

Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ»

На правах рукописи

Серов Станислав Вадимович

**АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКАЯ  
ДИАГНОСТИКА ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЫ:  
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ ИТЭР И  
ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННОЙ КОМПОНЕНТЫ  
ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА T-10**

Специальность 01.04.08 — физика плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва — 2020

Работа выполнена в Частном учреждении Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР»

Научный руководитель:

**Красильников Анатолий Витальевич**

доктор физико-математических наук

Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», директор

Официальные оппоненты:

**Вуколов Константин Юрьевич**

доктор физико-математических наук

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Курчатовский комплекс термоядерной энергетики и плазменных технологий, отдел ИТЭР, заместитель начальника отдела

**Романников Александр Николаевич**

доктор физико-математических наук

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», научный руководитель по УТС и плазменным технологиям

**Лизунов Андрей Александрович**

кандидат физико-математических наук

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория 9-1, старший научный сотрудник

Защита состоится «27» \_\_\_\_\_ мая 2020 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МИФИ.01.04 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
МИФИ.01.04, к.ф.-м.н.



Степаненко А. А.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Проект ИТЭР — это значимый этап в создании экономически выгодного способа получения энергии с использованием реакции синтеза лёгких ядер. Основной целью проекта ИТЭР является демонстрация возможности поддержания управляемой термоядерной D-T реакции с положительным выходом энергии на уровне 500 МВт [1]. При этом не исключается возможность достижения зажигания термоядерной реакции. Результаты научных исследований на ИТЭР позволят перейти к практической реализации демонстрационной термоядерной электростанции (т. н. проект ДЕМО), которая должна показать возможность и целесообразность использования термоядерного синтеза для получения энергии.

Одним из способов диагностики плазмы токамаков является метод, использующий инжекцию высокоэнергетического пучка атомов. При проникновении пучка в плазму его атомы вступают в реакцию перезарядки с ионами плазмы. В результате этой реакции полностью ионизованное ядро, находящееся в плазме, получает электрон, который, переходя на основной уровень, излучает свет. Из характеристик спектра зарегистрированного излучения можно получить данные об ионной температуре, концентрации и скорости вращения плазмы. Данный метод носит название активная спектроскопическая или корпускулярно-спектроскопическая диагностика, обозначаемая в англоязычной литературе аббревиатурой CXRS (Charge eXchange Recombination Spectroscopy) [2–4].

Активная спектроскопия позволяет производить измерения радиального профиля ионной температуры по CXRS линиям рабочего газа и лёгких примесей. Эти измерения позволяют изучать различные характеристики плазмы, например перенос тепла. Важным отличием активной спектроскопии от других методов диагностики является возможность одновременного измерения радиального профиля концентрации примесей по всему сечению плазменного шнура, что позволяет проводить изучение переноса примесей. Примеси существенно влияют на времена удержания энергии в электронной и ионной компонентах, процессы формирования тока и устойчивость плазменного шнура. От их наличия и распределения зависит эффективность всех видов нагрева плазмы токамака. По этой причине измерения с использованием активной спектроскопии играют важную роль в изучении термоядерной плазмы.

Активная спектроскопия является одной из важнейших диагностических систем строящегося в настоящее время комплекса ИТЭР, поскольку с её помощью планируется измерять ряд параметров плазмы, определяющих эффективность протекания термоядерной реакции. ИТЭР будет первым токамаком, в котором нагрев плазмы будет происходить в основном за счёт гелия, являющегося продуктом реакции синтеза. Для обеспечения горения термоядерной реакции необходимо обеспечить вывод отработанного гелия из рабочей зоны. Эта задача предполагает измерение радиального

профиля плотности гелиевой золы  $n_{He}(r)$ , которое можно будет провести с использованием активной спектроскопии.

Активная спектроскопическая диагностика, которая будет наблюдать внешнюю область плазменного шнура на установке ИТЭР, разрабатывается в Российской Федерации. Оборудование для этой диагностики также будет произведено в России. Согласно требованиям ИТЭР активная спектроскопическая диагностика (CXRS Edge) должна обеспечивать измерения профилей ионной температуры, концентрации примесей и скорости вращения плазмы с временным разрешением 100 мс и погрешностью 10–30% [5].

Особенности активной спектроскопии на ИТЭР делают актуальной задачу её моделирования, то есть предсказания спектров. Моделирование позволит оценить погрешности измерения параметров плазмы и проанализировать эффективность этой диагностики. Кроме того, предсказание спектров необходимо для создания методики обработки данных. Важной сопутствующей задачей является проверка достоверности моделирования, которую можно провести путём сопоставления синтетических спектров с экспериментальными данными с действующей установкой.

#### **Основные цели** данной работы

1. Анализ эффективности активной спектроскопической диагностики для установки ИТЭР.
2. Моделирование работы активной спектроскопической диагностики на токамаке JET и сопоставление модельных спектров с экспериментальными.
3. Исследование ионной компоненты плазмы токамака T-10 с использованием активной спектроскопической диагностики.

Для достижения поставленных целей потребовалось решить следующие **задачи**:

- усовершенствовать модель пассивной перезарядки в коде SOS (Simulation of Spectra);
- измерить ионную температуру, концентрацию примесей и скорость вращения плазмы с использованием активной спектроскопической диагностики на установке JET;
- проверить достоверность моделирования с использованием кода SOS путём сопоставления синтетических спектров с экспериментальными данными с установки JET;
- провести моделирование работы активной спектроскопической диагностики для установки ИТЭР для оценки погрешностей измерения параметров плазмы этой диагностикой;
- создать систему пакетной обработки экспериментальных данных для активной спектроскопической диагностики на установке T-10;
- исследовать основные особенности поведения профилей ионной температуры, полученных в омических разрядах и разрядах с ЭЦР нагретом на установке T-10.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. В результате доработки модели пассивной перезарядки в коде SOS (Simulation of Spectra) достигнуто увеличение достоверности предсказания спектрального контура линии пассивной перезарядки. Показано, что полученный профиль линии пассивной перезарядки является негауссовым и несимметричным, но он достаточно хорошо описывается суммой двух гауссианов.
2. Сопоставление модельных спектров с экспериментальными данными активной спектроскопии на установке JET показало, что доработанный код SOS позволяет предсказывать спектры этой диагностики с достоверностью, достаточной для применения этого кода на ИТЭР.
3. Анализ ошибок измерений для установки ИТЭР показал, что активная спектроскопия сможет измерять ионную температуру, концентрацию гелия и лёгких примесей, а также тороидальную скорость вращения с требуемой погрешностью. Погрешность измерения полоидальной скорости вращения будет 5 км/с, что позволит измерить радиальный профиль полоидального вращения плазмы.
4. Созданная система пакетной обработки данных для активной спектроскопии на установке T-10 ускорила и упростила получение профилей  $T_i(r)$ , что позволило исследовать зависимость профилей  $T_i(r)$  от параметров плазмы в омических разрядах и разрядах с ЭЦР нагревом, а также изучать временную динамику профилей  $T_i(r, t)$ .
5. В результате исследований профилей ионной температуры плазмы токамака T-10 было получено, что в омических разрядах ширина радиального профиля  $T_i(r)$  зависит главным образом от величины тока разряда  $I_p$ . Было обнаружено, что в разрядах с плотностью плазмы  $n_e < 3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  введение центрального ЭЦР нагрева вызывает уменьшение величины  $T_i(0)$ , коррелирующее с увеличением мощности  $P_{ECRH}$ , а также выполаживание профиля  $T_i(r)$  в центральной области шнура, занимающее все больший размер по мере роста мощности  $P_{ECRH}$ . Зависимости этого эффекта от тока плазмы  $I_p$  обнаружено не было.

## Научная новизна работы

1. Впервые проведено количественное сопоставление синтетических спектров, полученных с помощью кода SOS, с экспериментальными данными с действующей установки JET.
2. Проведено моделирование работы диагностической системы CXRS Edge для установки ИТЭР с использованием доработанной модели пассивной перезарядки и актуальных на сегодняшний день входных данных. Впервые была получена оценка нижнего порога концентраций примесей, при которых возможно проведение измерений параметров плазмы ИТЭР.

3. Для активной спектроскопической диагностики, развитой на установке Т-10, впервые применялась система пакетной обработки данных.
4. Впервые исследовалось поведение профилей ионной температуры в зависимости от плотности плазмы в омических разрядах и разрядах с ЭЦР нагревом на установке Т-10.

### **Практическая значимость работы**

1. Повышение достоверности моделирования линии пассивной перезарядки позволило улучшить предсказание спектров излучения из плазмы. Усовершенствованная модель позволит уменьшить ошибки измерения параметров плазмы при обработке спектральных профилей.
2. Сопоставление синтетических спектров с экспериментальными данными с установки JET показало, что результаты моделирования с помощью кода SOS можно использовать для оптимизации активной спектроскопической диагностики на существующих установках, а также для проектирования этой системы на строящихся установках.
3. Результаты моделирования спектров и оценок погрешностей измерений используются при разработке и создании системы CXRS Edge для установки ИТЭР. Кроме того, моделирование используется для создания алгоритмов обработки экспериментальных данных для активной спектроскопии.
4. Созданная система пакетной обработки данных для активной спектроскопии на установке Т-10 ускорила и упростила получение профилей  $T_i(r)$ . Она будет использована для создания системы пакетной обработки данных для установки ИТЭР.
5. Результаты исследования поведения профилей ионной температуры важны для понимания процессов переноса тепла и частиц в плазме токамака, а также для исследования поглощения мощности ЭЦР нагрева.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается их согласованностью с имеющимися в литературе данными, а также совпадением результатов, полученных разными методами. Результаты работы были представлены на российских и международных конференциях и опубликованы в реферируемых журналах.

### **Личный вклад автора**

Автор принимал непосредственное участие в

- разработке кода SOS, в том числе в усовершенствовании модели пассивной перезарядки;
- обработке экспериментальных данных и моделировании работы активной спектроскопии на установке JET, сопоставлении модельных и экспериментальных данных с этой установки;
- разработке и создании диагностики CXRS Edge для установки ИТЭР, в том числе в оценке погрешности измерений параметров

плазмы и разработке методики обработки данных для этой системы;

- созданию системы пакетной обработки данных для активной спектроскопической диагностики на установке Т-10;
- обработке и анализе данных активной спектроскопической диагностики с установки Т-10.

**Апробация работы.** Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на российских и международных научных конференциях:

- Всероссийская научная конференции МФТИ (Москва 2012, 2016, 2017);
- Современные средства диагностики плазмы и их применение, МИФИ (Москва 2012, 2014, 2018);
- Всероссийская конференция по диагностике высокотемпературной плазмы (Звенигород 2013, 2017);
- Международная конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород 2014, 2015, 2016, 2017);
- EPS Conference on Plasma Physics (Prague 2018);
- ECPD Conference on Plasma Diagnostics (Lisbon 2019).

Полученные результаты также представлялись и обсуждались на международных совещаниях по диагностике ИТЭР.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 14 печатных работах, 5 из которых изданы в виде статей в российских и зарубежных журналах, включённых в перечень ВАК и/или индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 9 — в тезисах докладов.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 166 страниц, включая 63 рисунка и 12 таблиц. Список литературы содержит 129 наименований.

## Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации и приведено её краткое содержание. Сформулированы основные цели работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Описаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Представлена информация о личном вкладе автора, апробации работы, публикациях и структуре диссертации.

**Первая глава** посвящена литературному обзору по теме диссертации.

В разделе 1.1 рассматривается способ получения энергии с помощью управляемого термоядерного синтеза. Описываются основные условия, необходимые для возникновения стационарной самоподдерживающейся термоядерной реакции в установке типа токамак.

В разделе 1.2 описывается важность диагностических систем для работы токамака. Рассматриваются основные принципы активной спектроскопической диагностики плазмы, основанной на зондировании плазмы высокоэнергетическим пучком атомов. Показано, что эта диагностика позволяет измерять радиальные профили ионной температуры  $T_i(r)$ , плотности ядер рабочего газа и лёгких примесей  $n_z(r)$ , скорости тороидального и полоидального вращения плазмы  $v_{tor}(r)$  и  $v_{pol}(r)$ .

В разделе 1.3 изложена история возникновения и развития активной спектроскопической диагностики. Рассматриваются первые работы, в которых было предложено использовать излучение сопутствующее инжекции высокоэнергетического пучка атомов для диагностики плазмы. Приводится обзор ключевых работ по теме диссертации, подробно описывающих тонкости и трудности использования этого метода диагностики. Также рассматриваются особенности организации активной спектроскопии на наиболее важных современных токамаках: ASDEX-U, DIII-D, NSTX, JT-60U, EAST и т. д.

**Вторая глава** посвящена обзору физических процессов, определяющих спектр излучения, регистрируемый активной спектроскопической диагностикой.

В разделе 2.1 данной главы рассматривается процесс ослабления высокоэнергетического пучка атомов при прохождении через плазму. Поясняется, какими параметрами должен обладать пучок для обеспечения измерений радиальных профилей параметров плазмы.

Раздел 2.2 посвящён структуре спектров излучения, возникающего при зондировании плазмы пучком атомов водорода. Разъясняется происхождение основных спектральных составляющих: линии активной перезарядки, линии пассивной перезарядки, линий излучения с границы плазменного шнура и фонового излучения тормозного континуума.

В разделе 2.3 описывается процесс получения параметров плазмы из зарегистрированного спектра излучения. Температура, концентрация и скорость вращения ионного компонента плазмы вычисляются из характеристик спектральной линии активной перезарядки атомов пучка на ядрах примесей. Указываются различные способы выделения линии активной перезарядки из спектра: с вычитанием и без вычитания пассивного сигнала.

Раздел 2.4 посвящён атомным данным, необходимым для вычисления концентрации ионов из интенсивности линии активной перезарядки. Описывается пакет ADAS [6], который в этой работе используется в качестве основного источника атомных данных. Рассматриваются зависимости сечений реакции перезарядки  $\sigma_{cx}$  и скоростного коэффициента  $\langle\sigma v\rangle_{cx}$  от энергии столкновения для различных примесей. Отмечается важность учёта перезарядки из возбуждённого уровня пучка ( $n = 2$ ). Приводятся основные переходы в видимом диапазоне, используемые для диагностики.

В разделе 2.5 обсуждаются эффекты, способные повлиять на форму линии активной перезарядки и исказить результаты измерений. Рассматривается тонкая структура спектральной линии и её зеemanовское



расщепление. Описывается необходимость учёта зависимости сечения перезарядки от энергии, эффекта гало [7] и плюм-эффекта [8]. Рассматривается значимость этих эффектов для условий плазмы токамака.

**Третья глава** посвящена моделированию работы активной спектроскопической диагностики, а также проверке достоверности моделирования путём сравнения модельных спектров с экспериментальными данными с установки JET.

В разделе 3.1 этой главы описываются основные принципы моделирования работы активной спектроскопии, реализованные в коде *Simulation of Spectra* [9]. Перечислены как базовые идеи и возможности, заложенные в этот код, так и присущие ему ограничения. Рассматриваются используемые входные данные: параметры плазмы, геометрия измерений, параметры диагностического пучка, оптической системы сбора света и схемы измерений, а также характеристики спектрометра и детектора.

В разделе 3.2 рассматриваются модели, используемые для предсказания различных компонент CXRS спектра. Рассматривается учёт ослабления диагностического пучка и вычисление интенсивности линии активной перезарядки. Описано получение спектра излучения тормозного континуума и линий, излучающих с границы плазменного шнура. Особое внимание уделяется моделированию излучения линии пассивной перезарядки. Описывается проведённая доработка модели пассивной перезарядки с использованием кода EIRENE [10], который был применён для получения радиального распределения атомов водорода  $n_{H^0}(\rho)$  в плазменном шнуре.

Раздел 3.3 посвящён проверке достоверности моделирования CXRS спектров. Для этого было проведено сравнение модели и эксперимента для токамака JET, как для наиболее близкого по параметрам к строящемуся токамаку ИТЭР. Показана организация активной спектроскопической диагностики на установке JET. Рассматривается обработка экспериментальных данных и выделение линий перезарядки и линий излучения с границы плазмы. Описан процесс получения входных данных для моделирования на примере спектра линии C VI.

Было проведено сопоставление модельных и экспериментальных CXRS спектров линии C VI для различных разрядов на установке JET. В качестве примера, на рисунке 1 изображено покомпонентное сравнение спектров для разряда № 42976.

По результатам сопоставления были сделаны выводы о достоверности предсказания различных компонент спектра. Форма, интенсивность и положение модели линии активной перезарядки хорошо согласуется с экспериментом. Моделирование линий излучения с границы носит оценочный характер: абсолютные и относительные значения интенсивности расходятся с экспериментом.

Доработанная модель пассивной перезарядки позволила повысить точность предсказания соответствующей линии. Однако эта модель нуждается в дальнейшей доработке, так как концентрация атомов водорода

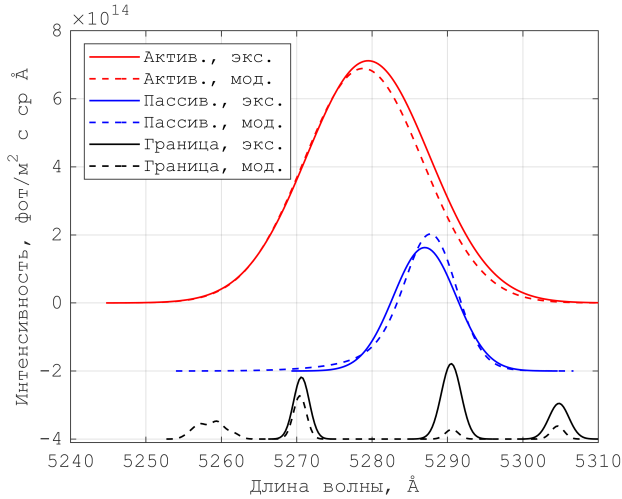


Рис. 1 — Покомпонентное сравнение эксперимента (чёрный цвет) и модели (серый цвет). Разряд № 42976

в пристеночной области и температура на границе получаются путём достаточно грубой оценки. Тем не менее, созданная модель позволяет предсказать форму линии пассивной перезарядки. Было показано, что полученный профиль линии пассивной перезарядки является негауссовым и несимметричным, но он достаточно хорошо описывается суммой двух гауссианов.

Сопоставление модельных и экспериментальных CXRS спектров было также проведено для линии He II. Для сопоставления был выбран разряд № 86739. К моменту проведения этого эксперимента на токамаке JET была установлена стенка вакуумной камеры из бериллия и вольфрама. По результатам сопоставления спектров линии He II для различных хорд наблюдения были сделаны выводы о точности моделирования в самом сложном для предсказания случае: для спектра с наложением нескольких линий перезарядки, наличием отражённого света и присутствием многочисленных линий вольфрама.

Как и для линии C VI, результат моделирования линии активной перезарядки He II хорошо согласуется с экспериментом для всех хорд наблюдения. За счёт присутствия отражений от металлической стенки вакуумной камеры интенсивность регистрируемых линий излучения с границы сильно вырастает. Отражения и присутствие многочисленных линий вольфрама также влияет и на наблюдаемый уровень тормозного континуума. Так как эти эффекты не учитывались при моделировании, то для модели линий излучения с границы и модели тормозного излучения наблюдались заметные расхождения с экспериментом.

Интенсивность модельной линии пассивной перезарядки оказалась на порядок меньше интенсивности соответствующей линии, полученной в

эксперименте. Столь большое отличие, помимо неточности оценки интенсивности пассивной перезарядки в модели, можно объяснить большими ошибками при аппроксимации экспериментального профиля набором гауссовских компонент для данного случая.

**Четвёртая глава** посвящена моделированию работы активной спектроскопической диагностики для установки ИТЭР.

Раздел 4.1 этой главы посвящён установке ИТЭР. Приведены главные цели проекта и наиболее важные характеристики строящегося токамака. Перечислены параметры базовых сценариев работы этой установки: индуктивного, гибридного и квазистационарного. Обоснована важность создания комплекса средств диагностики параметров плазмы и обозначены сопутствующие сложности.

В разделе 4.2 подробно рассматривается организация активных спектроскопических измерений на установке ИТЭР. Приведены основные параметры и принципиальная схема диагностики CXRS Edge, предназначенной для измерения параметров внешней части плазменного шнура. Описаны системы сбора излучения из плазмы, система регистрации спектров и характеристики диагностического пучка. Перечислены измеряемые параметры плазмы и требования ИТЭР к погрешностям измерений для разрабатываемой системы.

Раздел 4.3 посвящён моделированию, проведённому для активной спектроскопии на установке ИТЭР. Описываются использованные для моделирования входные данные, в том числе основные сценарии работы ИТЭР и ожидаемые профили концентраций примесей. В результате проведённого моделирования было получено представление о том, как будут выглядеть CXRS спектры для системы CXRS Edge на токамаке ИТЭР.

Для примера, на рисунке 2 приведён модельный спектр излучения плазмы для диапазона длин волн 464—471 нм, содержащий активные линии перезарядки He и Be. Видно, что отличительной особенностью спектров для ИТЭР является высокий уровень континуума, возникающего за счёт тормозного излучения. По интенсивности он почти на два порядка превосходит уровень активного сигнала, что затрудняет проведение измерений.

Моделирование проводилось для всех ожидаемых сценариев работы ИТЭР. Исследовались активные линии He, Be, C и Ne в трёх точках, попадающих в пространственный диапазон измерений системы CXRS Edge:  $\rho = 0,5$ ,  $\rho = 0,7$  и  $\rho = 0,9$  (через  $\rho$  обозначен нормированный малый радиус токамака). Для модельных спектров были посчитаны погрешности измерения параметров, величина погрешностей была сопоставлена с соотношением сигнал-шум.

Получено, что погрешность определения интенсивности линии активной перезарядки не превышает 3 % для гелия, 4 % для углерода и 1,5 % для бериллия и неона. Погрешность определения температуры оказалась практически одинаковой для линий He, Be и Ne, и не превышает значение 4 %. Для углерода максимальная погрешность составила 10 %, что объяснимо

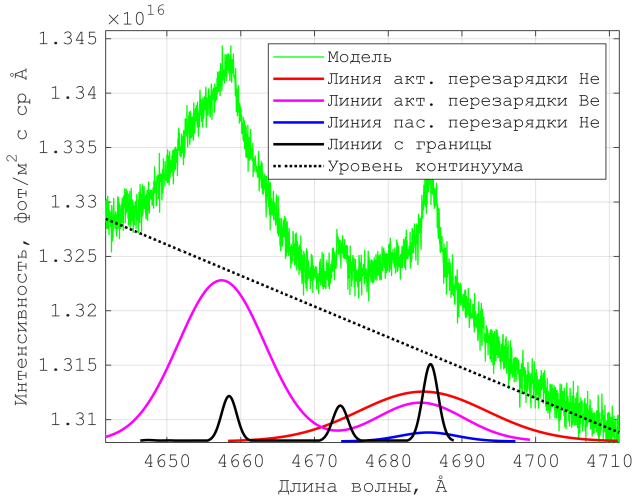


Рис. 2 — Смоделированный спектральный профиль для синего диапазона и его разложение по компонентам

его небольшой концентрацией. Наименьшая относительная ошибка определения скорости наблюдалась для неона, и она не превышала значение 5 %. Для модельных сценариев ИТЭР, не предполагающих вращения плазмы, вычислялась абсолютная ошибка определения скорости. Наименьшее значение ошибки также наблюдалось для линии неона, и оно не превышало 0,25 км/с.

Отдельно было проведено исследование нижнего порога концентраций примесей, при которых возможно проведение измерений. Оно было сделано для всего пространственного диапазона системы CXRS Edge ( $0,5 \leq \rho \leq 1$ ) для самых критических с точки зрения данной диагностики сценариев ИТЭР. По его результатам были определены минимальные концентрации примесей, позволяющие проводить измерения параметров плазмы по всей внешней части плазменного шнура, оставаясь в пределах требований к погрешностям измерений. Эти данные сведены в таблицу 1, где также приведены базовые значения концентраций и требования ИТЭР к минимальным измеряемым концентрациям.

В результате проведённых исследований было показано, что с учётом только статистических ошибок, вызванных зашумлённостью спектров, конструкция системы CXRS Edge позволит измерять профили параметров плазмы согласно всем требованиям ИТЭР.

В разделе 4.4 рассмотрены другие (нестатистические) источники ошибок, которые могут сказаться на достоверности измерений параметров плазмы с помощью активной спектроскопии на ИТЭР. Присутствие отражений излучения от стенок камеры увеличит ошибку измерений не

Таблица 1 — Минимальные концентрации примесей, позволяющие проводить измерения параметров плазмы с требуемой погрешностью

Название	Погрешность	$n_{He}$ , %	$n_{Be}$ , %	$n_C$ , %	$n_{Ne}$ , %
Баз. знач.		4,0	2,0	0,1	0,3
Требование		1,0	0,5	0,5	0,5
$n_z$ ( $n_{He}$ )	20 % (10 %)	0,7	0,06	0,03	0,008
$T_i$	10 %	0,5	0,25	0,15	0,04
$v$	30 %	0,5	0,3	0,07	0,03
$v$	0,3 км/с	> 4	> 2	0,5	0,2

более, чем в полтора раза. Наличие в плазме токамака вольфрама потребует идентификации его линий излучения, попадающих в измеряемый спектральный диапазон.

Был проанализирован вклад в погрешность измерений эффектов, влияющих на интенсивность и форму линии активной перезарядки. Показано, что для условий установки ИТЭР необходимо учитывать влияние эффектов гало и плюм (т. е. излучение атомов водорода и водородоподобных ионов примесей, возникающих в результате реакции перезарядки, см. [7; 8]), а также зависимость сечения перезарядки от энергии. Корректность учёта этих эффектов вносит большой вклад в погрешности измерения параметров плазмы. Также были описаны характерные для ИТЭР трудности, связанные с калибровкой и позиционированием диагностической системы сбора света.

Проведена оценка ошибок, возникающих при вычислении тороидальной и полоидальной скорости вращения плазмы из измеренного смещения линии активной перезарядки. Основным источником ошибок является погрешность калибровки спектрометра по длинам волн, а также небольшой угол между линиями сбора света и горизонтальным направлением. Итоговая погрешность измерения  $v_{pol}$  получается порядка 5 км/с, что не удовлетворяет требованиям ИТЭР, но позволит оценить профиль полоидального вращения плазмы.

В результате поведённых исследований было показано, что для базовых режимов работы ИТЭР диагностическая система CXRS Edge сможет измерять ионную температуру и концентрации гелия и лёгких примесей с требуемой достоверностью при условии корректного учёта всех эффектов, таких как гало и плюм. Погрешность измерения тороидальной скорости вращения  $v_{tor}$  будет удовлетворять требованиям, в то время как измерение полоидальной скорости вращения представляется возможным с погрешностью порядка 5 км/с.

**Пятая глава** посвящена исследованию профилей ионной температуры на установке Т-10, полученных с использованием активной спектроскопии.

Раздел 5.1 этой главы посвящён устройству активной спектроскопической диагностики на установке Т-10 [11]. В нем рассмотрены основные параметры токамака, диагностического пучка и системы сбора света. Описывается система регистрации излучения, созданная на основе прототипа светосильного спектрометра, разработанного для ИТЭР.

В разделе 5.2 рассматривается методика обработки экспериментальных спектров, полученных на установке Т-10. Описаны различные способы, применявшиеся для выделения линии активной перезарядки из спектра. Показано, как производится вычисление ионной температуры  $T_i$  и концентрации лёгких примесей. Обсуждаются способы учёта эффектов, влияющих на интенсивность и форму линии активной перезарядки.

Описана созданная на базе кода CXSFIT [12] методика пакетной обработки экспериментальных данных для активной спектроскопии на установке Т-10. Показано, что созданная методика позволяет быстро и надёжно определять абсолютные величины и профили  $T_i(r)$ , изучать их временную динамику, а также исследовать зависимость профилей  $T_i(r)$  от параметров разряда. Полученные данные позволили объяснить поведение  $T_i(r, t)$  в рамках основных закономерностей, формирующих величины и профили ионной температуры в плазме токамака.

Раздел 5.3 посвящён исследованию поведения ионной температуры плазмы на установке Т-10. Представлены результаты исследования динамики изменения профиля  $T_i(r, t)$  в разряде с существенным ростом плотности во время выхода на стационарный режим. Показано, что динамика увеличения ионной температуры  $T_i(0)$  удовлетворительно описывается формулой Арцимовича [13] в течение всего времени выхода разряда на стационарный режим. Также наблюдалось увеличение полуширины профиля  $T_i(r)$  с ростом разрядного тока  $I_p$ .

Приведены результаты исследования зависимости профиля ионной температуры от плотности плазмы (см. рисунок 3). Обнаружено, что центральные значения температур  $T_i(0)$  для больших плотностей плазмы находятся в соответствии с формулой Арцимовича, в время как величины  $T_i(0)$  в разрядах с малыми плотностями лежат существенно ниже зависимости Арцимовича. Полуширина профиля почти не изменяется для сильно отличающихся плотностей плазмы, что подтверждает утверждение о зависимости полуширины профиля  $T_i(r)$  главным образом от величины тока разряда.

Также представлены результаты исследования зависимости профиля ионной температуры от тока плазмы (см. рисунок 4). Общей тенденцией является увеличение полуширины профилей  $T_i(r)$  с ростом тока  $I_p$ . Можно говорить о сохранении неоклассической зависимости для величин  $T_i(0) \sim (n_e I_p)^{1/3}$  с тем отличием, что для токов плазмы  $I_p > 150$  кА существенную роль в формировании  $T_i(0)$  начинает играть выполаживание

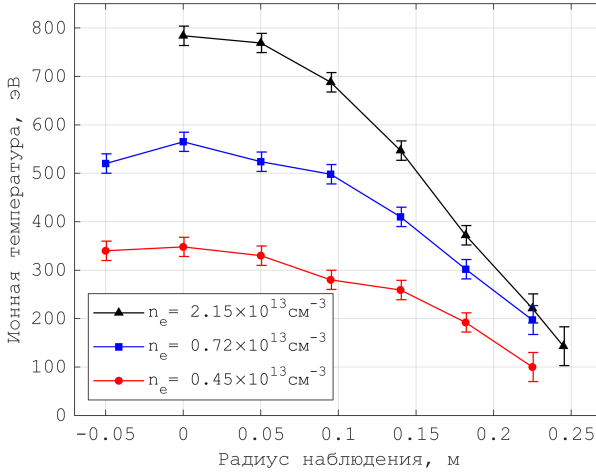


Рис. 3 — Зависимость профиля  $T_i(r)$  от плотности плазмы при постоянном токе  $I_p = 220$  кА

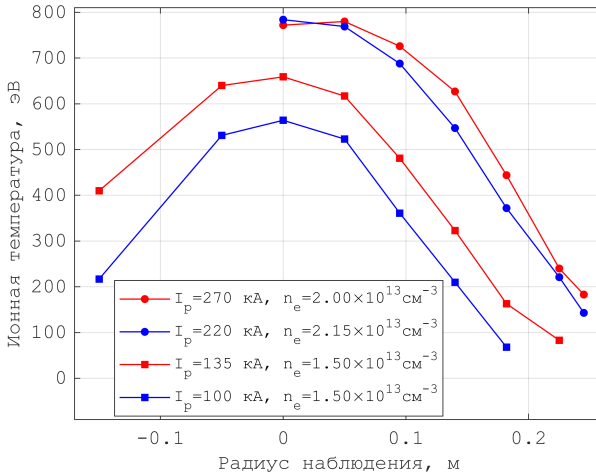


Рис. 4 — Зависимость профиля  $T_i(r)$  от тока плазмы  $I_p$

профиля  $T_i(r)$ , происходящее за счёт процессов перемешивания в пределах радиуса переворота фазы пилообразных колебаний  $r_s$  [14]. Это приводит к заметному понижению  $T_i(0)$  относительно величин, задаваемых формулой Арцимовича и согласуется с результатами, полученными в работе [15].

Представлены результаты исследования зависимости ионной температуры в центре плазменного шнура  $T_i(0)$  при переходе из омической в

ЭЦР стадию разряда в зависимости от тока и плотности плазмы. Обнаружено, что в разрядах с небольшой плотностью плазмы центральная температура  $T_i(0)$  снижается при включении ЭЦР нагрева, в то время как в разрядах с большей плотностью такого эффекта не наблюдается. Зависимости этого эффекта от тока плазмы  $I_p$  обнаружено не было. Показано, что введение центрального ЭЦР нагрева вызывает уменьшение величины  $T_i(0)$ , коррелирующее с увеличением мощности  $P_{ECRH}$ , а также выполаживание профиля  $T_i(r)$  в центральной области шнура, занимающее все больший размер по мере роста мощности  $P_{ECRH}$  (см. рисунок 5).

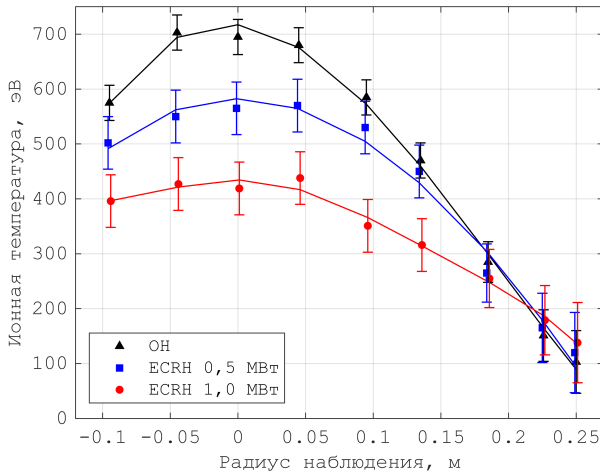


Рис. 5 — Изменение профиля  $T_i(r)$  при переходе от разряда с омическим нагревом к разряду с дополнительным ЭЦР нагревом в зависимости от мощности  $P_{ECRH}$

Раздел 5.4 посвящён исследованию удаления ядер углерода из плазмы при включении ЭЦР нагрева с помощью измерения динамики интенсивности линии активной перезарядки C VI в процессе ЭЦР нагрева. Обнаружено, что в момент включения гиротрона интенсивность линии C VI в центральных областях плазмы начинает уменьшаться, падая примерно в 3 раза по сравнению со значениями в омической стадии разряда. Такое поведение излучения свидетельствует об эффективном выносе ядер примесей из центральных областей шнура при ЭЦР нагреве и согласуется с результатами, полученными в работе [16].

В **Заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Была усовершенствована модель процесса пассивной перезарядки, используемая для предсказания спектров в коде SOS. Использование радиального распределения атомов водорода, полученного с применением транспортного кода EIRENE, позволило увеличить достоверность



предсказания спектрального контура линии пассивной перезарядки. Было показано, что полученный профиль линии пассивной перезарядки является негауссовым и несимметричным, но он достаточно хорошо описывается суммой двух гауссианов.

2. Проведено моделирование спектров линий C VI и He II для активной спектроскопической диагностики на установке JET. По результатам сопоставления модельных и экспериментальных спектров было показано, что код SOS позволяет делать реалистичные предсказания CXRS спектров излучения для установки JET. Следовательно этот код можно использовать для моделирования CXRS спектров для установки ИТЭР.

3. Проведена оценка статистических ошибок измерений параметров плазмы системой CXRS Edge на установке ИТЭР. Для этого использовалось моделирование спектров линий He II, Be IV, C VI и Ne X кодом SOS. Были определены минимальные концентрации примесей, позволяющие проводить измерения параметров плазмы с допустимыми погрешностями.

Помимо статистических, были рассмотрены другие источники ошибок, которые могут сказаться на достоверности измерений параметров плазмы. Было показано, что для базовых режимов работы ИТЭР диагностическая система CXRS Edge сможет измерять ионную температуру и концентрации гелия и лёгких примесей с требуемой достоверностью при условии корректного учёта всех эффектов, таких как гало и плюм. Погрешность измерения тороидальной скорости вращения  $v_{tor}$  удовлетворяет требованиям, в то время как измерение полоидальной скорости вращения представляется возможным с погрешностью порядка 5 км/с. Это не удовлетворяет требованиям ИТЭР, но позволит оценить радиальный профиль  $v_{pol}$ .

4. Была создана система пакетной обработки экспериментальных данных для активной спектроскопии на установке Т-10. Система позволила быстро и надёжно определять абсолютные величины и профили  $T_i(r)$ , изучать их временную динамику, а также исследовать зависимость профилей  $T_i(r)$  от параметров разряда. Полученные данные позволили объяснить поведение  $T_i(r, t)$  в рамках основных закономерностей, формирующих величины и профили ионной температуры в плазме токамака. Созданная методика будет использована для создания системы пакетной обработки данных для установки ИТЭР.

5. Активная спектроскопия на установке Т-10 была применена для исследования поведения профилей ионной температуры плазмы в омических разрядах и разрядах с ЭЦР нагревом. Обнаружено, что в омических разрядах с плотностью  $n_e > 0,7 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  значения ионной температуры в центре плазмы удовлетворительно описываются формулой Арцимовича, в то время как в разрядах с меньшими плотностями значения ионной температуры в центре плазмы лежат существенно ниже зависимости Арцимовича.

Показано, что в омических разрядах полуширина радиального профиля  $T_i(r)$  зависит главным образом от величины тока разряда  $I_p$ . Также

было обнаружено, что в омических разрядах с током плазмы  $I_p > 150$  кА существенную роль в формировании  $T_i(0)$  начинает играть выполаживание профиля  $T_i(r)$ . Это приводит к заметному понижению  $T_i(0)$  относительно величин, задаваемых формулой Арцимовича.

Обнаружено, что в разрядах с плотностью плазмы  $n_e < 3 \times 10^{13}$  см<sup>-3</sup> ионная температура в центре плазменного шнура снижается при включении ЭЦР нагрева, в то время как в разрядах большей плотностью такого эффекта не наблюдается. Зависимости этого эффекта от тока плазмы  $I_p$  обнаружено не было. Исследования показали, что введение центрального ЭЦР нагрева вызывает уменьшение величины  $T_i(0)$ , коррелирующее с увеличением мощности  $P_{ECRH}$ , а также выполаживание профиля  $T_i(r)$  в центральной области шнура, занимающее все больший размер по мере роста мощности  $P_{ECRH}$ .

## Публикации автора по теме диссертации

### В изданиях из списка ВАК и/или Scopus и Web of Science

1. Simulation of Spectra Code (SOS) for ITER Active Beam Spectroscopy / M. von Hellermann [et al.] // Atoms. — 2019. — Vol. 7, no. 1.
2. Серов, С. В. Моделирование спектров излучения плазмы ИТЭР с использованием кода ADAS для диагностики активной спектроскопии / С. В. Серов, С. Н. Тугаринов, M. von Hellermann // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. — 2018. — т. 41, № 2. — с. 89—94.
3. Применение кода CXSFIT для обработки экспериментальных данных активной спектроскопической диагностики токамака Т-10 / С. В. Серов [и др.] // Физика плазмы. — 2017. — т. 43, № 12. — с. 957—966.
4. Charge exchange recombination spectroscopy on the T-10 tokamak / L. A. Klyuchnikov [et al.] // Review of Scientific Instruments. — 2016. — Vol. 87, no. 5. — P. 053506.
5. Возможности спектроскопической диагностики CXRS на токамаке Т-10 / Л. А. Ключников [и др.] // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. — 2016. — т. 39, № 1. — с. 95—104.

### В тезисах конференций

6. Serov, S. V. Benchmarking of CXRS modelling against JET experimental data / S. V. Serov, S. N. Tugarinov, M. von Hellermann // Proc. of 3rd European Conference on Plasma Diagnostics (ECPD), 6 – 9 May 2019, Lisbon, Portugal. — European Physical Society, 2019. — P1.17.
7. Серов, С. В. Разработка синтетической диагностики «Активная Спектроскопия» для установки ИТЭР / С. В. Серов, С. Н. Тугаринов, M. von Hellermann // Материалы XI Российской Конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение» 13—15 ноября 2018 г. — НИЯУ «МИФИ», 2018. — с. 44.

8. *Serov, S. V.* ITER plasma spectra modelling for charge exchange recombination spectroscopy / S. V. Serov, S. N. Tugarinov, M. von Hellermann // Proc. of 45nd EPS Conference on Plasma Physics 2 – 6 July 2018. 42A. — European Physical Society, 2018. — P.4.1012.
9. Применение кода CXSFIT для обработки экспериментальных данных активной спектроскопической диагностики токамака Т-10 / С. В. Серов [и др.] // XVII Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы». Программа конференции. Тезисы докладов. 13—17 июня 2017 г. — ЧУ «ИТЭР-Центр», 2017. — с. 76.
10. Исследование поведения ионной температуры плазмы в разрядах на токамаке Т-10 / С. В. Серов [и др.] // XLIV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Сборник тезисов докладов. 13—17 февраля 2017 г. — Российская академия наук, 2017. — с. 314.
11. Моделирование и обработка спектров активной спектроскопии установки Т-10 / С. В. Серов [и др.] // Материалы IX Российской Конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение» 5—7 ноября 2014 г. — НИЯУ «МИФИ», 2014. — с. 129.
12. Прогресс в проведении моделирования и отработке методики анализа спектров для активной спектроскопии ИТЭР / С. В. Серов [и др.] // XV Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы». Программа конференции. Тезисы докладов. 3—7 июня 2013 г. — ЧУ «ИТЭР-Центр», 2013. — с. 24.
13. *Serov, S. V.* Роль активной спектроскопической диагностики (CXRS) в измерениях параметров плазмы на установке ИТЭР / С. В. Серов, В. В. Серов, С. Н. Тугаринов // Материалы VIII Российской Конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение» 23—25 октября 2012 г. — НИЯУ «МИФИ», 2012. — с. 22.
14. *Serov, S. V.* Использование активной спектроскопической диагностики для измерений параметров плазмы на установке ИТЭР / С. В. Серов, В. В. Серов, С. Н. Тугаринов // Труды 55-й научной конференции МФТИ. Проблемы современной физики. 19—25 ноября 2012 г. — МФТИ, 2012. — с. 22.

## Список литературы

1. Progress in the ITER Physics Basis. Chapter 1: Overview and summary / M. Shimada [et al.] // Nuclear Fusion. — 2007. — Vol. 47, no. 6. — S1.
2. *Isler, R. C.* Observation of the Reaction  $H0 + O8+ \rightarrow H+ + O7+$  during Neutral-Beam Injection into ORMAK / R. C. Isler // Phys. Rev. Lett. — 1977. — Vol. 38, issue 23. — P. 1359—1362.

3. *Афросимов, В. В.* Возможности активной локальной диагностики ионов примесей в горячей плазме / В. В. Афросимов, Ю. С. Гордеев, А. Н. Зиновьев // Письма в ЖТФ. — 1977. — т. 3, № 3. — с. 97—100.
4. Локальные измерения ионной температуры по доплеровскому уширению водородной линии с использованием пучка быстрых атомов / Е. Л. Березовский [и др.] // Письма в ЖТФ. — 1982. — т. 8. — с. 1382.
5. Progress in the ITER Physics Basis. Chapter 7: Diagnostics / A. J. H. Donné [et al.] // Nuclear Fusion. — 2007. — Vol. 47, no. 6. — S337—S384.
6. *Summers, H. P.* The ADAS User Manual / H. P. Summers. — <http://www.adas.ac.uk/>.
7. *Hogan, J. T.* Calculation of hydrogen density in toroidal plasma / J. T. Hogan // Journal of Nuclear Materials. — 1982. — Vol. 111/112. — P. 413—419.
8. *Fonck, R. J.* Determination of plasma-ion velocity distribution via charge-exchange recombination spectroscopy / R. J. Fonck, D. S. Darrow, K. P. Jaehnig // Physical review A. — 1984. — Vol. 29, no. 6. — P. 3288—3309.
9. Simulation of Spectra Code (SOS) for ITER Active Beam Spectroscopy / M. von Hellermann [et al.] // Atoms. — 2019. — Vol. 7, no. 1.
10. *Reiter, D.* The EIRENE and B2-EIRENE Codes / D. Reiter, M. Baelmans, P. Börner // Fusion Science and Technology. — 2005. — Vol. 47, no. 2. — P. 172—186.
11. Модернизированная активная спектроскопическая диагностика (CXRS) токамака Т-10 / В. А. Крупин [и др.] // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. — 2014. — т. 37, № 4. — с. 60—70.
12. Charge Exchange Spectroscopy FIT — User Manual / A. D. Whiteford [et al.]. — 2007. — [http://www.adas.ac.uk/notes/adas\\_r07-01.pdf](http://www.adas.ac.uk/notes/adas_r07-01.pdf).
13. *Арцимович, Л. А.* Энергетический баланс ионов в плазме установок Токамак / Л. А. Арцимович, А. В. Глухов, М. П. Петров // Письма в ЖЭТФ. — 1970. — т. 11, № 9. — с. 449—452.
14. Применение кода CXSFIT для обработки экспериментальных данных активной спектроскопической диагностики токамака Т-10 / С. В. Серов [и др.] // Физика плазмы. — 2017. — т. 43, № 12. — с. 957—966.
15. Активная спектроскопическая диагностика ионной температуры плазмы на токамаке Т-10 / В. А. Крупин [и др.] // Физика плазмы. — 2013. — т. 39, № 8. — с. 712—724.
16. Impurities removal during central ECR heating in T-10 / L. A. Klyuchnikov [et al.] // 25th IAEA Fusion Energy Conference. — 2014.