

На правах рукописи

Несеневич Владислав Георгиевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ  
ДИАГНОСТИКИ ПО ПОТОКАМ АТОМОВ ИЗ ПЛАЗМЫ  
В ТЕРМОЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ ИТЭР

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2016

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

**Научный руководитель:**

кандидат физ.-мат. наук, с. н. с.

**Миронов** Максим Игоревич

**Официальные оппоненты:**

доктор физ.-мат. наук,

заместитель начальника отдела ИТЭР

блока термоядерных исследований КЯТК НИЦ “Курчатовский институт”

**Вуколов** Константин Юрьевич

(НИЦ “Курчатовский институт”, Москва)

кандидат физ.-мат. наук,

начальник лаборатории проблем физики токамаков

отделения физики токамаков-реакторов АО “ГНЦ РФ ТРИНИТИ”

**Кашук** Юрий Анатольевич

(АО “ГНЦ РФ ТРИНИТИ”, Троицк)

**Ведущая организация:**

АО “НИИЭФА им. Д. В. Ефремова”

Защита состоится \_\_\_ \_\_\_\_\_ 201\_ г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 002.205.03 при ФТИ им. А. Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

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

Автореферат разослан < \_\_\_ > \_\_\_\_\_ 201\_ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.205.03,

кандидат физ.-мат. наук

\_\_\_\_\_ А. М. Красильщиков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

В 2010 году во Франции начато сооружение экспериментального термоядерного токамака-реактора ИТЭР. На этой плазменной установке впервые должен быть получен положительный выход энергии в условиях длительного горения разряда: термоядерная мощность должна в 10 раз превысить мощность, затрачиваемую на нагрев плазмы, при продолжительности разряда ~ 500 секунд. ИТЭР – экспериментальный реактор, основное назначение которого заключается в изучении плазмы, находящейся в состоянии, максимально приближенном к условиям промышленной термоядерной станции. Его работа будет поддерживаться диагностическим комплексом, включающим в себя около 45 различных систем. Главными задачами диагностических систем на ИТЭР являются защита реактора от аварий, а также измерение основных параметров плазмы с целью контроля режима работы установки. Для решения этих задач сформулирован перечень параметров плазмы [1], измерение которых возложено на приоритетную группу диагностик, включающую 10 – 15 систем. Остальные диагностики предназначены для детального изучения физических процессов, происходящих в плазме реактора, с целью оптимизации его устойчивой работы.

Комплекс диагностики по потокам атомов [2] входит в упомянутую выше приоритетную группу диагностических систем ИТЭР. Основное назначение данной диагностики заключается в измерении соотношения плотностей составляющих термоядерное топливо ионов дейтерия и трития в центральной области плазмы. Контроль изотопного состава топлива необходим для поддержания оптимального режима работы реактора.

Диагностика по потокам атомов основана на регистрации атомов, возникающих при захвате ионами плазмы электронов в результате перезарядки или фоторекомбинации. При обработке диагностических данных энергетические функции распределения атомов пересчитываются в функции распределения ионов внутри плазмы. Таким образом, уникальная особенность диагностики заключается в возможности регистрации частиц, непосредственно составляющих термоядерное топливо. Определение изотопного состава топлива производится по соотношению измеряемых потоков атомов.

Данный диагностический метод и применяемая для него аппаратура (анализаторы атомных частиц) были разработаны в ФТИ им. А.Ф. Иоффе и в последние десятилетия широко применялись в исследованиях высокотемпературной плазмы [3]. Проектирование соответствующей диагностической системы для международного токамака-реактора ИТЭР также было поручено ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Необходимость создания новых приборов оказалась обусловлена особенностями работы в условиях мощной термоядерной установки. Наличие высокого нейтронного фона и сопутствующего гамма-излучения накладывает особые требования к применяемой аппаратуре. Во-первых, для обеспечения долговременной стабильной работы она должна обладать высокой радиационной стойкостью. Следует предусмотреть возможность контроля состояния и оперативной дистанционной замены наиболее критических элементов аппаратуры, непосредственно влияющих на её работу, в случае выхода их из строя. Во-вторых, необходимо учитывать, что излучение плазмы вызовет появление фона в детекторах атомных анализаторов, что может существенно затруднить экспериментальные измерения и выделение полезного сигнала. Это значит, что детекторы, осуществляющие регистрацию потока частиц, должны обладать малой чувствительностью к нейтронному и гамма-излучению.

Помимо фонового излучения плазмы ИТЭР, на измерения атомных анализаторов может повлиять инжекция мощных нейтральных пучков атомов дейтерия и водорода, которая приведет к появлению в плазме группы высокоэнергичных замедляющихся ионов. Следствием этого станет искажение энергетических функций распределения основных ионов плазмы, а также соответствующих им спектров атомов, излучаемых из плазменного объема. Это явление, осложняющее определение изотопного состава топлива, необходимо учитывать для корректного измерения соотношения плотностей топливных ионов с помощью диагностики по потокам атомов.

Одновременно с проектированием приборов были начаты исследования по расширению возможностей диагностики по потокам атомов при работе в режиме горения дейтерий-третиевой плазмы. Одно из направлений этих исследований связано с использованием диагностики как инструмента для изучения удержания альфа-частиц, возникающих в результате протекания термоядерной реакции. Следует учитывать, что методов прямого измерения функции распределения альфа-частиц и времени их удержания в плазме ИТЭР

в настоящее время не существует. В то же время, именно эффективное удержание альфа-частиц и передача их энергии электронам и ионам плазмы должны обеспечить самоподдерживающееся горение разряда в термоядерных установках будущих поколений. Поэтому получение любой, даже косвенной экспериментальной информации о поведении альфа-частиц в плазме ИТЭР представляется весьма актуальным.

Другая возможность применения диагностики по потокам атомов на ИТЭР связана с изучением эффективности инъекции топливных пеллет – макрочастиц, представляющих собой замороженную газовую смесь дейтерия и трития. Предполагается, что инъекция пеллет станет основным способом снабжения термоядерным топливом центральной области плазмы ИТЭР. Данный процесс будет сопровождаться изменением потоков атомов, излучаемых плазмой и регистрируемых с помощью диагностического оборудования. Сравнение полученных экспериментальных данных с результатами численных расчетов даст информацию о величине дрейфа испарившегося вещества пеллет в направлении большого радиуса плазмы.

Ниже перечислены основные **цели работы**:

- разработка и испытание критических элементов системы диагностики по потокам атомов, определяющих ее работоспособность в условиях термоядерного реактора ИТЭР;
- изучение возможности использования диагностики по потокам атомов для определения эффективности удержания альфа-частиц в плазме ИТЭР;
- исследование влияния инъекции нейтральных пучков атомов дейтерия и водорода в рабочих сценариях ИТЭР на измерение изотопного соотношения топливных ионов с помощью диагностики по потокам атомов;
- исследование особенностей применения диагностики по потокам атомов при инъекции в плазму топливных пеллет.

**Научная новизна работы** заключается в том, что: 1) проведены экспериментальные исследования и испытания наиболее критических элементов системы диагностики по потокам атомов для токамака-реактора ИТЭР; 2) предложен новый метод оценки эффективности удержания термоядерных альфа-частиц в плазме ИТЭР; 3) показано, что изменения

потоков атомов, вызванные инъекцией топливных пеллет в плазму ИТЭР со стороны сильного магнитного поля, могут быть зарегистрированы, а временной анализ этих изменений позволяет судить о степени влияния дрейфа на проникновение вещества пеллет в плазму.

**Достоверность** теоретической части работы обеспечена применением программных кодов, описанных в научных публикациях и верифицированных в экспериментах на крупных плазменных установках. Достоверность полученных экспериментальных данных обеспечена применением надежной аппаратуры и воспроизводимых методик исследования.

### **Практическая ценность работы**

Результаты экспериментальных работ использованы при проектировании элементов комплекса атомных анализаторов на токамаке ИТЭР. Метод оценки эффективности удержания альфа-частиц будет использован на ИТЭР при исследовании свойств дейтерий-третиевой плазмы, а также для оперативного контроля режима горения разряда. Результаты анализа влияния инъекции нейтральных пучков и топливных пеллет будут учтены при измерении изотопного соотношения топливных ионов с помощью диагностики по потокам атомов.

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

- Разработка и испытание критических элементов системы диагностики по потокам атомов для токамака-реактора ИТЭР: детекторов атомных анализаторов, системы контроля качества обдирочных мишеней, ускорительного модуля.
- Разработка методики определения эффективности удержания альфа-частиц в плазме ИТЭР по измерениям потоков нейтрализованных ионов отдачи мегаэлектронвольтового диапазона энергий.
- Определение диапазона энергий, доступного для измерения изотопного соотношения топливных ионов с помощью диагностики по потокам атомов в рабочих режимах ИТЭР, с учетом инъекции нейтральных нагревных и диагностического пучков.
- Анализ влияния инъекции топливных пеллет на потоки атомов дейтерия и трития, испускаемых плазмой ИТЭР.

## **Апробация работы и публикации**

Основные результаты работ, изложенные в диссертации, были представлены на 3 российских и 6 международных конференциях, опубликованы в 6 статьях в реферируемых журналах, а также доложены на совещании международной рабочей группы ИТЭР по физике токамаков.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 128 страниц, включая 68 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 73 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во введении обоснована актуальность темы диссертации и сформулированы цели исследований.

Первая глава представляет собой обзор методов измерения изотопного состава горячей плазмы. В обзор включены как традиционно применяемые способы (оптическая спектроскопия, диагностика по потокам атомов, нейтронная спектрометрия), так и новые методы, развивающиеся в последние годы (активная диагностика по альфвеновским модам, коллективное томсоновское рассеяние, ионная рефлектометрия). Рассмотрены преимущества и ограничения, присущие каждому методу, а также возможности и перспективы применения данных диагностик на токамаке ИТЭР.

Вторая глава посвящена описанию аппаратуры для анализа потока атомов на ИТЭР и экспериментальных работ, направленных на создание этой аппаратуры.

В разделе 2.1 описана конструкция атомных анализаторов LENPA и HENPA, являющихся основой комплекса диагностики по потокам атомов для ИТЭР [1]. Анализатор LENPA – Low Energy Neutral Particle Analyzer – предназначен для регистрации потоков атомов изотопов водорода с энергиями в тепловом диапазоне ITER – от 10 до 200 кэВ. Анализатор HENPA – High Energy Neutral Particle Analyzer – должен обеспечить проведение измерений в области надтепловых энергий от 0.13 до 1.5 МэВ для атомов трития и от 0.16 до 2.2 МэВ для атомов дейтерия. Объектом измерений этого прибора станут быстрые ионы, возникающие в результате дополнительного нагрева плазмы, а также так называемые ионы отдачи дейтерия и трития. Появление в дейтерий-

третичной плазме ионов отдачи обусловлено столкновениями тепловых ионов плазмы с быстрыми альфа-частицами, рождающимися в результате термоядерных реакций.

Принцип работы атомных анализаторов LENPA и HENPA основан на ионизации атомов, испускаемых плазмой, при их прохождении через тонкую углеродную пленку (обдирочную мишень) и последующем пространственном разделении пучка вторичных ионов по массе и энергии при движении в магнитном и электрическом полях. Приборы строятся по схеме  $E \parallel B$ , в которой электрическое поле направлено параллельно магнитному. Для повышения соотношения сигнал-фон при низких энергиях регистрируемых атомов используется электростатический ускоритель, устанавливаемый перед анализатором LENPA и сообщающий вторичным ионам дополнительную энергию величиной до 100 кэВ.

Раздел 2.2 посвящен описанию радиационных испытаний полупроводниковых и сцинтилляционных детекторов и их сравнению с точки зрения эффективности применения в детекторной системе анализаторов для ИТЭР [A1, A3]. Особенностью работы на токамаке ИТЭР является наличие интенсивного фона нейтронов и вторичного гамма-излучения. Поэтому для разделения полезного и фоновых сигналов необходимо использовать спектрометрические детекторы, имеющие высокую эффективность регистрации ионов и малую чувствительность к фоновому излучению.

По результатам радиационных испытаний в качестве детекторов атомных анализаторов LENPA и HENPA были выбраны сцинтилляционные детекторы на основе ФЭУ НАМАМАТСУ H8500D и тонких кристаллов CsI(Tl). Применение данных детекторов обеспечивает надежное выделение полезного сигнала при наличии фонового излучения плазмы, а сами детекторы имеют высокую радиационную стойкость: при потоке нейтронов до  $10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  продолжительность их стабильной работы на токамаке ИТЭР составит не менее 5 лет. Использование многоанодных ФЭУ матричного типа, какими являются ФЭУ НАМАМАТСУ H8500D, даёт возможность организовать независимую регистрацию ионов разных сортов с помощью одного детектора. Конструкция детекторной системы анализаторов описана в разделе 2.3.

В разделе 2.4 представлены эксперименты по разработке методики контроля параметров обдирочных мишеней анализаторов LENPA и HENPA [A2]. Обдирочные мишени, предназначенные для ионизации входящего



в анализаторы потока атомов, являются принципиально важными элементами приборов. Мишень представляет собой углеродную пленку толщиной порядка 100 ангстрем, нанесенную на мелкоструктурную медную электролитическую сетку. Постепенное изменение толщины мишени в процессе эксплуатации приведет к изменению эффективности регистрации атомов и ошибке в определении величины входящего потока. Поэтому было предложено реализовать систему, которая позволит осуществлять оперативный контроль состояния рабочей мишени.

Идея метода состоит в просвечивании пленки пучком лёгких ионов с энергией до нескольких десятков килоэлектронвольт и последующей регистрации энергетического спектра рассеянных ионов пучка. Для выяснения работоспособности метода были проведены предварительные расчеты с помощью кода SRIM [4]. Экспериментально метод был проверен с использованием натриевого термоионного источника. Было показано, что чувствительность метода достаточна для того, чтобы использовать его для построения системы контроля качества пленок в атомных анализаторах.

В разделе 2.5 описываются высоковольтные испытания ускорительного модуля анализатора LENPA в условиях облучения интенсивным потоком ионизирующего излучения – гамма-квантов мегаэлектронвольтного диапазона энергий.

Ускорительный модуль, входящий в состав анализатора LENPA, предназначен для увеличения энергии вторичных ионов с целью повышения соотношения сигнал-фон. Внутренний объем корпуса ускорительного модуля находится под избыточным давлением и заполняется азотом, который обеспечивает электрическую прочность изолирующего промежутка. В условиях воздействия ионизирующего излучения электрическая прочность изолирующего газового объема может существенно уменьшиться, что приведет к нарушению работы анализатора.

В результате испытаний было установлено, что для сохранения работоспособности ускорителя при напряжении +100 кВ в условиях облучения гамма-квантами мегаэлектронвольтного диапазона энергий с интенсивностью до  $5 \times 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  давление азота в изолирующем объеме ускорителя должно составлять не менее 5.0 атм.

Третья глава посвящена исследованию возможности использования диагностики по потокам атомов для изучения удержания альфа-частиц,

образующихся в плазме ИТЭР, путем измерения потоков нейтрализованных ионов отдачи [А4].

Ионы отдачи возникают в дейтерий-третиевой плазме в результате таких столкновений альфа-частиц с тепловыми ионами, при которых альфа-частицы теряют значительную часть начальной энергии [5]. Это приводит к появлению в плазме группы быстрых ионов с максимальной энергией, близкой к энергии рождения альфа-частиц. Энергетическое распределение ионов отдачи непосредственно связано с распределением альфа-частиц.

В разделе 3.1 описан процесс численного моделирования функций распределения альфа-частиц и быстрых ионов отдачи в плазме. Расчеты были проведены с использованием программного кода [6], основанного на полуаналитическом методе решения уравнения Фоккера-Планка, которое в стационарном случае записывается в виде:

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} = 0 = C_i + S_i - \frac{f_i}{\tau_{loss}},$$

где  $f_i$  – это функция распределения ионов сорта  $i$ ,  $C_i$  – кулоновский столкновительный член уравнения, учитывающий столкновения ионов сорта  $i$  со всеми основными частицами плазмы  $j$ :  $C_i = \sum_j C_{ij}$ ,  $S_i$  – функция источника

ионов сорта  $i$ . В случае ионов отдачи появление источника  $S_i$  является результатом столкновений между тепловыми ионами дейтерия и трития и быстрыми альфа-частицами. Для упрощенного моделирования возможных потерь частиц в процессе замедления в уравнение был введен член  $f_i/\tau_{loss}$ , при этом время удержания  $\tau_{loss}$  было принято одинаковым для всех сортов ионов и не зависящим от энергии.

На основе полученных функций распределения были рассчитаны потоки атомов – нейтрализованных ионов отдачи, выпускаемых плазмой вдоль линии наблюдения анализаторов. Результаты этих расчетов представлены в разделе 3.2. Моделирование было проведено с использованием кода DOUBLE-МС [7] для индуктивного режима работы реактора ИТЭР. В расчетах учитывались основные процессы, приводящие к нейтрализации быстрых ионов: фоторекомбинация, а также захват электрона от водородоподобных ионов примесей.

Полученные значения потоков нейтрализованных ионов отдачи позволили рассчитать ожидаемые скорости счета для анализатора НЕНРА.

Моделирование показало, что интенсивность потока достаточна для превышения уровня нейтронного и гамма-фона и надежной регистрации полезного сигнала.

Было обнаружено, что изменение времени удержания быстрых ионов  $\tau_{loss}$  оказывает влияние как на энергетическую зависимость, так и на абсолютную величину потока атомов  $\Gamma(E)$ . Оказалось, что в случае трития при энергии атомов выше 0.6 МэВ можно ввести эффективную температуру  $T_{eff}$  «хвоста» распределения, величина которой характеризует эффективность удержания быстрых ионов в плазме (рис. 1а).

Возможности данного метода оценки времени удержания ограничиваются двумя факторами. При малых значениях  $\tau_{loss}$  падает интенсивность потока быстрых атомов, и влияние фонового излучения становится существенным даже при высоких энергиях частиц. Второй ограничивающий фактор появляется при относительно высоких значениях  $\tau_{loss}$ . Поскольку время замедления быстрых ионов в плазме с рассматриваемыми параметрами составляет порядка нескольких секунд, разница в значениях  $T_{eff}$  в диапазоне  $\tau_{loss} \sim 1 - 2$  с и выше практически отсутствует. Тем не менее, можно уверенно различить области “плохого” (десятые доли секунд) и “хорошего” (порядка нескольких секунд) удержания быстрых ионов.

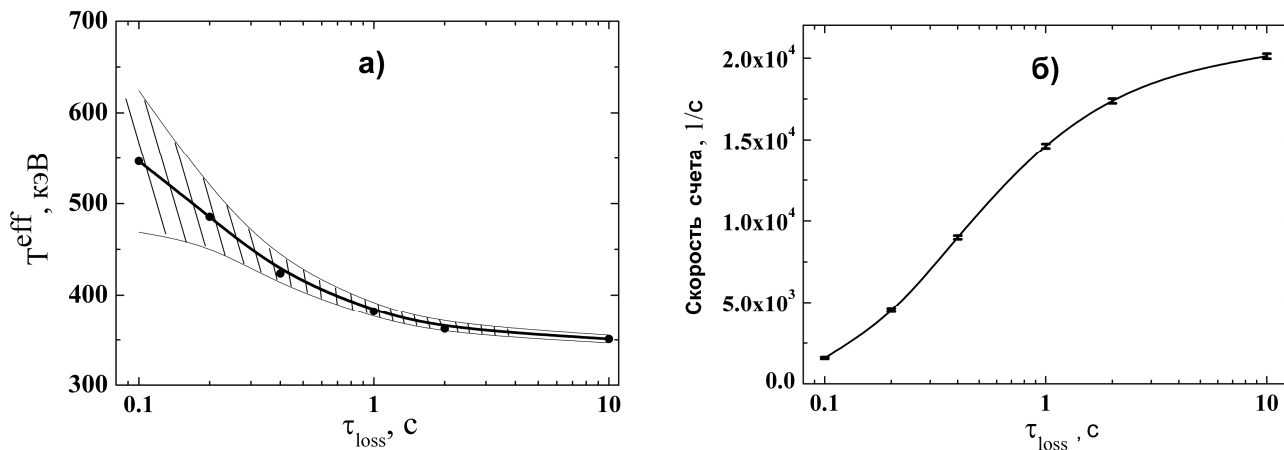


Рис. 1. а) Эффективная температура  $T_{eff}$  распределения  $F_T(E)$  как функция времени удержания быстрых ионов  $\tau_{loss}$  (расчет); б) Суммарная скорость счета атомов дейтерия анализатором HENPA в энергетическом интервале от 1.2 до 2.2 МэВ в зависимости от времени удержания быстрых ионов  $\tau_{loss}$  (расчет).

Ещё одна возможность изучения удержания быстрых ионов и альфа-частиц связана с абсолютными измерениями потоков нейтрализованных ионов отдачи, поскольку их интенсивность возрастает с увеличением времени  $\tau_{loss}$  (рис. 1б). Абсолютные измерения позволяют реализовать оперативный контроль режима горения плазмы, так как величина потока напрямую зависит от скорости термоядерной реакции и времени удержания альфа-частиц.

Четвертая глава посвящена исследованию особенностей измерения изотопного соотношения ионов дейтерия и трития по потокам атомов в рабочих сценариях токамака ИТЭР: индуктивном и стационарном [8]. Рассмотрено влияние инъекции пучков нейтральных атомов [A5], а также особенности измерений, связанные с инъекцией топливных пеллет [A6].

На дейтерий-тритиевой фазе эксперимента инъекция пучков атомов дейтерия с энергией  $E = 1$  МэВ должна стать одним из основных средств нагрева плазмы. Планируется, что суммарная мощность инъекции составит 33 МВт (2 пучка по 16.5 МВт). Третий пучок – водородный – будет применяться в диагностических целях. Инъекция мощных нейтральных пучков может существенным образом повлиять на потоки атомов, испускаемых плазмой, что необходимо учитывать при анализе условий и возможностей измерения изотопного соотношения с использованием атомных анализаторов. Результаты исследования влияния нейтральной инъекции на сигналы диагностики по потокам атомов приведены в разделе 4.1.

Для расчета функции распределения быстрых ионов, возникающих в плазме при инъекции атомарных пучков дейтерия и водорода, был применен программный код [6]. При моделировании было учтено, что источником быстрых ионов в данном случае является моноэнергетический пучок частиц, инжектируемых в плазму. Расчет потоков быстрых атомов, образованных в результате нейтрализации ионизованных атомов пучка и вылетающих из плазмы вдоль линии наблюдения анализаторов, был проведен с помощью кода DOUBLE-MS [7].

Моделирование показало, что наличие водородного диагностического пучка не оказывает заметного влияния на измерение потока дейтерия и, следовательно, изотопного соотношения дейтерия и трития. Это обеспечивается независимой регистрацией и эффективным разделением ионов разных сортов (коэффициент разделения составляет  $\leq 10^{-3}$ ).

Инжекция мощных нагревных пучков дейтерия приводит к появлению интенсивного сигнала, вызванного частичной нейтрализацией ионизованных атомов пучков, захваченных плазмой. Это исключает возможность измерения анализатором LENPA потока тепловых атомов дейтерия при энергии выше 50 кэВ. В этом случае пространственная область, для которой возможно измерение изотопного соотношения с помощью анализатора LENPA, ограничивается периферией плазмы ИТЭР.

При измерении потока быстрых атомов нижняя граница рабочего энергетического диапазона анализатора HENPA находится несколько ниже энергии инжекции – в области от 0.6 до 0.9 МэВ в зависимости от режима работы реактора. Поток атомов с данными энергиями испускается из центральной области плазмы. При энергиях, находящихся выше указанной границы, измеряемый поток не искажается инжектируемыми частицами. Таким образом, инжекция нагревных пучков атомов дейтерия не препятствует возможности измерения изотопного соотношения топливных ионов в центре плазмы.

В разделе 4.2 рассмотрены особенности измерений, связанные с инжекцией в плазму топливных пеллет. Этот метод рассматривается в качестве основного способа доставки термоядерного топлива к центральной области плазмы ИТЭР. Эффективность инжекции зависит от глубины проникновения вещества в плазму. В настоящее время разработаны модели, позволяющие описать процессы испарения и проникновения пеллет в плазму. Однако результаты расчетов существенно зависят от теоретических предположений, в частности, от профиля плотности плазмы, заложенного в модели, а также от того, в какой степени учитывается дрейф плазменного облака в направлении большого радиуса плазмы, возникающий в неоднородном магнитном поле токамака [9]. В связи с этим встает вопрос о том, сможет ли диагностика по потокам атомов представить экспериментальную информацию в подтверждение теоретической модели указанного дрейфа.

В разделе 4.2.1 кратко описана система пеллет-инжекции на реакторе ИТЭР, дающая возможность запускать пеллеты в плазму как со стороны слабого тороидального магнитного поля, так и со стороны сильного поля.

В разделе 4.2.2 рассмотрено влияние инжекции топливных пеллет на временную эволюцию основных параметров плазмы, а именно её температуру и плотность. Моделирование изменений указанных параметров было проведено

с помощью кода ASTRA [10]. В расчетах были использованы профили плотности захваченного плазмой вещества пеллеты, полученные в работе [11] в различных предположениях о величине дрейфа плазменного облака.

Анализ изменений потоков атомов, вызванных инъекцией топливных пеллет, проводится в разделе 4.2.3. Поскольку профили плотности захваченного плазмой вещества пеллеты смещены во внешнюю область плазмы, инъекция пеллет практически не влияет на величину потоков атомов, регистрируемых анализатором HENPA. Наиболее заметное изменение атомных потоков должно быть зарегистрировано анализатором LENPA, осуществляющим измерения в области низких энергий, относящихся к наружной области плазмы. Локальное падение температуры и увеличение плотности плазмы сразу после инъекции пеллеты вызывает уменьшение потока атомов, регистрируемых анализатором. На рис. 2 показана временная зависимость скорости счета атомов трития с энергией  $E = 60$  кэВ при частоте инъекции пеллет равной 2 Гц. Рассмотрены случаи 0% (дрейф отсутствует), 50% (смещение вещества равно половине от расчетного значения) и 100%-ого дрейфа. Как видно из представленного графика, анализ данной зависимости позволяет сделать выводы о степени влияния заложенного в расчётной модели дрейфа на распространение вещества пеллеты.

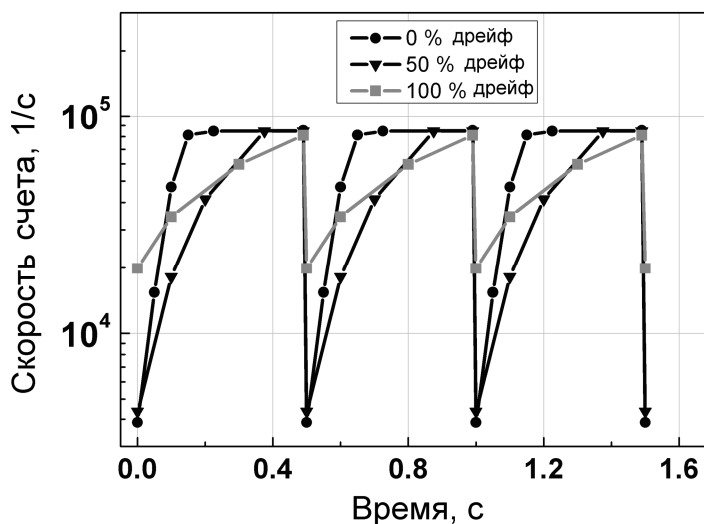


Рис. 2. Модельная временная зависимость скорости счета атомов трития с энергией  $E = 60$  кэВ в предположении различной величины дрейфа вещества пеллеты в плазме. Частота инъекции принята равной 2 Гц.

В заключении диссертации приведен перечень основных результатов работы:

1) Испытаны критичные элементы системы диагностики по потокам атомов для токамака-реактора ИТЭР:

- Показано, что применение сцинтилляционных детекторов с кристаллами CsI(Tl), оптимизированными по толщине, позволит осуществлять регистрацию потоков атомов в условиях установки ИТЭР во всем энергетическом диапазоне атомных анализаторов LENPA и HENPA. При потоке нейтронов до  $10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  продолжительность стабильной работы детекторов на токамаке ИТЭР составит не менее 5 лет.
- Показана принципиальная возможность реализации метода оперативного контроля целостности и толщины обдирочных мишеней анализаторов LENPA и HENPA путем облучения мишеней пучком легких ионов и последующем анализе энергетического спектра рассеянных атомов с использованием диспергирующей системы самих анализаторов.
- Показано, что для сохранения работоспособности ускорителя анализатора LENPA в условиях облучения потоком гамма-квантов мегаэлектронвольтового диапазона энергий с интенсивностью до  $5 \times 10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  при значении ускоряющего напряжения 100 кВ давление азота в изолирующем объеме ускорителя должно составлять не менее 5.0 атм.

2) Разработана методика определения эффективности удержания альфа-частиц в плазме ИТЭР по измерению потоков нейтрализованных ионов отдачи мегаэлектронвольтового диапазона энергий.

- Показано, что интенсивность потока нейтрализованных ионов отдачи достаточна для надежного выделения сигнала на уровне нейтронного фона.
- Обнаружено, что форма энергетического спектра и величина потока нейтрализованных ионов отдачи зависят от времени удержания быстрых ионов в плазме, что позволит оценивать время удержания альфа-частиц путем сравнения экспериментальных данных с результатами модельных расчетов.

3) Определен диапазон энергий, доступный для измерения изотопного соотношения топливных ионов с помощью диагностики по потокам атомов в рабочих режимах ИТЭР, с учетом инжекции нейтральных нагревных и

диагностического пучков. Обнаружено, что инжекция дейтериевых нагревных пучков приводит к появлению существенного фонового сигнала и сужает энергетический диапазон измерения изотопного отношения топливных ионов с помощью анализатора LENPA до энергий  $\leq 50$  кэВ. Вместе с тем, наличие пучков не оказывает влияния на измерение изотопного отношения анализатором HENPA в области энергий  $\geq 0.9$  МэВ, соответствующих центральной зоне плазмы.

4) Проведен анализ влияния инжекции топливных пеллет на потоки атомов дейтерия и трития, испускаемых плазмой ИТЭР. Показано, что инжекция топливных пеллет со стороны сильного магнитного поля оказывает влияние на сигналы диагностики. При этом временной анализ сигналов, регистрируемых после инжекции пеллеты, позволяет сделать выводы о величине дрейфа материала пеллеты в направлении большого радиуса плазмы.

**Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в следующих работах:**

- A1. Афанасьев В. И., Козловский С. С., Макарьин Д. В., Мельник А. Д., Миронов М. И., Несеневич В. Г., Петров М. П., Петров С. Я., Чернышев Ф. В. Фоновые и ресурсные испытания детекторов атомных анализаторов для ИТЭРа на пучке быстрых нейтронов // Физика плазмы – 2010. – 36 (5) – 440.
- A2. Афанасьев В. И., Козловский С. С., Лихтенштейн В. Х., Люблин Б. В., Мельник А. Д., Миронов М. И., Несеневич В. Г., Петров М. П., Петров С. Я., Чернышев Ф. В. Метод контроля параметров обдирочной мишени в атомных анализаторах для ITER // ПТЭ – 2010. – 2 – 114.
- A3. Несеневич В. Г., Афанасьев В. И., Козловский С. С., Макарьин Д. В., Мельник А. Д., Миронов М. И., Петров М. П., Петров С. Я., Чернышев Ф. В. Сравнительный анализ чувствительности сцинтилляторов CsI(Tl), ZnO(Ga), YAG(Ce) к фоновому излучению плазмы в условиях работы токамака-реактора ИТЭР // ПТЭ – 2012. – 2 – 115.
- A4. Nesenevich V. G., Afanasyev V. I., Goncharov P. R., Mironov M. I., Petrov M. P., and Petrov S. Ya. Use of neutralized knock-on ion fluxes for



alpha-particle confinement studies // Plasma Phys. Control. Fusion – 2014. – 56 – 125002.

- A5. Афанасьев В. И., Гончаров П. Р., Миронов М. И., Несеневиц В. Г., Петров М. П., Петров С. Я., Сергеев В. Ю. Особенности измерения изотопного состава водородных ионов в плазме ИТЭРа с помощью диагностики по потокам атомов в условиях инжекции в плазму нейтральных пучков // Физика плазмы – 2015. – 41 (12) – 1062.
- A6. Petrov M. P., Afanasyev V. I., Mironov M. I., Nesenevich V. G., Goncharov P. R., Sergeev V. Yu., Timokhin V. M. Fuel Monitoring in ITER Plasma with the use of Neutral Particle Analysis. 1st EPS conference on Plasma Diagnostics, PoS(ECPD2015)153.

### **Список цитируемой литературы:**

- [1]. Donné A. J. H. et al. // Nucl. Fusion – 2007. – 47 – S337.
- [2]. Afanasyev V. I. et al. // Nucl. Instrum. Method. Phys. Res. A – 2010. – 621–456.
- [3]. Кисляков А. И., Петров М. П. // Физика плазмы – 2009. – 35 (7). – 585.
- [4]. Ziegler J. F., Biersack J. P., Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids. N.Y.: Pergamon Press, 1985.
- [5]. Ryutov D. // Phys. Scr. – 1992. – 45 – 153.
- [6]. Goncharov P. R. et al. // Phys. Plasmas – 2010. – 17 – 112313.
- [7]. Afanasyev V. I., Gondhalekar A. and Kislyakov A. I. // JET Report, JET-R(00)-04, October 2000.
- [8]. ITER Technical Basis (ITER EDA Documentation Series 24). Vienna: IAEA, 2002. <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/ITER-EDA-DS-24.pdf>
- [9]. Rozhansky V. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion – 2004. – 46 – 575.
- [10]. Pereverzev G. V. et al. ASTRA: Automated System for Transport Analysis in Tokamak // Max-Planck Institutes Report IPP 5/98 (1998).
- [11]. Parail V. et al. // Nucl. Fusion – 49. – 075030 – 2009.