

На правах рукописи

Яковлев Дмитрий Вадимович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭЦР НАГРЕВА ПЛАЗМЫ
В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ**

01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

БАГРЯНСКИЙ
Петр Андреевич — доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

СКВОРЦОВА
Нина Николаевна — доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт общей физики
им. А.М. Прохорова Российской академии
наук, г. Москва, ведущий научный сотрудник.

СИДОРОВ
Александр Васильевич — кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение Федеральный исследо-
вательский центр Институт прикладной
физики Российской академии наук, г. Нижний
Новгород, старший научный сотрудник.

ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ — Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе Российской
академии наук, г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится « 28 » декабря 2016 г.
в « 15:45 » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте и в библиотеке
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

П.А. Багрянский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Объектом исследования настоящей работы является метод электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева плазмы, применяемый в качестве дополнительного метода нагрева для увеличения электронной температуры плазмы в крупномасштабной магнитной ловушке открытого типа. Актуальность исследования ЭЦР нагрева плазмы в открытой ловушке определяется, с одной стороны, уникальными возможностями, которые предоставляет данный метод для решения ключевых вопросов физики удержания плазмы в таких системах, а с другой - отсутствием представлений об эффективности данного метода для увеличения термоядерного КПД установки реакторного класса, с учетом нетривиальных физических и технических особенностей его применения в установке такого типа.

Одним из физических вопросов является механизм продольных потерь энергии электронной компонентой плазмы в открытой ловушке. Несмотря на то, что на установке газодинамическая ловушка (ГДЛ) и других экспериментах была продемонстрирована эффективная термоизоляция плазмы от торцевой стенки при электронной температуре плазмы 200-300 эВ [1, 2], реактор на основе открытой ловушки, все же, предполагает существенную экстраполяцию параметров плазмы и определяющий вопрос о достижимости электронной температуры на уровне нескольких кэВ остается открытым. В связи с этим, метод ЭЦР нагрева плазмы, осуществляющий непосредственный нагрев электронов и обладающий самой высокой плотностью мощности среди распространенных методов нагрева плазмы, представляется как нельзя более подходящим инструментом.

Вторым вопросом является эффективность данного метода для увеличения термоядерного выхода реактора на основе открытой ловушки. Говоря более конкретно, в установке с основным нагревом плазмы при помощи мощной нейтральной инжекции, время удержания анизотропных плещущихся ионов определяется их торможением на электронах. При этом мощность потерь энергии быстрыми ионами в такой установке пропорциональна частоте электрон-ионного столкновения:

$$v_{ei} = \text{const} \cdot n_i Z^2 T_e^{-3/2},$$

где n_i – плотность ионов Z – заряд иона T_e – температура электронов.

Из последнего соотношения следует, что за счет увеличения электронной температуры можно добиться существенного увеличения времени удержания быстрых ионов, определяющих термоядерный выход установки.

Целями настоящей работы являются:

1. Проведение экспериментальной проверки работоспособности предложенной для ГДЛ схемы ЭЦР-нагрева плазмы.
2. Исследование влияния ЭЦР-нагрева на электронную температуру плазмы и на время удержания быстрых ионов.
3. Проверка существующей модели описания продольных потерь энергии при возросшей электронной температуре плазмы.
4. Исследование возможности создания начальной плазменной мишени при помощи СВЧ-пробоя газа.

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Часть работы по технической подготовке эксперимента, связанная с созданием системы управления комплексом ЭЦР нагрева и емкостного накопителя, интеграцией этих систем в комплекс ГДЛ, разработкой диагностических методов и их применением для сборки и настройки всех элементов системы ЭЦР нагрева, а также подготовка соответствующих публикаций были выполнены лично автором. Личным вкладом автора является получение экспериментальные данных, систематизация и обработка результатов экспериментов, формулировка задач для численного моделирования, участие в анализе результатов и подготовка публикаций по экспериментам с ЭЦР нагревом плазмы. В части работы, посвященной исследованию режимов с СВЧ-пробоем газа в ГДЛ, личным вкладом автора является постановка задачи, получение экспериментальных данных, их обработка и анализ, а также участие в обсуждении теоретической модели СВЧ-пробоя газа.

Научная новизна

В рамках данной работы впервые экспериментально проверена схема ввода микроволнового излучения в установку открытого типа, основывающаяся на рефракции излучения в плазме. Впервые в крупномасштабной открытой ловушке осуществлен эффективный ЭЦР нагрев тепловой компоненты плазмы, позволивший достичь рекордных для систем такого типа значений электронной температуры, в условиях установления баланса продольных потерь энергии. Более того, было экспериментально доказано, что в системе открытого типа можно добиться существенного увеличения времени удержания высокоэнергичных плещущихся ионов, при этом была оценена эффективность метода ЭЦР нагрева с точки зрения повышения термоядерного выхода установки. Впервые в крупномасштабной осесимметричной открытой ловушке были детально исследованы режимы с СВЧ-пробоем газа для генерации мишени плазмы, подходящей для старта разряда с мощной нейтральной инжекцией.

Научные положения, выносимые на защиту и их практическая значимость

1. В крупномасштабной магнитной ловушке открытого типа возможен ЭЦР нагрев плазмы, при котором вся поглощенная мощность передается тепловым электронам с начальной температурой около 100 эВ. Это открывает принципиальную возможность с одной стороны, увеличить время удержания ионов с энергиями термоядерного диапазона, а с другой - исследовать совокупность физических процессов, определяющих удержание в открытой магнитной ловушке плазмы с параметрами, адекватными задачам реализации управляемого термоядерного синтеза.
2. Использование рефракции пучка СВЧ излучения в плазме позволяет реализовать в открытых магнитных ловушках схему ввода излучения, представляющую альтернативу распространенным и трудно реализуемым в установках реакторного класса схемам с продольным вводом и схемам с внутренними зеркалами. При этом такая схема нагрева позволяет управлять пространственным распределением плотности поглощаемой мощности.
3. В крупномасштабной магнитной ловушке открытого типа возможно достижение температуры электронов, близкой к 1 кэВ. При таких температурах стационарная мощность продольных потерь в установке ГДЛ определяется газодинамическим истечением плазмы через пробки и на несколько порядков меньше мощности потерь, предсказываемой на основе классической электронной теплопроводности.
4. Применение ЭЦР нагрева позволяет увеличить время удержания ионов, сформированных при помощи нейтральной инжекции в плазму, что приводит к увеличению термоядерного КПД открытой ловушки с плещущимися ионами. При дополнительной СВЧ-мощности, составляющей $20 \pm 10\%$ от мощности нейтральной инжекции, увеличение интегральной мощности термоядерных реакций составляет не менее 80%.
5. ЭЦР пробой нейтрального газа позволяет создать мишенную плазму, подходящую для инициации разряда в крупномасштабной ловушке открытого типа с нейтральной инжекцией. Развитый в данной работе метод представляет собой альтернативу инжекции плазмы через магнитную пробку и является более предпочтительным в условиях существенно подавленного продольного потока плазмы, ожидающегося в установках следующего поколения.

Апробация диссертации

Материалы, на которых основана диссертация, докладывались на Семинаре плазменных лабораторий ИЯФ СО РАН, Международных

конференциях по физике плазмы и УТС (2013, 2014, 2015, 2016 г. Звенигород), Международной конференции по открытым системам для удержания плазмы (2012 - Япония, 2014 - Корея, 2016 - Россия), Международной конференции EPS по физике плазмы (2014 – Германия), Конференции МАГАТЭ по энергии термоядерного синтеза (2014 – Россия), опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах.

По результатам диссертации опубликовано 11 работ, все из них в периодических изданиях, входящих в рекомендуемый перечень ВАК [6-12, 15-18].

Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения.

В Главе 1 приведено описание установки ГДЛ, изложены элементы теории взаимодействия волн миллиметрового диапазона с плазмой, описана предложенная для ГДЛ схема ЭЦР нагрева плазмы.

В Главе 2 освещены общие вопросы физики удержания плазмы в ГДЛ, представлен сценарий эксперимента по ЭЦР нагреву плазмы и приведены его результаты.

В Главе 3 изложены результаты анализа экспериментальных данных по ЭЦР нагреву плазмы и предпринята попытка объяснения наблюдаемых явлений.

В Главе 4 изложены результаты экспериментов по СВЧ-пробое газа и генерации мишенной плазмы.

Полный объём диссертации составляет 127 страниц, включая 46 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 82 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Описание эксперимента

Установка газодинамическая ловушка в ИЯФ им. Будкера (рис. 1.1), принадлежит к классу осесимметричных магнитных ловушек открытого типа [1]. Удерживаемая в ГДЛ плазма состоит из двух энергетических фракций. Первая – популяция анизотропных «плещущихся» ионов, образующаяся в результате наклонной инжекции атомарных пучков. Время углового рассеяния быстрых ионов значительно превосходит время торможения на электронах плазмы, что позволяет сохранить высокую анизотропию функции распределения.

Вторая энергетическая фракция – теплая плазма, служит мишенью для захвата атомарных пучков, а также вносит вклад в стабилизацию кинетических неустойчивостей быстрых ионов. Ионы теплой плазмы и электроны удерживаются в газодинамическом режиме. Для оценок достаточно принять, что полная (ионная и электронная) мощность потерь при газодинамическом течении через магнитную пробку составляет [3]:

$$W = \text{const} \cdot T_e^{3/2},$$

Для подавления потерь плазмы, связанных с развитием желобковых неустойчивостей, в ГДЛ был разработан метод т.н. «вихревого удержания» [4]. Для этого на периферии плазмы при помощи электродов создается скачок потенциала, вызывающий дрейфовое вращение плазмы, препятствующее накоплению поляризационных зарядов и приводящий к насыщению желобковых мод на достаточно низком уровне.

В работе [5] были рассмотрены возможные способы осуществления ЭЦР нагрева плазмы в ГДЛ на частоте 54.5 ГГц. В результате, была предложена схема нагрева, согласно которой излучение вводится вблизи магнитных пробок ГДЛ через боковую границу плазмы в виде необыкновенной волны и за счет существенной рефракции в плазме достигает поверхности первой гармоники ЭЦ резонанса. С учетом рефракции, для плазмы ГДЛ возможно подобрать условия, при которых будет достигаться полное поглощение волны. Результаты данной работы инициировали проектирование системы ЭЦР нагрева для ГДЛ.

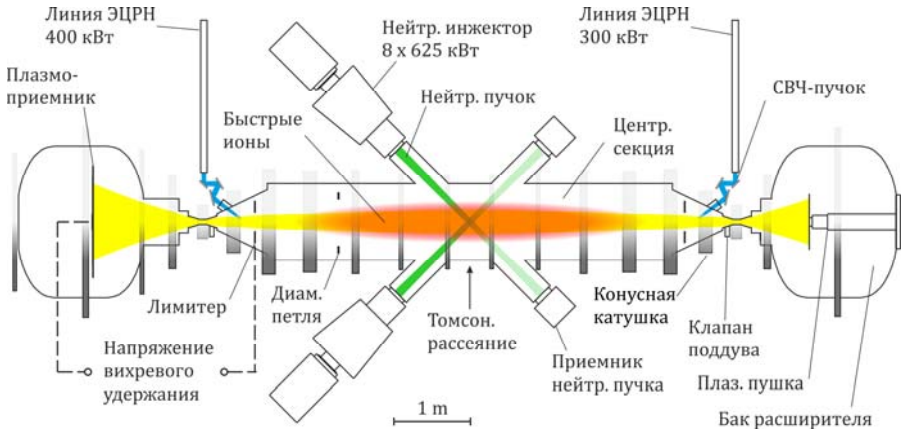


Рис. 1.1. Схема установки ГДЛ.

Созданная в 2013 году система ЭЦР нагрева базируется на двух гиротронах Буран-А с частотой генерации 54.5 ГГц и паспортной мощностью 450 кВт [6]. Для питания гиротронов в ИЯФ был создан высоковольтный импульсный модулятор, рассчитанный на напряжение 70 кВ при токе 25 А и длительности импульса до 4 мс [7].

Излучение гиротрона передается по алюминиевой сверхразмерной волноводной линии с внутренней гофрировкой, оканчивающейся системой зеркал для фокусировки излучения в плазму (рис. 1.1).

Существенной частью работ по настройке системы ЭЦР нагрева является последовательное проведение луча по оптическим элементам. Мощность гиротрона позволяет осуществлять центровку луча как при

помощи СВЧ-пробоя на металлизированной поверхности, так и при помощи наблюдения частично поглощающего экрана в ИК-диапазоне.

Для настройки гиротронов и передающей линии был разработан импульсный жидкостный калориметр, представляющий собой согласованную нагрузку и подключаемый в разрыв волноводной линии. С помощью калориметра были подобраны оптимальные параметры гиротронов, измерена их мощность, а также измерены потери в линиях, составившие около 10%.

Второй частью работы по технической подготовке системы ЭЦР-нагрева к экспериментам на установке ГДЛ стало создание автоматизированной системы управления [8] и питания гиротронов на основе программируемых контроллеров, осуществляющих контроль множества параметров комплекса и выполняющих набор автоматических процедур, обеспечивающих его автономное функционирование в составе установки ГДЛ.

Для экспериментов, изложенных в Главе 4, потребовалась существенная модернизация системы питания магнитного поля. Для этого была доработана законсервированная конденсаторная батарея емкостью 0.15 Ф и максимальным напряжением зарядки 6 кВ, что потребовало разработки нового зарядного устройства и системы управления, базирующихся на современных подходах к схемотехнике и автоматизации таких устройств [9].

Накопитель был интегрирован в общую систему питания катушек ГДЛ и подключен к двум последовательно соединенным магнитным катушкам (конусные катушки, рис. 1.1), расположенным в непосредственной близости к точке ввода СВЧ пучка, что позволило производить точную настройку магнитной конфигурации в области ЭЦ резонанса, в целом не изменяя для удержания плазмы в остальной части ловушки.

Глава 2. Результаты экспериментов

Типичная временная диаграмма разряда в ГДЛ представлена на рис. 2.1. Плазменную мишень для захвата пучков нейтральных атомов создает дуговой генератор плазмы («плазменная пушка»), установленный в одном из баков-расширителей ГДЛ (рис. 1.1). Плазма затекает в центральную секцию через магнитную пробку вдоль силовых линий.



Рис. 2.1. Временная диаграмма разряда в ГДЛ.

По достижении необходимой плотности плазменной мишени генератор отключается и включается нейтральная инжекция. Передача энергии быстрыми ионами мишени плазме приводит к нагреву электронной компоненты, которая, в свою очередь, передает энергию ионам мишени плазмы.

На рис. 2.1 (b) показан типичный сигнал с диамагнитной петли, расположенной в точке остановки быстрых ионов и осциллограмма напряжения на электродах вихревого удержания (c), которое включается одновременно с началом нейтральной инжекции.

Для первой экспериментальной кампании по ЭЦР-нагреву плазмы в ГДЛ система питания магнитных катушек была переконфигурирована таким образом, что необходимое усиление магнитного поля в области ввода излучения достигалось только для одной из линий ЭЦР нагрева за счет снижения поля с противоположной стороны. В результате максимальная вводимая СВЧ-мощность ограничивалась значением в 400 кВт.

На рис. 2.2 (слева) показан сценарий эксперимента по ЭЦР-нагреву плазмы и диамагнитный сигнал плазмы (a) в точке остановки быстрых ионов. Как видно из графика, через 400 – 500 мкс после начала СВЧ-импульса наблюдается резкое снижение давления быстрых ионов. Сигнал с диамагнитной петли, установленной в центральной плоскости ГДЛ, показывает аналогичную динамику. Согласно сигналу магнитного зонда (рис. 2.2), механизмом потери плазмы является раскачка амплитуды одной из низших мод желобковой неустойчивости.

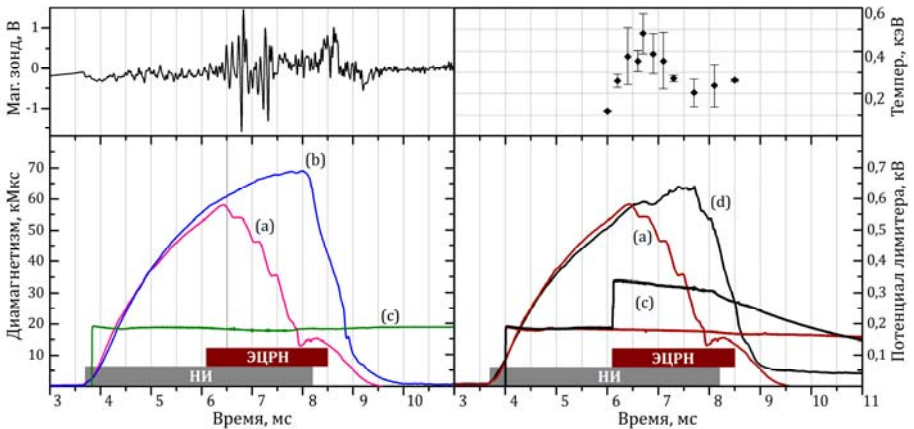


Рис. 2.2. Слева: сценарий эксперимента и график диамагнитного сигнала в точке остановки быстрых ионов в разряде с дополнительным ЭЦР-нагревом (a) и без него (b), (c) – потенциал лимитера. Верхний график – сигнал магнитного зонда, соответствующий разряду с дополнительным нагревом. Справа: диамагнитный сигнал быстрых ионов в режиме с ЭЦР нагревом и подачей дополнительного потенциала на лимитер (d). Верхний график – электронная температура на оси установки в разряде с ЭЦР нагревом и дополнительным потенциалом.

Измерения при помощи томсоновского рассеяния на оси установки показывают, что, несмотря на быстрый распад плазмы при включении СВЧ-мощности, успевает произойти существенный нагрев электронов. Электронная температура на оси установки непосредственно перед

включением СВЧ-нагрева составляет 200 эВ, а спустя всего лишь 0.3 мс ($t = 6.5$ мс) после включения ЭЦР-нагрева, согласно данным томсоновского рассеяния, электронная температура достигает значений до 460 эВ [10]. Анализ спектров рассеянного излучения, позволяет сделать вывод о том, что большая часть мощности, так или иначе, передается тепловой электронной компоненте. Несмотря на то, что высокое значение температуры поддерживается поддерживается в ГДЛ относительно недолго (~ 400 мкс), это время более чем на порядок превосходит время установления равновесного потока энергии вдоль открытых силовых линий, составляющее ~ 25 мкс.

Вторая экспериментальная кампания [11] по ЭЦР-нагреву плазмы в ГДЛ была осуществлена в магнитной конфигурации, позволяющей использовать две линии нагрева с суммарной вводимой в плазму СВЧ-мощностью до 700 кВт. При этом напряженность магнитного поля снизилась на 23% по всей длине ловушки, за исключением областей резонанса, что сказалось на электронной температуре плазмы, снизившейся с 200 – 250 эВ до 120 – 180 эВ, в зависимости от плотности плазмы и стадии разряда.

Первоначально было исследовано влияние положения поверхности циклотронного резонанса на параметры разряда при дополнительном ЭЦР-нагреве и было обнаружено две немного отличающиеся магнитные конфигурации, при которых СВЧ-излучение производило существенное различное воздействие на параметры разряда. Положения поверхностей ЭЦ резонанса, соответствующие этим двум случаям показаны на рис. 2.3 (левая панель).

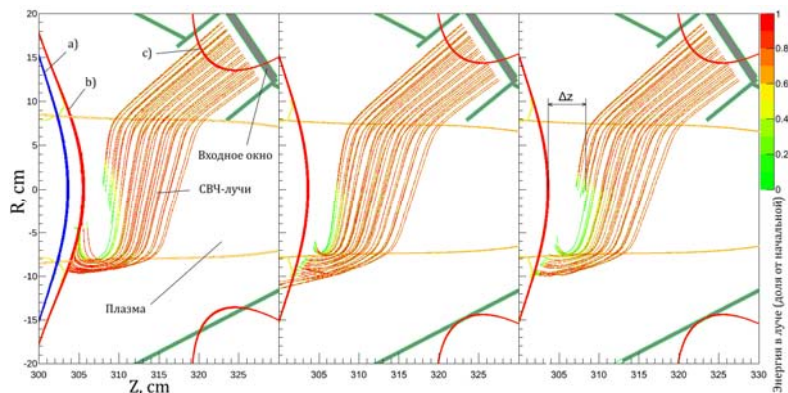


Рис. 2.3. Расчетные геометрооптические траектории лучей, составляющих микроволновый пучок, в плазме ГДЛ. На левой панели показаны поверхности ЭЦ резонанса, соответствующие узкому (а) и широкому (б) профилю поглощения СВЧ-мощности. Показана поверхность паразитного резонанса (с). Левая панель: лучевые траектории в магнитной конфигурации (б); Центральная панель: лучевые траектории в магнитной конфигурации (а) и температурой на оси 180 эВ; Правая панель: лучевые траектории в магнитной конфигурации (а) и температурой на оси 480 эВ.

Как будет показано далее, конфигурация (а) (рис. 2.3) соответствуют локализованному поглощению СВЧ-мощности в приосевой области плазмы и образованию «узкого» профиля электронной температуры. Конфигурация (б) соответствует «широкому» распределению поглощенной мощности. Последующие эксперименты были посвящены детальному исследованию этих отдельных случаев.

Эксперименты с узким профилем поглощения мощности

Целью следующей экспериментальной кампании стала стабилизация разряда и измерение радиальных профилей электронной температуры и плотности с ЭЦР нагревом и без него (рис. 2.4, левый). Как видно из графиков, при включении дополнительного нагрева электронная температура на оси установки увеличивается в 2.7 раза до значения 480 эВ. При этом нагрев происходит только в узкой приосевой области плазмы ($R < 5$ см), а в большей части плазменной колонны изменения температуры не происходит.

В следующей экспериментальной кампании была предпринята попытка увеличить пиковое значение электронной температуры, а также стабилизировать неустойчивость, возникающую при ЭЦР-нагреве. Для стабилизации плазмы была создана схема питания электродов вихревого удержания, позволяющая ступенчато добавлять к базовому значению потенциала на лимитерах дополнительный скачок в заданный момент времени. На графике диамагнитного сигнала (рис. 2.2, справа) видно, что дополнительный потенциал, поданный на лимитеры в момент включения ЭЦР-нагрева, позволяет предотвратить полную потерю быстрых ионов.

По графику электронной температуры от времени (рис. 2.2, справа) также видно, что дополнительный потенциал позволяет продлить стадию стабильного нагрева до 550 мкс. Однако, несмотря на то, что подавление неустойчивости больше не приводит к существенным потерям быстрых ионов, электронная температура на оси установки все же падает с ~ 500 эВ до уровня 250 – 300 эВ. Измерения профилей электронной температуры показывают, что, аналогично предыдущему эксперименту, ЭЦР-нагрев происходит в относительно узкой приосевой области плазмы.

Путем оптимизации параметров работы системы вихревого удержания и подбора плотности плазмы были найдены оптимальные условия для достижения пиковых значений электронной температуры плазмы. В последовательной серии из нескольких разрядов было получено среднее значение электронной температуры плазмы 660 ± 50 эВ. При этом максимальное значение, полученное в отдельном выстреле, составило 940 эВ [12].

Эксперименты с широким профилем поглощения мощности

В экспериментах в магнитной конфигурации (б) (рис. 2.3) ЭЦР-нагрев не приводит к развитию неустойчивости. Стабильный разряд в условиях дополнительного нагрева позволил увеличить длительность работы

гиротрона: во всех экспериментах данной серии ЭЦР-нагрев начинался на ранней стадии работы нейтральной инжекции и заканчивался вместе с ее выключением.

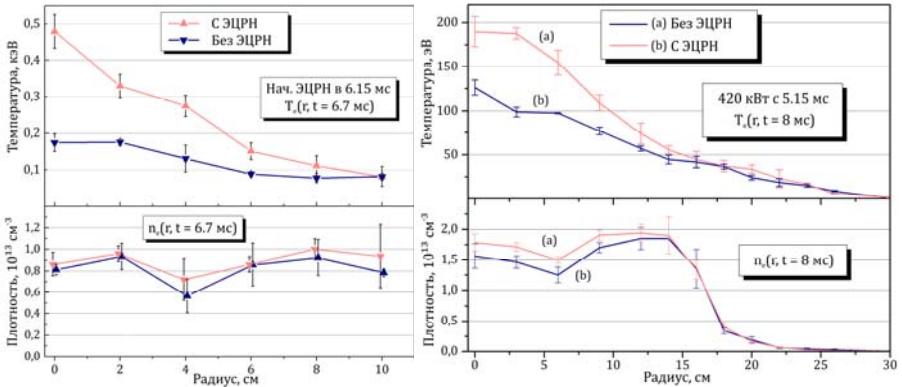


Рис. 2.4. Профили электронной температуры (верхний график) и плотности плазмы (нижний график) в режиме с дополнительным ЭЦР-нагревом (а) в условиях узкого (слева) и широкого (справа) распределения поглощённой СВЧ-мощности. Соответствующие профили в режиме без дополнительного нагрева (б).

На рис. 2.4 (справа) показаны профили электронной температуры и плотности плазмы в случае с дополнительным нагревом и без него. Увеличение электронной температуры на оси установки относительно невелико и составляет 44%, а усредненное по нескольким выстрелам значение составляет 180 эВ. При этом сам профиль электронной температуры значительно отличается от профиля, полученного в экспериментах с локализованным поглощением СВЧ-мощности (рис. 2.4, слева): увеличение электронной температуры происходит во всем сечении плазменного столба, вплоть до $r = 15$ см. Как видно из рис. 2.5, в разряде с дополнительным ЭЦР нагревом, наблюдается значительное (30%) увеличение диамагнитного сигнала быстрых ионов. При этом увеличение нейтронного потока D-D реакции составляет до 80%.

Если принять для оценки, что увеличение диамагнитного сигнала быстрых ионов соответствует пропорциональному увеличению их плотности в точках остановок, а полная функция распределения меняется незначительно, то увеличение интенсивности D-D реакции оказывается пропорциональным изменению диамагнитного сигнала, возведенному в квадрат. Данная оценка с достаточной точностью соответствует наблюдаемому в эксперименте изменениям диамагнитного сигнала и нейтронного потока. Отсюда можно сделать вывод о том, что в разрядах в магнитной конфигурации (b) (рис. 2.3) действительно происходит нагрев электронной компоненты плазмы, оказывающий существенное влияние на энергетическое время удержания быстрых ионов.

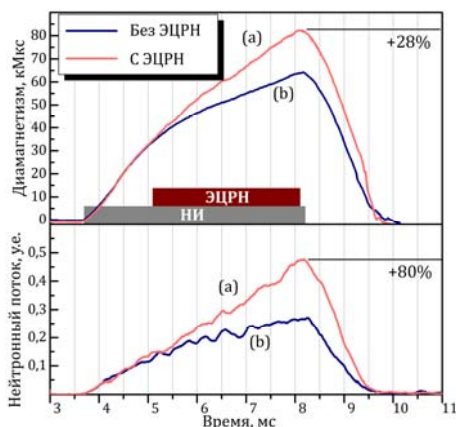


Рис. 2.5. Диамагнитный сигнал быстрых ионов в разряде с дополнительным ЭЦР нагревом (верхний график) в условиях широкого распределения поглощения СВЧ-мощности (а) и без дополнительного нагрева (б). Сигнал датчика потока нейтронов D-D реакции (нижний график) в случае с дополнительным нагревом (а) и без него (б).

Глава 3. Обсуждение экспериментов по ЭЦР нагреву плазмы

Режимы с узким профилем поглощения СВЧ-мощности

Одним из ключевых результатов является неожиданно большое увеличение электронной температуры плазмы при дополнительном ЭЦР-нагреве. Измерения профилей электронной температуры показали, что при определенной конфигурации магнитного поля в области ЭЦ резонанса, происходит локализованный нагрев приосевой области плазмы, мощность которого может значительно превосходить мощность нагрева быстрыми ионами.

Численный расчет распределения мощности, передаваемой плазме за счет торможения быстрых ионов, был проведен средствами пакета ITCS с модулем MCFIT [13]. Были использованы распределения электронной температуры и плотности в двух случаях – для режима с дополнительным ЭЦР-нагревом и без него.

Для расчета распределения поглощенной СВЧ-мощности в плазме были использованы профили электронной температуры и плотности для режима с «узким» ЭЦР нагревом. Расчетные траектории парциальных лучей микроволнового пучка в плазме показаны на рис. 2.3 (правая панель), а соответствующие радиальные профили поглощенной мощности на рис. 3.1 (слева).

Можно выделить две области, в которых происходит основное поглощение мощности. Около 68% мощности поглощается в далекой периферии плазмы $r > 20$ см, прямо проецирующейся на лимитер, и не оказывает влияния на энергобаланс. Остальные 30% или 210 кВт мощности поглощаются в узкой приосевой области $r < 7$ см. Однако, если сравнить это

значение с мощностью нагрева быстрыми ионами в этой же области плазмы - 20 кВт, то можно заключить, что ЭЦР нагрев является доминирующим механизмом нагрева. Запишем газодинамический энергобаланс для области $r < 7$ см для случая с дополнительным ЭЦР нагревом и без него:

$$\frac{T_e^{ECH}}{T_e^{NBI}} = \left(\frac{P^{ECH+NBI}}{P^{NBI}} \right)^{2/3}. \quad (3.1)$$

Для рассматриваемой области $P^{ECH+NBI} = 210 + 20$ кВт, а $P^{NBI} = 40$ кВт, откуда расчетное отношение T_e^{ECH} / T_e^{NBI} составляет ~ 3 , что согласуется с экспериментальным отношением значений электронной температуры на оси установки $T_e^{ECH} / T_e^{NBI} = 480 \text{ эВ} / 180 \text{ эВ} \approx 2.6$. Достаточно хорошее совпадение экспериментальных данных с расчетом позволяет заключить, что, несмотря на очевидное присутствие неустойчивостей в плазме при ЭЦР нагреве и дополнительном потенциале на лимитерах (рис. 2.2, справа), сохраняется газодинамический механизм потерь плазмы вдоль силовых линий.

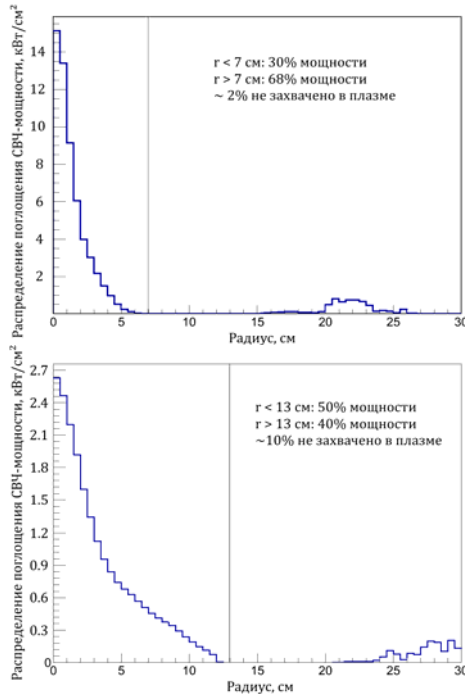


Рис. 3.1. Радиальное распределение поглощенной в плазме СВЧ-мощности, рассчитанное для профиля с узким (слева) и широким (справа) нагревом. Мощность проинтегрирована вдоль силовой трубки.

Нужно заметить, что в приосевой области может присутствовать дополнительный поперечный транспорт, вызванный огромным градиентом

температуры за счет пикированного профиля ЭЦР-нагрева. Это подтверждается тем фактом, что при сужении выбранной для оценки области плазмы скэйлинг (3.1) начинает показывать многократное расхождение с данными эксперимента. Например, если рассмотреть энергобаланс для дифференциально малой силовой трубки на оси установки, то профиль нагрева предсказывает увеличение электронной температуры в 20 раз – до 3.6 кэВ. В таких условиях естественно ожидать появления дополнительных (по отношению к кулоновским) поперечных транспортных процессов, эффективно приводящих к сглаживанию градиента температуры и приводящих к более пологому (по сравнению с профилем поглощенной СВЧ-мощности) профилю электронной температуры, наблюдаемому в эксперименте.

Режимы с широким профилем поглощения СВЧ-мощности

Для моделирования экспериментов с широким распределением поглощенной мощности были использованы профили электронной температуры и плотности фоновой плазмы, показанные на рис. 2.4. Целью данного расчета ставилось оценить эффект от ЭЦР нагрева на энергетическое время жизни быстрых ионов.

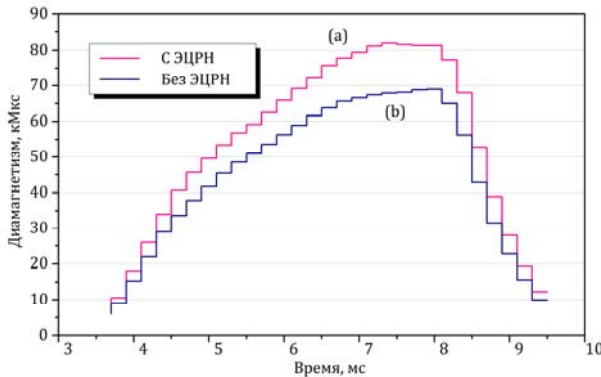


Рис. 3.2. Зависимости диамагнитного сигнала быстрых ионов от времени, рассчитанные для профилей, соответствующих режимам с дополнительным ЭЦР нагревом (а) и без него (б).

На рис. 3.2 показана временная зависимость диамагнитного сигнала быстрых ионов, рассчитанная при помощи MCFIT. Как динамика, так и абсолютные значения диамагнитного сигнала хорошо согласуются с экспериментальными данными (рис. 2.5). Расчетное увеличение энергосодержания быстрых ионов составило 20%, что ниже значения 28%, наблюдаемого в эксперименте. Энергетическое время жизни быстрых ионов можно оценить по формуле $\tau_h = W/P$, где W – энергосодержание быстрых ионов, а P – мощность дргга. В итоге, увеличение τ_h , согласно расчету, составило 20%: с $\tau_h = 1$ мс до $\tau_h = 1.2$ мс. Однако, если принять во внимание

указанное выше превышение экспериментально измеренного энерго-содержания ионов над расчетным, то можно оценить окончательное увеличение энергетического времени жизни быстрых ионов как $\sim 30\%$.

Профиль поглощенной СВЧ-мощности, рассчитанный по профилю электронной температуры на рис. 2.4 с ЭЦР нагревом (справа), показан на рис. 3.1 (справа). Сравнение с распределением на рис. 3.1 (слева), наглядно демонстрирует, что в данном эксперименте СВЧ-мощность достигает более широкой области плазмы, вплоть до $r = 12$ см.

Применяя газодинамический скейлинг (3.1) для двух сравниваемых режимов, получаем $T_e^{\text{ECH}} / T_e^{\text{NBI}} \approx 1.33$, что также достаточно близко к экспериментально измеренному значению $T_e^{\text{ECH}} / T_e^{\text{NBI}} = 1.42$.

Глава 4. Эксперименты с созданием плазмы при помощи СВЧ-пробоя

В рамках данной работы была проведена отдельная серия экспериментов, в которой мишенная плазма создавалась при помощи СВЧ-пробоя нейтрального газа микроволновым пучком [14]. Возможность такого пробоя и накопления мишенной плазмы не была предсказана заранее и была обнаружена в процессе экспериментов по ЭЦР-нагреву.

Задача создания начальной плазменной мишени в ГДЛ сводится к накоплению и поддержанию плазмы с достаточной плотностью и радиальным профилем, совместимым с существующей системой нейтральной инжекции.

Аналогично стандартной последовательности в режиме с плазменной пушкой, в вакуумную камеру предварительно напускается нейтральный газ в течение импульса длительностью 10 мс. На рис. 4.1 представлена осциллограмма линейной плотности плазмы, образующейся при инжекции СВЧ-пучка в нейтральный газ.

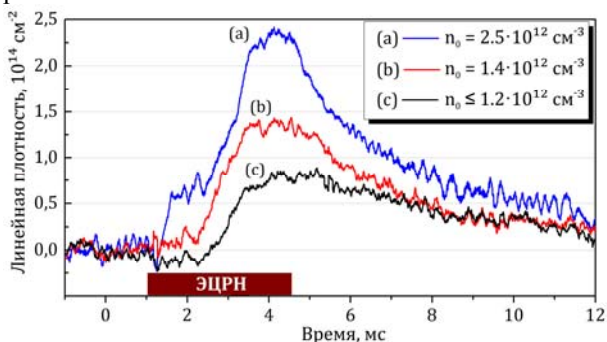


Рис. 4.1. Линейная плотность плазмы в режиме с СВЧ-пробоем и варьируемой начальной концентрацией нейтрального газа.

После короткой стадии пробоя происходит рост оптической толщины плазмы для СВЧ-луча и начинается рост линейной плотности плазмы. Спустя

1 – 2 мс линейная плотность плазмы достигает уровня насыщения. После выключения гиротрона и при отсутствии нейтральной инжекции накопленная плазма начинает распадаться с характерным временем 3 – 5 мс.

В первой серии экспериментов было исследовано влияние вводимой мощности гиротрона на процесс генерации начальной плазмы. Было обнаружено, что осциллограммы линейной плотности плазмы практически не отличаются при значениях мощности свыше 150 кВт. При снижении мощности ниже этого значения постепенно начинает спадать как уровень насыщения плотности, так и скорость ее нарастания.

Также была проведена серия разрядов, в которых изменялось положение поверхности циклотронного резонанса. В случае, когда ток в конусной катушке достаточно мал, луч вообще не пересекает поверхность ЭЦ-резонанса. В этом случае не наблюдается роста линейной плотности выше уровня шумов. Данный экспериментальный факт подтверждает гипотезу о резонансном характере разряда, для которого существенно поглощение мощности на первом проходе СВЧ-пучком основного циклотронного резонанса. Смещение же поверхности ЭЦ-резонанса от магнитной пробки не влияет на рост линейной плотности.

В следующей серии разрядов было определено влияние количества напускаемого в вакуумную камеру газа на линейную плотность плазмы. Для изменения начального давления изменялась длительность работы клапанов системы газонапуска ГДЛ. Как видно из графиков линейной плотности (рис. 4.1), уровень насыщения монотонно зависит от начальной концентрации газа. Наибольшее значение линейной плотности, измеренной в эксперименте составило $3 \cdot 10^{14}$ см⁻². Достижение более высоких значений было ограничено пробоем в линии ЭЦР-нагрева, развивающимся при слишком больших длительностях импульса напуска газа.

Типичный диамагнитный сигнал быстрых ионов в разряде с нейтральной инжекцией, инициированный при помощи СВЧ-пробоя, показан на рис. 4.2. В течение первых 1 – 2 мс после включения нейтральной инжекции наблюдается существенное отличие этих сигналов в разряде с СВЧ-пробоем и плазменной пушкой. В первом случае, доля захваченной в плазме мощности нейтральной инжекции стартует со значения < 10% и плавно нарастает до значения ~ 40%, в то время как в разряде с плазменной пушкой эта величина составляет ~ 50% в начальные моменты времени и спадает к концу разряда.

В отдельной серии экспериментов было исследовано влияние параметров генерируемой плазменной мишени на последующий разряд с нейтральной инжекцией. В частности, исследовалось влияние значения линейной плотности мишенной плазмы в момент включения нейтральной инжекции. Для этого варьировалась длительность импульса СВЧ на стадии генерации плазменной мишени при неизменных параметрах импульса напуска газа.

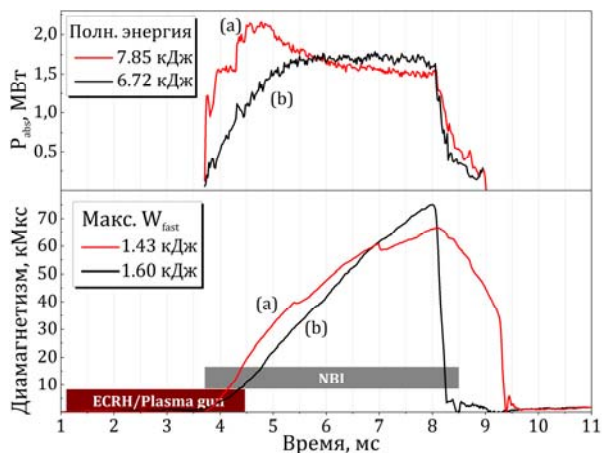


Рис. 4.2. Диамагнитный сигнал быстрых ионов (нижний) и график захваченной в плазме мощности нейтральной инжекции (верхний) для разрядов, инициированных при помощи плазменной пушки (а) и СВЧ-пробоя (б).

Было обнаружено, что при снижении линейной плотности сначала происходит удлинение переходного процесса, в течение которого происходит рост плотности плазмы, обусловленный накоплением быстрых ионов. Однако при снижении линейной плотности ниже порогового значения $\sim 0.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ с некоторой вероятностью происходит полный распад плазмы и накопления быстрых ионов не происходит. Доля захваченной в мишенной плазме мощности нейтральной инжекции, соответствующая данному пограничному случаю $\sim 5\%$ или $\sim 250 \text{ кВт}$. Оптимальным значением линейной плотности для ГДЛ можно назвать значение $\sim 1.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, которое позволяет осуществлять быстрый старт разряда, в целом аналогичный разряду с дуговым генератором плазмы.

Параметры плазмы на развитой стадии нейтральной инжекции ($t = 6 - 8 \text{ мс}$) аналогичны разряду, инициированному дуговым генератором: типичные значения электронной температуры на оси установки лежат в диапазоне $180 - 200 \text{ эВ}$. При этом важным преимуществом СВЧ-пробоя является улучшение вакуумных условий в торцевых баках ГДЛ на 1-2 порядка по сравнению с режимами с дуговым генератором плазмы.

Параметры плазмы на развитой стадии нейтральной инжекции ($t = 6 - 8 \text{ мс}$) аналогичны разряду, инициированному дуговым генератором: типичные значения электронной температуры на оси установки лежат в диапазоне $180 - 200 \text{ эВ}$. При этом важным преимуществом СВЧ-пробоя является улучшение вакуумных условий в торцевых баках ГДЛ на 1-2 порядка по сравнению с режимами с дуговым генератором плазмы.

Заключение

В работе была показана работоспособность предложенной схемы ввода микроволнового излучения в плазму. В ходе экспериментов по ЭЦР нагреву было обнаружено, что происходит поглощение существенной доли вводимой в плазму мощности, приводящее к росту электронной температуры. При этом, было установлено, что распределение магнитного поля в области ЭЦР резонанса существенно влияет на профиль поглощенной в плазме мощности, который может быть восстановлен по измеряемому распределению электронной температуры.

1. Во-первых, были обнаружены режимы разряда, в которых происходит значительное увеличение времени удержания быстрых ионов за счет увеличения электронной температуры плазмы. Измерения радиальных профилей плотности и температуры позволили провести более детальный расчет распространения и поглощения волнового пучка в плазме. В целом, расчеты подтвердили изначальную идею о захвате излучения в плазме, а расчетные профили поглощенной мощности с удовлетворительной точностью совпали с профилями продольных газодинамических потерь, оцененных по увеличению электронной температуры. Увеличение времени удержания быстрых ионов, полученное из диамагнитных сигналов и подтвержденное соответствующим увеличением нейтронного потока D-D реакции, составило около 30%. При этом добавка к захваченной мощности нейтральной инжекции от ЭЦР нагрева составляла 10 – 28% (210 – 420 кВт от 1.5 – 2 МВт). Полученные результаты являются достаточно обнадеживающими с точки зрения перспектив применения ЭЦР нагрева в установке следующего поколения, особенно с учетом возможностей дальнейшей оптимизации распределения поглощенной СВЧ-мощности.

2. Во-вторых, в экспериментах был обнаружен эффект своеобразной "фокусировки" микроволнового излучения, проявляющийся в локализации нагрева в узкой приосевой области плазмы радиусом менее 5 см. Данному эффекту, обусловленному низким градиентом магнитного поля в области ЭЦР-резонанса, было дано более точное объяснение при помощи численных расчетов распространения волнового пучка в плазме с использованием измеренных радиальных профилей. Было показано, что фокусировка может приводить к многократному увеличению локальной мощности ЭЦР нагрева, способному увеличить электронную температуру плазмы в 2–4 раза. Утверждается, что узкий профиль нагрева может приводить к конвективным явлениям в центральной области плазмы, приводящим, в лучшем случае к перераспределению температуры плазмы, а в худшем – к полной ее потере за счет возбуждения желобковой неустойчивости. Эксперименты с увеличением напряжения вихревого удержания показали, что распад плазмы (но не внутренние конвективные процессы) можно предотвратить. За время устойчивого нагрева, составляющего до ~ 500 мкс, электронная температура достигает значений близких к 1 кэВ, что является рекордом для

квазиэлектронных магнитных ловушек открытого типа и превышает ранее достигнутые значения более чем в 3 раза. Наиболее важным выводом является то, что и в случае с локализованным энерговкладом для центральной нагретой области плазмы выполняется газодинамический скэйлинг продольных потерь. При этом предполагается, что за ограничение пикового значения температуры отвечают отмеченные выше конвективные процессы.

3. В-третьих, в рамках данной работы был опробован новый способ создания мишенной плазмы при помощи пробоя газа микроволновым пучком. Резонансное поглощение излучения приводит к накоплению плазмы с плотностью, достаточной для самоподдерживающегося захвата пучков нейтральных атомов. Было показано, что разряд, инициированный СВЧ-пробоем, практически не отличается по динамике и характеристикам плазмы от разряда с плазменной пушкой. Новый способ старта разряда продемонстрировал свои преимущества с точки зрения улучшения вакуумных условий в торцевых баках и устранения асимметрии потоков плазмы, связанных с работой дугового генератора. Большой объем экспериментальных данных, полученных в данной работе привел к созданию теоретической модели СВЧ-пробоя и накопления плазмы, дающей объяснение большинству наблюдаемых зависимостей.

Список литературы

- [1] Ivanov A. A. and Prikhodko V. V. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2013. no. 55. P. 006301
- [2] Simonen T. C., Horton R. // *Nucl. Fusion*. 1989. Vol. 29, no. 8. P. 1373.
- [3] Мирнов В. В., Ткаченко О. А. // Препринт ИЯФ 86-28. 1986.
- [4] Beklemishev A. D., Bagryansky P. A., Chaschin M. S., Soldatkina E. I. // *Fusion Sci. Technol*. 2010. Vol. 57, no. 4. P. 351–360.
- [5] Shalashov A. G., Gospodchikov E. D., Smolyakova O. B. et al. // *Phys. Plasmas*. 2012. Vol. 19. P. 052503.
- [6] Bagryansky P. A., Shalashov A. G., Gospodchikov E. D. et al. et Yakovlev D. V. // *Fusion Sci. Technol*. 2013. Vol. 63, no. 1T. P. 40–45.
- [7] Савкин В. Я., Яковлев Д. В. // *Приборы и техника эксперимента*. 2015. № 6. С. 35–38.
- [8] Коваленко Ю. В., Яковлев Д. В. // *Приборы и техника эксперимента*. 2014. № 5. С. 93–98.
- [9] Коваленко Ю. В., Пурескин Д. Н., Савкин В. Я. и др. в т.ч. Яковлев Д. В. // *Приборы и техника эксперимента*. 2016. № 5. С. 1–6.

- [10] Bagryansky P. A., Kovalenko Y. V., Savkin V. Y. et al. et Yakovlev D. V.// Nucl. Fusion. 2014. Vol. 54, no. 8. P. 082001.
- [11] Bagryansky P. A., Anikeev A. V., Denisov G. G. et al. et Yakovlev D. V. // Nucl. Fusion 2015. Vol. 55, no. 5. P. 053009.
- [12] Bagryansky P., Shalashov A., Gospodchikov E. et al. et Yakovlev D. V.// Phys. Rev. Lett. 2015. no. 114. P. 205001.
- [13] Anikeev A. V., Bagryansky P. A., Beklemishev A. D. et al. et Yakovlev D. V.// Materials. 2015. Vol. 8, no. 12. P. 8452–8459.
- [14] Yakovlev D. V., Shalashov A. G., Gospodchikov E. D. et al. // arXiv:1607.01051 (Submitted to Nucl. Fusion). 2016.
- [15] Соломахин А. Л., Багрянский П. А., Коваленко Ю. В. и др. в т.ч. Яковлев Д. В. 2014 Вестник НГУ: серия физика 9 2 13-22
- [16] Anikeev A.V., Bagryansky P.A., Beklemishev A.D et al. et Yakovlev D. V. 2015 Fusion Sci. Technol 68 1 1-7
- [17] Anikeev A.V., Bagryansky P.A., Beklemishev A.D et al. et Yakovlev D. V. 2015 Fusion Sci. Technol 68 1 15-20
- [18] Bagryansky P.A., Gospodchikov E.D., Kovalenko Yu.V. et al., et Yakovlev D. V. 2015 Fusion Sci. Technol 68 1 87-91J.A.

ЯКОВЛЕВ Дмитрий Вадимович

**Экспериментальное исследование
ЭЦР нагрева плазмы в газодинамической ловушке**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 12.10.2016 г.

Подписано в печать 14.10.2016 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.3 усл. печ.л., 1.1 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 21

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринтере ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11