камерой реактора. Как следствие этого, измерения предполагается проводить вдоль одной линии видимости, что потребует привлечения дополнительных данных о распределении плотности и особенно температуры ионов, для интерпретации результатов диагностики.

Проведенный сравнительный анализ позволяет сделать вывод о том, что диагностика по потокам атомов является одним из основных методов определения изотопного состава плазмы. Главным достоинством метода является то, что он обеспечивает прямое измерение самих частиц, определяющих изотопное соотношение в плазме. Выделяются две ключевые проблемы, с которыми в первую очередь связано развитие метода в настоящее время и которые требуют дальнейшего экспериментального исследования:

математическая обработка результатов измерений потоков атомных частиц, образующихся на многокомпонентной, пространственно-неоднородной мишени и обеспечение эксплуатации аппаратуры в условиях высокого радиационного фона. Их успешное решение даст возможность усовершенствовать диагностическую аппаратуру, повысить надежность измерений и использовать диагностику уже в условиях термоядерного реактора.

Во второй главе представлены результаты разработки и калибровки атомного анализатора частиц Ion SEPARATOR (ISEP) [1]. Целью при его проектировании являлось создание прибора способного измерять потоки атомов всех трех изотопов водорода в тепловом диапазоне энергий при нейтронном потоке в месте установки анализатора до  $10^9$  нейтронов/см<sup>2</sup>/с. Для

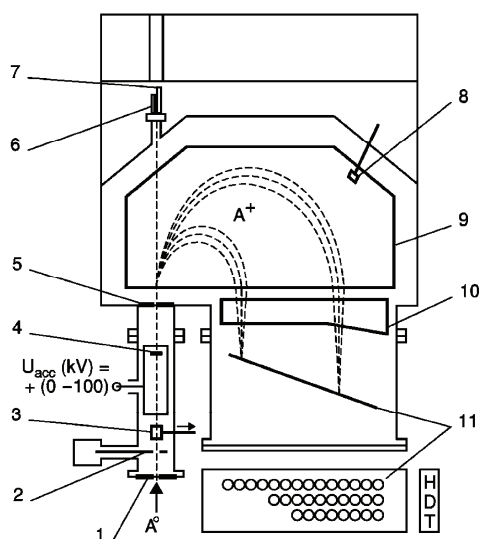


Рис.1. Схема устройства анализатора ISEP. 1 – входная диафрагма; 2 – механизм сменяемых диафрагм; 3 – вспомогательный калибровочный детектор; 4 – обдирочная пленка; 5 – выходная диафрагма; 6 – светодиод; 7 – юстировочный лазер; 8 – датчик Холла; 9 – электромагнит; 10 – электростатический дефлектор; 11 – фланец с 32-мя детекторами

выполнения этого требования было решено уменьшить нейтронный фон, с одной стороны, а с другой - увеличить полезный сигнал. Поэтому были применены малочувствительные к радиационному излучению сцинтилляционные детекторы, а также увеличены угол сбора прибора и эффективность регистрации ионов, образующихся в анализаторе из атомов, испускаемых плазмой. Так как примененные детекторы позволяли уверенно регистрировать частицы с энергией более 100 кэВ, то для увеличения полезного сигнала при регистрации частиц с меньшей энергией было использовано дополнительное

ускорение регистрируемых частиц в приборе. Это также позволило расширить энергетический диапазон анализатора. Увеличения угла сбора и высокой эффективности регистрации удалось добиться благодаря применению оптимизированной диспергирующей системы анализатора, фокусирующей пучок частиц в двух плоскостях. В первых двух параграфах изложены отличительные особенности и рассмотрены устройство и принцип работы прибора и его детекторной системы. Анализатор ISEP построен по общей схеме, характерной для приборов такого типа (Рис.1). Входящие атомы обдираются в тонкой углеродной пленке 4 толщиной  $100\text{\AA}$ , установленной внутри доускорителя и находящейся под потенциалом (0-100кВ). Образовавшиеся ускоренные ионы проходят через параллельные поля электромагнита 9 и электростатического дефлектора 10, где



происходит их разделения по массе и энергии. В анализаторе ISEP установлено 32 детектора, каждый из которых оснащен предусилителем и аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Сам детектор состоит из CsI(Tl) сцинтиллятора, напыленного на тонкое (0.5 мм) кварцевое стекло, которое при помощи оптического клея прикреплено к входному окну фото-электронного умножителя (ФЭУ). Толщина сцинтиллятора меняется в зависимости от номера канала анализатора в пределах от 1 до 7 микрон. Толщина подбиралась с таким расчетом, чтобы ее хватало для полного поглощения частиц с максимально возможной для данного канала энергией. Такой подход обеспечивает высокую эффективность регистрации частиц при наименьшей чувствительности к нейтронному и гамма излучениям. Чтобы устранить влияние рассеянных магнитных полей на работу детекторов, каждый ФЭУ помещен в индивидуальный многослойный магнитный экран, внутренний слой которого изготовлен из пермаллоя.

В параграфе 2.3 описано численное моделирование параметров анализатора, которое сыграло ключевую роль в процессе проектирования и калибровки анализатора ISEP. Для обеспечения высокой светосилы в приборе используются неоднородные магнитные и электрические поля. Расчет их конфигурации невозможен без применения современных численных методов. Не менее важным аспектом, обуславливающим необходимость создания численной модели анализатора, явились ограничения, связанные с калибровкой прибора, поскольку проведение калибровочного эксперимента для всех изотопов водорода с энергиями до нескольких сотен килоэлектронвольт осложнено труднодоступностью трития и возникающим в процессе работы калибровочного стенда радиационным излучением, вызванного ядерными  $d-d$  и  $d-t$  реакциями синтеза, для защиты от которого требуется специальное оборудование. Для получения калибровочных данных в полном объеме было решено использовать численную модель прибора, детально описывающую все процессы, происходящие с атомами в приборе, а именно: обдирку атомов, потери и разброс их энергии (страгглинг) при прохождении углеродной пленки толщиной  $100\text{\AA}$ ; угловое рассеяние образующихся ионов на выходе из пленки [2]; фокусировку этих ионов в доускоряющем промежутке; транспортировку и дисперсию пучка частиц в диспергирующей системе анализатора. В серии калибровочных экспериментов предусматривалась проверка применимости численной модели для атомов водорода и дейтерия с энергиями до 30 кэВ. Затем с ее помощью характеристики анализатора экстраполировались для атомов трития и в область высоких энергий.

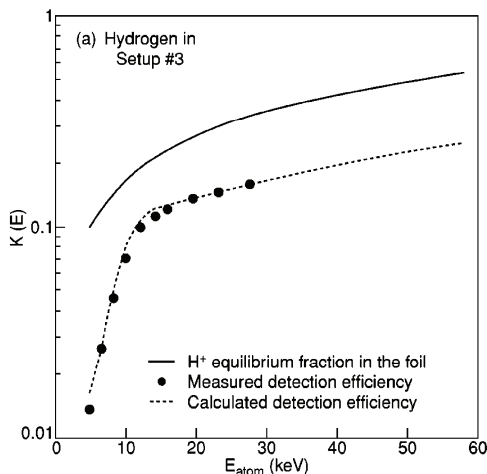


Рис.2. Измерение и численное моделирование эффективности регистрации анализатором ISEP атомов водорода. Пунктирной линией показаны расчетные данные, точками - результаты калибровки прибора.

из средней энергии  $E$ , ширины канала  $\Delta E$  и эффективности регистрации  $\alpha$ . Энергетический диапазон измерения спектра нейтральных частиц составил: 5-740 кэВ для водорода, 5-370 кэВ для дейтерия и 5-250 кэВ для атомов трития. Также в ходе калибровочных экспериментов было установлено, что коэффициент паразитного проникновения атомов соседних масс составляет величину не хуже  $10^{-3}$ , а чувствительность детекторов к нейтронному и гамма фону не превышает  $10^{-7}$  отсчетов/нейтрон.

В условиях повышенного радиационного фона, перечисленные свойства анализатора обеспечивают отношение сигнал/шум не хуже 100, что позволяет проводить измерения изотопного соотношения в широком диапазоне значений (от 1 до 99 %).

В третьей главе рассмотрено численное моделирование потоков атомов изотопов водорода в области тепловых энергий. Необходимость численного моделирования обусловлена большим разнообразием атомных процессов нейтрализации ионов в плазме, приводящих к образованию потока атомных частиц, выходящего из плазмы. А также необходимостью учета пространственной неоднородности плотности частиц плазмы, на которых эта нейтрализация происходит.

В параграфе 3.1 описаны механизмы образования тепловых потоков нейтральных частиц. Для корректного описания процесса образования потока нейтральных частиц, необходимо учитывать многочисленные атомные процессы, влияющие на формирование нейтрализационной мишени. К числу таких процессов относятся проникновение в плазму пристеночной нейтральной,

В параграфе 2.4 изложены результаты проверки основных характеристик прибора в калибровочных экспериментах. Калибровка была проведена с использованием водородного и дейтериевого пучков, в диапазоне энергии от 5 до 27 кэВ. Эти результаты сравнивались с данными расчета (Рис.2), после чего был сделан вывод о том, что численная модель с высокой точностью описывает все экспериментальные результаты как для атомов водорода так и для атомов дейтерия, причем полученные в самом сложном для интерпретации диапазоне низких энергий и для различных значений доускоряющего напряжения. Совместное применение калибровочного эксперимента и численной модели позволило создать полный набор характеристик анализатора, состоящий

радиационная рекомбинация, проникновение в плазму нейтрального пучка и образование нейтрального и ионного гало при его инъекции [3,4]. В образовании мишени могут участвовать как частицы основной плазмы, так и примеси, роль которых возрастает при росте температуры плазмы.

В параграфе 3.2. дано описание программы моделирования тепловых потоков методом Монте-Карло - DOUBLE-MC. Метод Монте-Карло был выбран из-за простоты его реализации, широких возможностей по включению разнообразных процессов, определяющих образование потоков атомов, а также удобства при дополнении и включении в алгоритм вычисления новых процессов или сортов частиц. Программный код позволяет моделировать потоки нейтральных частиц, испускаемых многокомпонентной, состоящей из смеси нескольких изотопов водорода и гелия, плазмой. Кроме основных компонентов при расчете учитывается вклад малого количества примесей бериллия и углерода, которые попадают в плазму с поверхности внутренней облицовки камеры. В программу включены более двух десятков атомных процессов, сопровождающих образование нейтронизационной мишени. Учитывается реальная структура магнитного поля, а траектории частиц в плазме рассчитываются в трехмерной геометрии, что важно при расчете распространения ионного гало пучка. Для моделирования пространственного распределения частиц мишени при газонапуске в программу заложена возможность задания неоднородных условий на границе плазмы. Большое внимание уделено процессу проникновения в плазму нейтрального нагревного или диагностического пучка, так как создаваемая им мишень является сильно неоднородной. Точный расчет локальной плотности самого пучка, нейтрального и ионного гало позволяет использовать нагревные пучки в качестве диагностического инструмента для определения локальных характеристик плазмы [4].

В четвертой главе представлены результаты исследования потоков атомов изотопов водорода в экспериментах с применением анализатора ISEP на установке JET (Великобритания).

Анализатор был расположен в горизонтальной плоскости тора токамака, перпендикулярно к поверхности плазмы. Расстояние от анализатора до центра плазмы составляло 9.5 метров, а высота от средней плоскости токамака - 0.28 м. Диафрагма, установленная в начале вакуумного тракта, соединяющего камеру токамака с прибором, и входная диафрагма анализатора определяли величину  $\omega S = 5.2 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>·стер, характеризующую светосилу прибора. Максимальная величина рассеянного магнитного поля в месте установки анализатора не превышала 35 Гс при любых сценариях плазменного разряда. Никакой дополнительной магнитной защиты анализатора, кроме собственной локальной защиты детекторов, не применялось. Проверочные тесты подтвердили отсутствие влияния магнитного поля токамака на работу прибора.

В параграфе 4.1 представлены результаты экспериментов по измерению изотопного соотношения водорода и дейтерия в омическом режиме плазменного разряда и в плазме с дополнительным нагревом нейтральным пучком. Для того, чтобы извлечь из данных эксперимента изотопное соотношение плазмы, полученные экспериментальные результаты были обработаны с помощью программы численного моделирования потоков нейтральных частиц DOUBLE-MS. При этом были сделаны следующие предположения: а) считалось, что функция распределения ионов плазмы по энергии является максвелловской; б) распределение ионной температуры по радиусу одинаково для обоих ионных компонентов; в) форма пространственного распределения температуры для ионов такая же, что и у электронов. Варьирование относительных плотностей ионов, используемых при численном моделировании, позволило определить величину изотопного соотношения при омическом нагреве плазмы. В центральной ( $0 \leq r/a \leq 0.5$ ) зоне плазмы соотношение составило  $n_H/n_D=0.07$ . Аналогичным способом были обработаны данные, полученные при дополнительном нагреве плазмы мощным пучком нейтрального дейтерия с энергией  $E=80$  кэВ. Основной чертой этих измерений стало искажение высокоэнергичными ионами пучка максвелловского спектра теплового дейтерия в области высоких энергий. В результате сужается пригодный для обработки диапазон энергий. Это приводит к смещению зоны определения изотопного соотношения из центральной области наружу, ближе к границе плазмы. В результате анализа получена величина изотопного соотношения  $n_H/n_D=0.1$  и определена характерная область его измерения ( $0.7 \leq r/a \leq 1$ ).

В параграфе 4.2 приведены результаты измерения потоков быстрых атомов, возникающих во время ионно-циклотронного (ИЦР) нагрева дейтериевой плазмы на малой добавке водорода. Во время плазменного разряда проводился комбинированный нагрев дейтериевой плазмы с помощью пучка нейтрального дейтерия мощностью  $P_{NBI}=7.6$  МВт и ИЦР-нагрева малой добавки водорода  $P_{ICRH}=7$  МВт. Условия эксперимента были подобраны таким образом, что в плазме происходил ИЦР нагрев как ионов добавки (водорода), так и ионов дейтерия от быстрого ( $E_{NBI}=140$ кэВ) пучка. Таким образом, благодаря уникальным возможностям анализатора ISEP, удалось сделать одновременное измерение надтепловых компонентов обоих изотопов водорода. Эти данные особо ценны при изучении физики ИЦР-нагрева, для проверки теоретических моделей одновременного нагрева нескольких компонентов плазмы.

В параграфе 4.3 изложены результаты изучения переноса ионов трития в экспериментах с напуском тритиевого газа в дейтериевую плазму. Экспериментальное исследование переноса ионов в плазме представляет собой довольно сложную задачу. Это связано с тем, что анализ стационарного распределения плотности ионов по радиусу не позволяет разделить диффузную

и конвективную составляющие потока частиц внутри плазмы. Обычно это затруднение преодолевается путем применения метода малого возмущения /5/, при котором на границе или в глубине плазмы создается небольшое возмущение плотности. Наблюдая за последующей эволюцией возмущения в пространстве и во времени, можно разделить транспортные составляющие и измерить локальные коэффициенты переноса частиц. Наиболее перспективными с точки зрения исследования переноса основных ионных компонентов плазмы будущего термоядерного реактора являются эксперименты с напуском малого количества трития (~ 1% от плотности плазмы) в дейтериевую плазму. В частности, в работе /6/ была продемонстрирована принципиальная возможность определения радиального распределения плотности ионов малой добавки по форме энергетического спектра атомов, излучаемых плазмой.

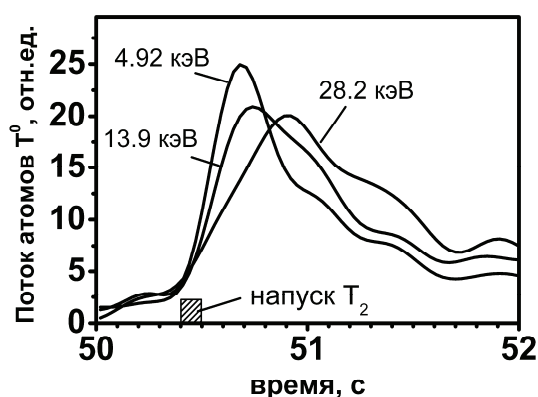


Рис 3. Временная эволюция потоков атомов трития различных энергий после импульсного газового напуска трития в плазму.

В серии экспериментов на установке JET по напуску тритиевого газа в дейтериевую плазму с оптимизированным градиентом магнитного поля анализатором ISEP одновременно были измерены потоки атомов дейтерия и трития [5]. Мощность нейтральной инжекции составляла  $P_{NBI} \sim 15$  МВт, высокочастотная мощность  $P_{ICRH} \sim 2$  МВт, а полный выход нейтронов  $R_{dt+dd} \sim 5 \times 10^{16}$  нейтронов/с. Несмотря на высокий нейтронный фон, благодаря системе амплитудного анализа, используемой в тракте регистрации анализатора, удалось надежно выделить сигнал частиц из шума. Впервые в такого рода эксперименте удалось обнаружить зависимость скорости нарастания потоков атомов трития от их энергии (Рис.3). Слишком медленный временной ход обнаруженного эффекта невозможно объяснить прогревом ионов трития. Поэтому было сделано предположение, что наблюдаемая зависимость обусловлена процессом переноса трития внутрь плазмы. Для восстановления из экспериментальных данных временного поведения профиля плотности ионов трития в плазме был применен программный код DOUBLE-MS. Чтобы исключить из моделирования влияние источника трития, был выбран интервал времени после выключения газового напуска, когда наблюдалось падение потоков атомов трития. Для количественной оценки процесса переноса ионов трития от края плазмы к ее центру была использована упрощенная математическая модель, в которой радиальный поток ионов трития в плазме определяется диффузией и конвекцией, направленной к центру плазмы, и описывается уравнением:

$$\Gamma = -D \frac{\partial n}{\partial r} + Vn$$

где  $\Gamma$  – поток ионов,  $n$  – плотность ионов,  $D$  – коэффициент диффузии,  $V$  – скорость конвективного переноса. Транспортные коэффициенты  $D$  и  $V$  предполагались постоянными по радиусу плазмы. Наилучшее соответствие модельных и восстановленных профилей плотности трития было получено для следующих значений транспортных коэффициентов  $V = -0.5$  м/с, а  $D = 0.1$  м<sup>2</sup>/с, что близко к неоклассическим величинам этого параметра. Следует отметить, что значение коэффициента диффузии довольно хорошо согласуется с результатами предыдущих исследований транспорта ионов в плазме, полученные в водородных разрядах с большим газовым напуском дейтерия /6/.

Пятая глава посвящена перспективам диагностики по потокам атомов перезарядки для определения изотопного состава топлива на будущих термоядерных реакторах. Во вступлении дано краткое описание токамака-реактора ИТЭР. Описаны технические требования, сформулированные Центральной Командой ИТЭРа, к измерению топливного соотношения  $n_D/n_T$ , которые должна обеспечить диагностика, ответственная за измерение этого параметра.

В параграфе 5.1 представлены результаты оценки возможностей диагностики по потоку атомов по измерению изотопного соотношения на ИТЭРе [6,7,8,9]. Опыт создания и применения анализатора ISEP на установке JET показывает, что многие проблемы, осложняющие эксплуатацию оборудования на ИТЭРе (высокий нейтронный фон, рассеянное магнитное поле) будут успешно решены. Ключевым вопросом является наличие достаточного уровня сигнала. Для оценки сигнала был использован тот же подход, что и при моделировании изотопного соотношения на установке JET. Численное моделирование проводилось для режима стационарного горения /7/, в котором предполагаются следующие параметры плазмы:  $n_e(0) = 7 \times 10^{19}$  м<sup>-3</sup>,  $T_i(0) = 33$ кэВ, мощность дополнительной нейтральной инжекции  $P_{NBI} = 30$ МВт. В качестве прибора использовался, разработанный в ФТИ, проект анализатора LENRA. Расчеты показали, что в диапазоне энергий примерно до 120кэВ тепловой спектр не должен быть возмущен быстрыми частицами, а шум, вызываемый радиационным фоном, не существен. Эта часть спектра пригодна для измерения изотопного соотношения, причем ожидаемая скорость счета в каналах анализатора превышает 1 кГц. Это означает, что если задать временное окно, соответствующее требуемому временному разрешению 0.1с, то статистическая ошибка измерения потока при этом меньше 10%. Таким образом, проектируемый анализатор LENRA способен удовлетворить требованиям ИТЭРа по измерению изотопного состава.

В параграфе 5.2 исследуется каким должен стать прибор для управления изотопным составом топлива в первом Европейском промышленном реакторе

DEMO /8/. Моделирование нейтральных потоков [10] показало, что наиболее перспективным для измерений является диапазон высоких энергий атомов, который должен быть заселен частицами топлива, ускоренных в результате лобовых соударений с альфа-частицами. Как показывают предварительные расчеты, энергетический спектр атомов в этой области энергий достаточно монотонен и не имеет особенностей. Поэтому для увеличения чувствительности метода можно будет отказаться от подробного энергетического анализа путем применения аппаратного интегратора, который будет суммировать все частицы одной массы в достаточно широком диапазоне энергий. Такой подход позволит создать более простой, надежный и чувствительный прибор. Для подобного прибора было проведено исследование зависимости динамического диапазона измерения изотопного состава от температуры плазмы. При рабочей температуры DEMO > 30 кэВ, такой прибор сможет обеспечить измерение изотопного состава в центре плазмы в интервале  $0.05 < n_T/(n_D+n_T) < 0.99$ .

В Заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Проведены разработка, изготовление и абсолютная калибровка атомного анализатора ISEP, предназначенного для одновременного измерения потоков и энергетических спектров атомов всех изотопов водорода - H, D, T в диапазоне энергий 5 – 700 кэВ. Достигнутые параметры прибора обеспечивают измерение по потокам атомов из плазмы изотопного соотношения в плазме с точностью не хуже 1% в условиях радиационного фона до  $10^9$  нейтронов/см<sup>2</sup>с.

2. Создана программа численного моделирования на основе метода Монте-Карло (DOUBLE-MC), позволяющая восстанавливать изотопное соотношение ионов по потокам атомов перезарядки в многокомпонентной (H, D, T, He) плазме.

3. С помощью анализатора ISEP проведены измерения потоков атомов водорода и дейтерия на крупнейшем токамаке JET (Великобритания) для различных режимов нагрева плазмы (омический нагрев, нейтральная инжекция, ИЦР нагрев). Выполнено численное моделирование потоков атомов и определены величины изотопного соотношения ионного компонента плазмы.

4. В экспериментах с напуском тритиевого газа в дейтериевую плазму на установке JET обнаружен эффект увеличения времени нарастания потоков атомов трития с ростом их энергии. Эффект проанализирован в рамках диффузионно-конвективной модели и определены коэффициент поперечной диффузии ( $D = 0.1$  м<sup>2</sup>/с) и скорость переноса ионов трития внутрь плазмы ( $V=0.5$  м/с).

5. Проведен анализ перспективности применения диагностики по потокам атомов из плазмы в тепловом диапазоне энергий для определения изотопного состава термоядерного топлива. Показано, что для условий сооружаемого международного токамака-реактора ИТЭР эта диагностика

обеспечивает измерение изотопного состава во внешней области плазмы ( $r/a > 0.4$ ) с точностью 10% и временным разрешением 0.1с.

Результаты работы представляют интерес для разработки и применения экспериментальной аппаратуры и методов диагностики изотопного состава горячей водородной плазмы, которые планируется использовать в диагностическом комплексе будущего токамака-реактора.

Цитируемая литература:

- /1/ ITER Physics Basis // Nuclear Fusion 1999. V.39 P. 2137-2638
- /2/ ITER Design Description Document: Overview of ITER diagnostic system // (N 55 DDD 12W0.1) July 2004.
- /3/ Афросимов В.В, Гладковский И.П., Гордеев Ю.С. и др. . Метод исследования потока атомов, испускаемых плазмой // ЖТФ. 1960. Т.30. Вып.12. Стр.1456.
- /4/ W Watson , W W Heidbrink , К H Burrell and G J Kramer, Plasma species mix diagnostic using ion-ion hybrid layer reflectometry // Plasma Phys. Control. Fusion 2004. V. 46 P. 471-487
- /5/ N J Lopes Cardozo, J C M de Haas, G M D Hogeweij, J O'Rourke, A C C Sips and B J D Tubbing. Tokamak transport studies using perturbation analysis // Plasma Phys.Contr.Fus. 1990 32, P.983-998.
- /6/ V.I. Afanasyev, A. Gondhalekar, and 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 preprint, JET-R(00)04, 2004.
- /7/ ITER Technical Basis, ITER Engineering Design Activities Documentation Series No. 24 IAEA, Vienna 2002 (<http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/ITER-EDA-DS-24.pdf>)
- /8/ European Power Plant Conceptual Study, [http://www.efda.org/eu\\_fusion\\_programme/downloads/scientific\\_and\\_technical\\_publications/PPCS\\_overall\\_report\\_final.pdf](http://www.efda.org/eu_fusion_programme/downloads/scientific_and_technical_publications/PPCS_overall_report_final.pdf)



Список публикаций по теме диссертации:

- [1] V.I. Afanasyev, A. Gondhalekar, P.Yu. Babenko, P. Beaumont, P. De Antonis, A.V. Detch, A.I. Kislyakov, S.S. Kozlovskij, M.I. Mironov, M.P. Petrov, S.Ya. Petrov, F.V. Tschernyshev, C.H. Wilson, J. Paméla. Neutral particle analyzer/isotope separator for measurement of hydrogen isotope composition of JET plasmas // Rev. Sci. Instrum. 2003. V. 74. P. 2338-2352
- [2] П.Ю. Бабенко, С.С. Козловский, В.И. Афанасьев, М.И. Миронов, С.Я. Петров, А.В. Худолеев, Ф.В. Чернышев. Угловые распределения ионов легких элементов после прохождения тонкой углеродной пленки. // ПЖТФ 2001. т. 27. вып. 19, стр. 44-48
- [3] A.V. Khudoleev, V.I. Afanassiev and M.I. Mironov, *He<sup>+</sup> Halo Formation during Neutral Beam Injection into Magnetically Confined Plasma*, 23d EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, vol. 20C(III), 1996, pp. 1039-1042.
- [4] Миронов М.И., Худолеев А.В., Й. Кусама. Формирование мишени для перезарядки быстрых ионов в плазме больших установок при нейтральной инжекции // Физика плазмы, 2004, V.30, No.2, P.185-189
- [5] M.Mironov, V.Afanasyev, A.Murari, M.Santala, P. Beaumont and JET-EFDA contributors. Tritium transport studies with use of ISEP NPA during tritium trace experimental campaign on JET. // Plasma Phys. Control. Fusion 52 (2010) 105008
- [6] 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. Всероссийская конференция «ДВП-12», г. Звенигород, 3-8 июня 2007 г
- [7] В.И.Афанасьев, А.И.Кисляков, С.С.Козловский, В.М.Леонов, Б.В.Люблин, А.Д.Мельник, М.И.Миронов, В.Г.Несеневич, М.П.Петров, С.Я.Петров, Ф.В. Чернышев. Возможности диагностики по анализу нейтральных атомов на установке ИТЭР и перспективы ее развития. 37-я Международная конференция по физике плазмы и УТС, Звенигород, 8 – 12 февраля 2010 г
- [8] 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 in Physics Research, A 621 (2010) 456–467
- [9] 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, 2010, т 36, № 5, с. 440-446
- [10] 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, 177-184