

На правах рукописи



ХАБАНОВ Филипп Олегович

**ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАНИЙ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА И ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ  
В ТОКАМАКЕ T-10 И СТЕЛЛАРАТОРЕ TJ-II**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Специальность **01.04.08** – Физика плазмы

Москва

2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

**Научный руководитель:** **Мельников Александр Владимирович**  
доктор физико-математических наук,  
заместитель руководителя Отделения токамаков  
Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и  
плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт»,  
г. Москва.

**Официальные оппоненты:** **Скворцова Нина Николаевна**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник Отдела физики плазмы  
Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
г. Москва;

**Яшин Александр Юрьевич**  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник научно-исследовательской  
лаборатории управляемого термоядерного синтеза Санкт-  
Петербургского политехнического университета Петра  
Великого, г. Санкт-Петербург.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ», г. Москва.

Защита диссертации состоится 22 апреля 2020 г., начало в 15-00, на заседании диссертационного совета Д 520.009.02 на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте [www.nrcki.ru](http://www.nrcki.ru).

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 520.009.02  
кандидат физико-математических наук

Ю.В. Капустин

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы диссертации

Управляемый термоядерный синтез (УТС) является на сегодняшний день одним из главных кандидатов на роль источника энергии для будущих поколений человечества. Наиболее перспективными установками для реализации УТС являются токамаки [1] и стеллараторы [2] – квазистационарные тороидальные магнитные ловушки, позволяющие удерживать плазму, разогретую до высоких температур. Более 60 лет исследования в области магнитного удержания высокотемпературной плазмы были направлены на увеличение времени удержания энергии и частиц в плазме термоядерной установки [3, 4]. Благодаря многолетним усилиям ученых и инженеров всего мира достигнута возможность создания экспериментального термоядерного реактора на базе токамака. Строительство международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР (ITER – International Thermonuclear Experimental Reactor) началось в 2010 году в исследовательском центре Кадараш, Франция. Его задачей является демонстрация научной и технической возможности получения положительного выхода термоядерной энергии ( $Q \geq 10$ ) на установке типа токамак. В случае успеха проект ИТЭР станет отправной точкой для создания первой термоядерной электростанции ДЕМО. Однако предположение об удержании плазмы в ИТЭР основано на скейлингах – эмпирических законах подобия, выведенных из экспериментальных данных, полученных на различных установках мира [5]. К сожалению, до сих пор не существует полной теории, описывающей удержание горячей плазмы в магнитном поле. В 60-х годах XX века была разработана неоклассическая теория переноса энергии и частиц поперек удерживающего магнитного поля, учитывающая парные кулоновские столкновения частиц в тороидальной магнитной геометрии [6–8]. Уже тогда сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными показало, что реальные коэффициенты

переноса значительно превосходят предсказания теории, являются аномальными. Сегодня причиной аномального переноса считают возбуждение в плазме мелкомасштабных дрейфовых неустойчивостей (турбулентности), выносящих частицы поперек магнитного поля. Подавление турбулентности может быть вызвано зональными течениями [9, 10] или широм скорости вращения в скрещенных радиальном электрическом и тороидальном магнитном полях ( $E \times B$  шир) [11–13].

Таким образом, изучение характеристик турбулентности, развивающейся в плазме, является важной задачей на пути к пониманию процессов переноса и, как следствие, к надежным предсказаниям режимов работы будущих термоядерных реакторов. Изучение мелкомасштабных быстро протекающих турбулентных процессов в плазме требует развития высокоточных методов диагностики. Одним из таких методов является зондирование плазмы пучком тяжелых ионов (Heavy Ion Beam Probe - HIBP) – многоцелевая диагностика, позволяющая измерять электрический потенциал, плотность электронов и их колебания в горячей области плазменного шнура установок с магнитным удержанием [14]. Данная работа направлена на расширение возможностей HIBP в сторону изучения колебаний плотности плазмы, а также на исследование электростатической турбулентности с помощью HIBP.

### **Степень разработанности темы исследования**

Зондирование пучком тяжелых ионов широко используется для изучения как средних значений, так и колебаний электрического потенциала и плотности плазмы в установках с магнитным удержанием плазмы (токамаки T-10 (РФ, НИЦ «Курчатовский институт»), TEXT (США), JRPRT-2U (Япония), JFT-2M (Япония), ISTTOK (Португалия) и ТУМАН-3М (РФ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН); стеллараторы LHD (Япония), TJ-II (Испания), CHS (Япония); пинч с обратным полем MST (США); линейная ловушка GAMMA-10 (Япония)). На токамаке TEXT в омическом режиме с помощью пучка ионов  $Ti^+$  с энергией до 2 МэВ были измерены радиальные зависимости

электрического потенциала, а также были предприняты первые попытки по измерению длин волн, полоидальных корреляционных длин и фазовых скоростей возмущений плотности на периферии плазменного шнура [15, 16]. На токамаках T-10 (пучок  $Tl^+$ , энергия до 330 кэВ) и ТУМАН-3М (пучок  $K^+$ , энергия до 70 кэВ) с использованием НВР изучались свойства геодезических акустических мод (ГАМ) [17, 18]. Исследования ГАМ на T-10 выявили трехволновое взаимодействие между ГАМ и широкополосной турбулентностью [19], однако свойства широкополосных колебаний плотности, измеренных с помощью НВР, ранее подробно не изучались. Также на T-10 не оценивалось влияние интегральных эффектов (path-integral effect [20, 21]) на измерение колебаний плотности с помощью НВР. На стеллараторе CHS с помощью НВР (пучок ионов  $Cs^+$  с энергией 70 кэВ) в импульсе с низкой плотностью ( $\bar{n}_e \leq 0.6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ) были восстановлены радиальные профили плотности электронов [22]. На стеллараторе TJ-II диагностика НВР потенциально позволяет проводить подобные измерения, в том числе при более высоких плотностях  $\bar{n}_e$ , но задача восстановления профилей плотности электронов из сигналов НВР ранее на TJ-II не была решена. Эволюция профиля плотности в течение импульса ранее не изучалась. На стеллараторе LHD при измерениях временной эволюции электрического потенциала плазмы (пучок ионов  $Au^+$  с энергией до 6 МэВ) использовалась система контроля положения пучка на детекторе с обратной связью, которая удерживала пучок в центре детектора. Однако данная система могла работать только при фиксированном положении области наблюдения НВР в плазме и не позволяла удерживать пучок в центре детектора при работе НВР в режиме сканирования [23]. Также на LHD в режиме с комбинированным нагревом были построены пространственные распределения средних значений электрического потенциала плазмы [24, 25] и его колебаний [26]. Размер исследованной пространственной области составлял примерно 10-15% площади сечения плазменного шнура, чего было

недостаточно, чтобы делать выводы о наличии или отсутствии полоидальной асимметрии в распределениях измеренных величин. В отличие от LHD, на TJ-II детекторная сетка диагностики НВР покрывает значительную часть вертикального сечения плазменного шнура, что делает возможным изучение полоидальной асимметрии распределений средних значений электрического потенциала и его колебаний.

Таким образом, существует ряд отдельных важных задач, предварительные подходы к решению которых были сделаны на других установках, однако тема диссертации ранее не изучалась.

### **Цели и задачи**

Целью данной работы является изучение структуры колебаний электрического потенциала и плотности плазмы в установках токамак T-10 и стелларатор TJ-II с помощью зондирования плазмы пучком тяжелых ионов.

В ходе работы решались следующие задачи:

1. Рассчитать траектории пучка зондирующих ионов в магнитном поле установок токамак T-10 и стелларатор TJ-II.
2. Создать систему автоматической коррекции тороидального смещения зондирующего пучка на детекторе НВР.
3. Провести моделирование измерений колебаний плотности плазмы с помощью зондирования плазмы пучком тяжелых ионов на токамаке T-10. Целью моделирования была оценка степени локальности измерений плотности, которое определяется соотношением откликов сигнала НВР на возмущения плотности, расположенные внутри и вне области измерений.
4. Измерить радиальные профили электрического потенциала плазмы в режимах с омическим нагревом в токамаке T-10 ( $B_t = 2.42$  Тл,  $I_{pl} = 220$  кА,  $\bar{n}_e = 1\text{-}3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ) и в режимах с ЭЦР нагревом в стеллараторе TJ-II ( $\bar{n}_e < 0.8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ,  $P_{\text{ЭЦР}} < 455$  кВт) с использованием зондирования плазмы

пучком тяжелых ионов. Сравнить полученные результаты с измерениями зондом Ленгмюра на периферии плазмы.

5. Измерить радиальные профили плотности плазмы в стеллараторе TJ-II в режиме с ЭЦР нагревом с использованием зондирования плазмы пучком тяжелых ионов.
6. Провести измерения спектров колебаний плотности в плазме токамака T-10 в частотном диапазоне до 450 кГц с помощью НВР.
7. Провести измерения колебаний электрического потенциала и плотности плазмы в стеллараторе TJ-II в частотном диапазоне до 450 кГц с помощью НВР и построить двумерные пространственные распределения измеренных параметров в вертикальном сечении плазмы.

### **Научная новизна**

1. На токамаке T-10 впервые осуществлена коррекция тороидального смещения зондирующего пучка на детекторе диагностики НВР в режиме реального времени. С ее помощью впервые проведены измерения электростатического потенциала плазмы и его колебаний на стадии подъема тока плазмы.
2. Впервые с помощью зондирования плазмы пучком тяжелых ионов на стеллараторе TJ-II измерены радиальные профили плотности плазмы.
3. Определена чувствительность диагностики НВР к локальным возмущениям плотности плазмы в токамаке T-10. Показано, что возмущение плотности плазмы вне области наблюдения НВР дает вклад в измеряемый сигнал, пренебрежимо малый ( $\leq 5\%$ ) по сравнению с возмущением плотности внутри области наблюдения.
4. Впервые построены двумерные пространственные распределения средних значений электрического потенциала, а также колебаний электрического потенциала и плотности электронов в вертикальном сечении плазмы стелларатора TJ-II.

### Теоретическая и практическая значимость работы

1. В ходе работы модернизирована диагностика пучком тяжелых ионов на токамаке T-10: спроектировано, изготовлено, установлено и налажено устройство автоматической коррекции тороидального смещения диагностического пучка на детекторе. Это позволило существенно расширить диапазон параметров разряда, при которых возможно проведение измерений, в частности, появилась возможность проводить измерения в нестационарных режимах с подъемом тока плазмы (от 100 до 300 кА) и при включении/отключении мощного ЭЦР нагрева ( $P_{\text{ЭЦР}} \leq 1.7 \text{ МВт}$ ).
2. Разработана и применена методика восстановления радиальных профилей плотности плазмы по сигналу полного тока зондирующего пучка на детекторе в стеллараторе TJ-II. В результате применения методики появилась возможность:
  - исследовать временную эволюцию профиля плотности плазмы, измеряя до 40 профилей в течение одного разряда;
  - получать дополнительную по отношению к данным томсоновского рассеяния информацию о профиле плотности в градиентной области  $0.6 < |r| < 1$ , недоступной для томсоновского рассеяния на TJ-II;
  - одновременно измерять временную эволюцию профилей плотности электронов и электрического потенциала плазмы;
  - измерять профили плотности плазмы в режимах с низкими значениями среднечордовой плотности ( $\bar{n}_e < 0.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ), недоступных для других диагностик.

Информация об одновременной эволюции профилей потенциала и плотности имеет важное значение для теоретического анализа и моделирования турбулентности и переноса в плазме.
3. Показано, что диагностика НИВР может быть использована для изучения локальных колебаний плотности плазмы благодаря пренебрежимо



малому вкладу в измеряемый сигнал возмущений плотности, находящихся вне области наблюдения. Размеры области наблюдения – области вторичной ионизации зондирующего пучка в плазме – определяют пространственное разрешение метода, как правило, оно составляет от 0.5 до 2 см.

4. Отработана методика измерения пространственных (двумерных) распределений электрического потенциала, его колебаний и колебаний плотности плазмы в вертикальном сечении стелларатора TJ-II с помощью НИВР. Исследованы значения измеряемых параметров на стороне сильного (High Field Side, HFS) и слабого (Low Field Side, LFS) магнитного поля. Полученные пространственные распределения не выявили LFS-HFS асимметрии для средних значений и среднеквадратичного отклонения потенциала, однако выявили асимметрию среднеквадратичных отклонений плотности, что имеет важное значение для верификации результатов гирокинетического моделирования плазменной турбулентности.

### **Методология и методы исследования**

Для исследования электрического потенциала и плотности плазмы, а также колебаний этих параметров на установках токамак T-10 и стелларатор TJ-II был использован один и тот же диагностический метод - зондирование плазмы пучком тяжелых ионов (НИВР).

Измеренные с помощью НИВР радиальные зависимости электрического потенциала сравнивались с измерениями зонда Ленгмюра (Langmuir probe - LP) на периферии плазменного шнура [27, 28].

Для построения спектров и спектрограмм экспериментальных сигналов использовалось оконное преобразование Фурье.

Задача восстановления радиального профиля плотности электронов из сигнала полного тока пучка на детекторе на стеллараторе TJ-II решалась методом квазирешений с помощью минимизации квадратичного

функционала невязки между экспериментальным и модельным (расчетным) сигналом полного тока. Минимизация производилась квазиньютоновским методом Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno - BFGS) [29], реализованным в библиотеке SciPy для языка программирования Python. Для определения скоростных коэффициентов ионизации зондирующих частиц в плазме стелларатора TJ-II использовались радиальные профили температуры электронов, полученные с помощью диагностики томсоновского рассеяния [30]. Профили плотности электронов, восстановленные из сигналов полного тока пучка на детекторе, сравнивались с результатами измерений томсоновского рассеяния.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. На токамаке T-10 колебания тока зондирующего пучка ионов диагностики НИВР отражают локальные возмущения плотности плазмы. Показано, что в исследованном широком диапазоне плотности ( $\bar{n}_e < 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ) возмущение плотности плазмы вне области наблюдения НИВР дает вклад в измеряемый сигнал тока, пренебрежимо малый ( $\leq 5\%$ ) по сравнению с возмущением плотности внутри области наблюдения.
2. Разработана и применена методика измерения радиальных профилей плотности плазмы с помощью НИВР в стеллараторе TJ-II в режиме с ЭЦР нагревом.
3. На стеллараторе TJ-II в режиме с ЭЦР нагревом и низкой плотностью ( $\bar{n}_e \leq 0.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ) двумерное распределение электрического потенциала и его колебаний в вертикальном сечении плазмы является симметричным (одинаковым на стороне сильного и слабого магнитного поля) в пределах экспериментальной погрешности  $\pm 50 \text{ В}$  для средних значений, и  $\pm 5 \text{ В}$  для среднеквадратичного отклонения.
4. На стеллараторе TJ-II в режиме с ЭЦР нагревом и низкой плотностью ( $\bar{n}_e \leq 0.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ) двумерное распределение колебаний плотности в

вертикальном сечении плазмы является асимметричным: среднеквадратичное отклонение  $\delta n_e/n_e$  достигает минимума на половине радиуса плазменного шнура и составляет на HFS  $\approx 3\%$ , на LFS  $\approx 2\%$ . Асимметрия вызвана различием в амплитудах электростатических квазикогерентных колебаний в диапазоне частот  $f < 100$  кГц.

### **Личный вклад автора**

В диссертации представлены результаты четырех лет работы автора в отделе Т-10 Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт».

Автор участвовал в подготовке и проведении экспериментов на токамаке Т-10 и стеллараторе ТЖ-II с использованием зондирования плазмы пучком тяжелых ионов. Автор самостоятельно проводил измерения, обрабатывал и систематизировал полученные экспериментальные данные, рассчитывал траектории зондирующего пучка в установках Т-10 и ТЖ-II. Автором было изготовлено устройство автоматической коррекции тороидального смещения пучка на детекторе, успешно примененное на токамаке Т-10. Автором на языке Python были написаны программы для расчета ослабления пучка в плазме установок Т-10 и ТЖ-II, для расчета отклика полного тока зондирующего пучка на колебания плотности плазмы в токамаке Т-10, а также программа для восстановления радиального профиля плотности плазмы в стеллараторе ТЖ-II.

Результаты, приведенные в диссертации, были получены автором лично или при его определяющем участии.

### **Апробация работы**

Результаты работы были представлены автором на семинарах «Т» в ККТЭиПТ НИЦ «Курчатовский институт», семинарах Национальной лаборатории термоядерного синтеза научного центра CIEMAT (Мадрид, Испания), на международных и всероссийских конференциях:

1. Хабанов Ф.О. Анализ локальности измерений колебаний плотности плазмы с помощью зондирования пучком тяжелых ионов / Хабанов Ф.О. // XV Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа, НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, 2017 г.
2. Хабанов Ф.О. Измерение электрического потенциала плазмы в омических режимах токамака Т-10 с помощью диагностики пучком тяжелых ионов / Хабанов Ф.О., Драбинский М.А., Елисеев Л.Г., Зенин В.Н., Мельников А.В., Харчев Н.К., Грашин С.А. // 60-я научная конференция МФТИ, г. Москва, 2017 г.
3. Хабанов Ф.О. Двумерное распределение электрического потенциала в плазме стелларатора ТЖ-II / Хабанов Ф.О., Харчев Н.К., Мельников А.В., Шарма Р., Идальго К. // 61-я Всероссийская научная конференция МФТИ, г. Москва, 2018 г.
4. Хабанов Ф.О. Исследование полоидального вращения плазмы в токамаке Т-10 с помощью диагностики НИБР / Хабанов Ф.О., Мельников А.В., Елисеев Л.Г., Драбинский М.А., Харчев Н.К., Лысенко С.Е., Зенин В.Н. // XLVI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 2019 г.
5. Khabanov Ph.O. Plasma density profile reconstruction using NIBP in the TJ-II stellarator / Khabanov Ph.O., Eliseev L.G., Melnikov A.V., Drabinskiy M.A., Chmyga A.A., Kozachek A.S., Pastor I., de Pablos J.L., Hidalgo C., Shevelko V. P. // 3<sup>rd</sup> European Conference on Plasma Diagnostics, Lisbon, 2019. P2.56.

### **Список основных публикаций автора по теме диссертации**

Результаты диссертации изложены в 8 статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. 7 статей проиндексированы в базах данных Web of Science и Scopus.

1. Melnikov A.V. Heavy ion beam probing—diagnostics to study potential and turbulence in toroidal plasmas / Melnikov A.V., Krupnik L.I., Eliseev L.G., Barcala J.M., Bravo A., Chmyga A.A., Deshko G.N., Drabinskij M.A., Hidalgo

- C., Khabanov P.O., Khrebtov S.M., Kharchev N.K., Komarov A.D., Kozachek A.S., Lopez J., Lysenko S.E., Martin G., Molinero A., De Pablos J.L., Soletto A., Ufimtsev M.V., Zenin V.N., Zhezhera A.I. // *Nuclear Fusion* – 2017. – Т. 57 – № 7 – P.072004.
2. Хабанов Ф.О. Численный анализ локальности измерений колебаний плотности плазмы с помощью зондирования пучком тяжелых ионов / Хабанов Ф.О. // *Computational nanotechnology* – 2018. – № 1 – С.25–30.
  3. Melnikov A. V. ECRH effect on the electric potential and turbulence in the TJ-II stellarator and T-10 tokamak plasmas / Melnikov A. V., Krupnik L.I., Ascasibar E., Cappa A., Chmyga A.A., Dешко G.N., Drabinskij M.A., Eliseev L.G., Hidalgo C., Khabanov P.O., Khrebtov S.M., Kharchev N.K., Komarov A.D., Kozachek A.S., Lysenko S.E., Molinero A., de Pablos J.L., Ufimtsev M. V., Zenin V.N. // *Plasma Physics and Controlled Fusion* – 2018. – Т. 60 – P.084008.
  4. Khabanov P.O. The study of the radial location of quasi-coherent modes by heavy ion beam probe in the TJ-II stellarator / Khabanov P.O., Eliseev L.G., Kharchev N.K., Hidalgo C., Kozachek A.S., Krupnik L.I., Lysenko S.E., Melnikov A.V., Chmyga A.A., Dешко G.N., Khrebtov S.M., Komarov A.D., Molinero A., de Pablos J.L. // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics* – 2018. – № 6 – P.317–320.
  5. Melnikov A.V. Heavy ion beam probe design and operation on the T-10 tokamak / Melnikov A.V., Drabinskiy M.A., Eliseev L.G., Khabanov P.O., Kharchev N.K., Krupnik L.I., de Pablos J.L., Kozachek A.S., Lysenko S.E., Molinero A., Igonkina G.B., Sokolov M.M. // *Fusion Engineering and Design* – 2019. – Т. 146 – P.850–853.
  6. Vershkov V.A. 3D structure of density fluctuations in the T-10 tokamak and new approach for current profile estimation / Vershkov V.A., Buldakov M.A., Subbotin G.F., Shelukhin D.A., Melnikov A. V, Eliseev L.G., Kharchev N.K., Khabanov P.O., Drabinskiy M.A., Sergeev D.S., Myalton T.B., Trukhin V.M., Gorshkov A. V, Belbas I.S., Asadulin G.M. // *Nuclear Fusion* – 2019. – Т. 59 –

- № 6 – P.066021.
7. Ascasíbar E. Overview of recent TJ-II stellarator results / Ascasíbar E., Alba D., Alegre D., ... Khabanov P., ... Zurro B. // Nuclear Fusion – 2019. – Т. 59 – № 11 – P.112019.
  8. Khabanov P.O. Density profile reconstruction using HIBP in ECRH plasmas in the TJ-II stellarator / Khabanov P.O., Eliseev L.G., Melnikov A.V., Drabinskiy M.A., Hidalgo C., Kharchev N.K., Chmyga A.A., Kozachek A.S., Pastor I., de Pablos J.L., Cappa A., Shevelko V.P. // Journal of Instrumentation – 2019. – Т. 14 – P.C09033.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, одного приложения, перечня основных сокращений и условных обозначений и списка литературы. В диссертации 114 страниц печатного текста, в том числе 58 рисунков и список литературы из 102 наименований.

### **Содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и основные задачи работы. Также кратко описана степень разработанности темы исследования, отмечены особенности диагностики плазмы пучком тяжелых ионов, отличающие данный метод от других методов диагностики плазмы, сделан обзор результатов, полученных с помощью HIBP на других тороидальных установках с магнитным удержанием плазмы.

**Первая глава** посвящена описанию схемы эксперимента по зондированию плазмы пучком тяжелых ионов и диагностических комплексов HIBP на токамаке T-10 и стеллараторе TJ-II.

В **разделе 1.1** подробно описаны принципы работы диагностики плазмы пучком тяжелых ионов. Электрический потенциал плазмы измеряется по разности энергий однозарядных ионов, инжектируемых в плазму, и

двухзарядных ионов, покидающих плазму. Обсуждается расчет скоростных коэффициентов ионизации электронным ударом для пучка ионов в плазме. Описана конструкция анализатора энергии типа «плоское зеркало», который используется для измерения энергии покидающих плазму ионов зондирующего пучка, испытавших ионизацию в плазме. Также описаны принципы измерения с помощью НВР колебаний электрического потенциала и плотности электронов, радиального турбулентного потока частиц и фазовой скорости вращения колебаний плотности.

В разделе 1.2 приведено описание диагностического комплекса по зондированию плазмы пучком тяжелых ионов на токамаке T-10. Описана аппаратура для создания и инжекции в плазму пучка тяжелых ионов  $Tl^+$  и регистрации покидающих плазму ионов  $Tl^{2+}$ . Приведены сечения ионизации  $Tl^+$  электронным и протонным ударом; показано, что в условиях плазмы токамака T-10 ионизация электронным ударом является доминирующим процессом при образовании вторичных ионов  $Tl^{2+}$ .

В разделе 1.3 приведено описание двойной диагностики плазмы пучком тяжелых ионов на стеллараторе TJ-II. Две независимые системы НВР расположены в разных полоидальных сечениях, тороидально разнесенных на 90 градусов. Описана аппаратура для создания и инжекции в плазму пучка тяжелых ионов  $Cs^+$  и регистрации покидающих плазму ионов  $Cs^{2+}$ . Показано, что в условиях плазмы стелларатора TJ-II ионизация электронным ударом является доминирующим процессом при образовании вторичных ионов  $Cs^{2+}$ .

**Вторая глава** посвящена расчету и верификации траекторий зондирующих ионов диагностики НВР в магнитном поле установок T-10 и TJ-II.

В разделе 2.1 подробно описан алгоритм работы программ, которые используются для расчетов траекторий зондирующих ионов в токамаке T-10 и стеллараторе TJ-II. Программы работают по одному алгоритму и отличаются только геометрией установок и распределением магнитного поля. Определить положение области наблюдения диагностики НВР можно

только с помощью расчета, поэтому далее обсуждаются три способа его экспериментальной верификации:

1. рассчитать полный ток вторичного пучка на детекторе и удостовериться в совпадении его формы с формой экспериментального сигнала; удостовериться в радиальной симметрии электрического потенциала;
2. проверить, насколько расчетная граница плазмы совпадает с границей измеренных профилей полного тока пучка и потенциала плазмы

Приведена верификация траекторий всеми тремя способами, показана корректность и непротиворечивость расчета. Представлены радиальные профили электрического потенциала в режиме с омическим нагревом с  $B_t = 2.42$  Тл,  $I_{pl} = 220$  кА, измеренные при различных значениях среднехордовой плотности  $\bar{n}_e = 1, 2, 2.4, 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

В разделе 2.2 описаны особенности расчета траекторий зондирующих ионов в стеллараторе TJ-II, и показана верификация расчета способами, перечисленными в разделе 2.1. Также показана корректность и непротиворечивость расчета. Представлены радиальные профили электрического потенциала, измеренные в стандартной магнитной конфигурации TJ-II в режиме с центральным ЭЦР нагревом при двух значениях среднехордовой плотности:  $0.46$  и  $0.77 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

В разделе 2.3 представлено описание разработанного устройства автоматической коррекции тороидального смещения зондирующего пучка на детекторе диагностики НВР на токамаке T-10. Устройство, основанное на микроконтроллере STM32F303, оцифровывает усиленные сигналы с детекторных пластин, рассчитывает величину тороидального смещения  $\zeta$ , и подает на корректирующие пластины необходимое напряжение для удержания диагностического пучка в центре детектора. Устройство позволило проводить достоверные измерения при включении мощного ЭЦР нагрева, а также на стадии подъема тока плазмы. Измерения электрического потенциала плазмы с помощью НВР на стадии подъема тока в T-10 были



проведены впервые. Представлены экспериментальные данные с использованием устройства и без него как при фиксированном положении области наблюдения НВР, так и в режиме сканирования.

**Третья глава** посвящена расширению возможностей диагностики НВР для измерения плотности электронов в стеллараторе TJ-II и для измерения ее колебаний в плазме токамака T-10.

В **разделе 3.1** описан метод измерения радиального профиля плотности электронов в стеллараторе TJ-II с помощью диагностики НВР. Подчеркнуты преимущества разработанного метода перед другими диагностиками, такими как томсоновское рассеяние и диагностический гелиевый пучок.

Как известно, полный ток вторичного пучка ионов на детекторе  $I_{\text{tot}}$  связан с плотностью электронов  $n_e$  следующим образом:

$$I_{\text{tot}}(r_{\text{SV}}) = 2I_0 n_e(r_{\text{SV}}) \sigma_{\text{eff}12}(r_{\text{SV}}) \lambda(r_{\text{SV}}) \exp(-R_1 - R_2), \quad (1)$$

$$R_1 = \int_{r_{\text{in}}}^{r_{\text{SV}}} n_e(s) \sigma_{\text{eff}12}(s) ds,$$

$$R_2 = \int_{r_{\text{SV}}}^{r_{\text{out}}} n_e(s) \sigma_{\text{eff}23}(s) ds,$$

где  $r_{\text{SV}}$  – радиус области наблюдения,  $r_{\text{in}}$  – радиус точки влета в плазму,  $r_{\text{out}}$  – радиус точки вылета из плазмы,  $I_0$  – ток первичного пучка,  $\lambda$  – длина области наблюдения вдоль траектории,  $\sigma_{\text{eff}ij}$  – эффективное сечение ионизации из состояния  $i$  в состояние  $j$  ( $\sigma_{\text{eff}ij} = \langle \sigma_{ij} v \rangle / v_b$ ,  $\sigma_{ij}$  – сечение ионизации из состояния  $i$  в  $j$ ,  $v$  – тепловая скорость электронов,  $v_b$  – скорость зондирующих ионов,  $\langle \sigma_{ij} v \rangle$  – скоростной коэффициент ионизации,  $\langle \rangle$  – усреднение по максвелловскому распределению электронов). Для восстановления радиального профиля плотности электронов из профиля полного тока необходимо решать обратную задачу для уравнения (1). В разделе подробно описан метод решения данной задачи и приведены результаты восстановления радиальных профилей  $n_e(\rho)$  в двух режимах TJ-II с центральным ЭЦР нагревом:  $P_{\text{ЭЦР}} = 225$  кВт,  $\bar{n}_e = 0.43 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  и  $P_{\text{ЭЦР}} = 455$  кВт,  $\bar{n}_e = 0.8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Показано, что восстановленные профили

плотности электронов согласуется с данными диагностики томсоновского рассеяния в пределах экспериментальных ошибок.

В разделе 3.2 рассмотрены вопросы чувствительности полного тока пучка на детекторе НВР к колебаниям плотности в плазме токамака Т-10. Для этого было проведено моделирование отклика полного тока пучка на возмущение плотности вида:

$$\delta n = \delta n_0 \cdot \exp\left(-\left(\frac{r - r_0}{\Delta r}\right)^2\right) \cdot \cos(m\theta)$$

где  $r_0$  – положение локального возмущения плотности,  $\Delta r$  – радиальный размер возмущения,  $m$  – полоидальное модовое число (соответственно, длина волны возмущения  $\lambda = 2\pi r_0/m$ ),  $\delta n_0$  – амплитуда возмущения,  $\theta$  – полоидальный угол. Рассматривались возмущения с различными амплитудами и полоидальными модовыми числами. Показана линейность зависимости амплитуды колебаний полного тока пучка от амплитуды колебаний плотности электронов в плазме. Также изучена чувствительность полного тока вторичного пучка к возмущениям плотности электронов с разными полоидальными модовыми числами, показано, что размеры области наблюдения – области вторичной ионизации зондирующего пучка - определяют пространственное разрешение метода. Показано, что возмущение плотности, расположенное вне области наблюдения, дает вклад в колебания полного тока пучка пренебрежимо малый ( $\leq 5\%$ ), по сравнению с возмущением внутри области наблюдения. Таким образом, диагностика НВР может быть использована как диагностика для изучения локальных колебаний плотности плазмы.

В разделе 3.3 приведены спектры мощности колебаний электрического потенциала и плотности плазмы, измеренные с помощью НВР на токамаке Т-10 в режиме с  $B_t = 2.32$  Тл,  $I_{pl} = 230$  кА и  $\bar{n}_e = 2.3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , локализованных в области наблюдения, расположенной на  $r_{SV} \approx 23$  см. Также приведены спектры когерентности и кросс-фазы между колебаниями потенциала, измеренными одновременно в нескольких областях наблюдения,

расположенных на одном радиусе и разнесенных полоидально. Такой же анализ проведен и для колебаний плотности плазмы. Описаны наблюдаемые типы колебаний. Данные измерений с помощью НВР являются подтверждением измерений колебаний плотности, проведенных на T-10 с помощью корреляционной рефлектометрии.

**Четвертая глава** посвящена эксперименту по измерению двумерных распределений электрического потенциала, его колебаний и колебаний плотности в полоидальном сечении стелларатора TJ-II в режиме с центральным ЭЦР нагревом.

В **разделе 4.1** подробно описана схема эксперимента. В серии из 11 воспроизводимых импульсов TJ-II с центральным ЭЦР нагревом ( $P_{\text{ЭЦР}} = 450$  кВт) и среднечордовой плотностью  $\bar{n}_e = 0.4-0.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  энергия зондирующего пучка диагностики НВР менялась в диапазоне 128-148 кэВ. При этом диагностика НВР работала в режиме сканирования – область наблюдения периодически сдвигалась от стороны слабого поля ( $\rho = 1$ ) к стороне сильного поля ( $\rho = -1$ ) и обратно. От импульса к импульсу энергия пучка менялась с шагом в 2 кэВ, что соответствовало вертикальному сдвигу детекторной линии на 1-1.5 см. В результате была исследована область, покрывающая примерно 20% полоидального сечения плазменного шнура.

В **разделе 4.2** приведены двумерные распределения электрического потенциала. Показано, что линии уровней двумерного распределения оказываются близки к линиям вакуумных магнитных поверхностей в вертикальном сечении, однако положение максимума потенциала смещено вверх на  $\approx 2$  см относительно магнитной оси, что может быть связано с неточностью расчетов положения областей наблюдения. Построенное двумерное распределение является симметричным относительно направления сторона слабого поля – сторона сильного поля (LFS-HFS) в рамках экспериментальной ошибки  $\pm 50$  В.

В разделе 4.3 приведены двумерные распределения среднеквадратичных отклонений (Root Mean Square – RMS) сигналов электрического потенциала и полного тока пучка на детекторе НВР, отражающего относительные колебания плотности электронов. Показано, что максимум RMS потенциала составляет 40-50 В, и его положение смещено на  $\approx 2$  см вверх относительно магнитной оси, также как положение максимума его абсолютных значений. Минимум RMS потенциала ( $\approx 15-20$  В) расположен в области  $\rho \approx 0.5-0.6$ , далее с увеличением  $\rho$  величина RMS быстро нарастает. В области  $|\rho| < 0.75$  полученное двумерное распределение RMS потенциала плазмы не показывает асимметрии LFS-HFS в пределах экспериментальной ошибки  $\pm 5$  В.

Также показано, что положение максимума двумерного распределения RMS относительных колебаний плотности электронов совпадает с центром плазменного шнура и составляет  $\approx 0.05$ . Кроме того, была обнаружена полоидальная асимметрия колебаний: RMS колебаний плотности в радиальном диапазоне  $0.4 < |\rho| < 0.7$  на стороне сильного поля выше, чем на стороне слабого поля.

В разделе 4.4 приведены спектры мощности относительных колебаний плотности, измеренные с помощью НВР. Показано, что спектр относительных колебаний плотности неоднороден по радиусу: он состоит из низкочастотных ( $f < 20$  кГц) колебаний на периферии и в центре шнура, а также квазикогерентных мод на частотах 20-30 и 50-60 кГц, амплитуды которых выше на стороне сильного поля. Таким образом, асимметрия двумерного распределения колебаний плотности вызвана асимметрией амплитуд квазикогерентных мод на стороне сильного и слабого поля. Подобные моды ранее наблюдались на стеллараторе TJ-II их свойства подробно описаны в работе [31].

В заключении изложены основные результаты. В ходе проведенного исследования решены следующие задачи:

1. Было спроектировано, изготовлено, установлено, налажено и применено в экспериментальной практике устройство автоматической коррекции тороидального смещения диагностического пучка на детекторе. Это позволило существенно расширить диапазон параметров разряда токамака T-10, при которых возможно проведение измерений с помощью диагностики НІВР.
2. Проведено моделирование измерений колебаний плотности в плазме токамака T-10 с помощью диагностики НІВР. Определена чувствительность диагностики к возмущениям плотности внутри и вне области измерений.
3. Рассчитаны траектории зондирующих ионов диагностики НІВР в плазме токамака T-10 и стелларатора TJ-II. На основе расчетов построены радиальные профили электрического потенциала плазмы в режимах с омическим нагревом в токамаке T-10 и в режиме с ЭЦР нагревом в стеллараторе TJ-II.
4. Разработана и применена методика восстановления из сигналов НІВР радиального профиля плотности электронов в плазме стелларатора TJ-II. Измерены радиальные профили плотности в режиме с ЭЦР нагревом и среднечордовой плотностью  $\bar{n}_e < 0.8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .
5. Проведены измерения колебаний плотности в плазме токамака T-10 с использованием НІВР.
6. Отработана методика измерения пространственных (двумерных) распределений электрического потенциала, его колебаний и колебаний плотности плазмы в стеллараторе TJ-II с помощью НІВР.

### Заключение

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Верификация расчетов траекторий зондирующих ионов по экспериментальным данным, полученным на токамаке T-10 и

стеллараторе TJ-II, подтверждает корректность расчетов в реальной геометрии установок.

2. Показано, что на токамаке T-10 возмущение плотности плазмы вне области наблюдения диагностики НИВР дает вклад в измеряемый сигнал, пренебрежимо малый ( $\leq 5\%$ ) по сравнению с возмущением плотности внутри области наблюдения. Пространственное разрешение метода определяют размеры области наблюдения – области вторичной ионизации зондирующего пучка в плазме. Таким образом, показано, что НИВР может быть использована как диагностика для изучения локальных колебаний плотности плазмы в рабочем диапазоне плотностей.
3. В результате построения пространственных (двумерных) распределений электрического потенциала, а также колебаний (стандартного отклонения RMS в диапазоне частот до 500 кГц) потенциала и плотности плазмы в стеллараторе TJ-II в режиме с центральным ЭЦР нагревом, показана полоидальная симметрия средних значений электрического потенциала в пределах экспериментальной ошибки  $\pm 50$  В. Также показана полоидальная симметрия колебаний электрического потенциала в смысле постоянства величины среднеквадратичного отклонения на магнитной поверхности (LFS-HFS) в пределах экспериментальной ошибки  $\pm 5$  В. Обнаружена полоидальная (LFS-HFS) асимметрия колебаний плотности: амплитуда относительных колебаний плотности на HFS  $\approx 3\%$ , на LFS  $\approx 2\%$ . Установлено, что ее причиной является асимметрия амплитуд квазикогерентных электростатических колебаний в частотном диапазоне  $f < 100$  кГц.

## Список цитируемой литературы

1. Wesson J. Tokamaks / J. Wesson – Oxford University Press, 2004. Вып. 3.
2. Spitzer L. The Stellarator Concept / Spitzer L. // IEEE Transactions on Plasma Science – 1981. – Т. 9 – № 4 – С.130–141.
3. Кадомцев Б.Б. От МТР до ИТЭР / Кадомцев Б.Б. // Успехи Физических Наук – 1996. – Т. 166 – № 5 – С.449–458.
4. Azizov E.A. Tokamaks: from A D Sakharov to the present (the 60-year history of tokamaks) / Azizov E.A. // Uspekhi Fizicheskikh Nauk – 2012. – Т. 182 – № 2 – С.202.
5. Shimada M. ITER Physics Basis. Chapter 1: Overview and summary / Shimada M., Campbell D.J., Mukhovatov V., Fujiwara M., Kirneva N., Lackner K., Nagami M., Pustovitov V.D., Uckan N., Wesley J., Asakura N., Costley A.E., Donné A.J.H., Doyle E.J., Fasoli A., Gormezano C., Gribov Y., Gruber O., Hender T.C., Houlberg W., Ide S., Kamada Y., Leonard A., Lipschultz B., Loarte A., Miyamoto K., Osborne T.H., Polevoi A., Sips A.C.C. // Nuclear Fusion – 2007. – Т. 47 – № 6.
6. Галеев А.А. “Неоклассическая” теория диффузии / Галеев А.А., Сагдеев Р.З. // Вопросы теории плазмы – 1973. – № 7 – С.205–273.
7. Арцимович Л.А. Физика плазмы для физиков / Л. А. Арцимович, Р. З. Сагдеев – Москва: АТОМИЗДАТ, 1979.
8. Rosenbluth M.N. Plasma transport in toroidal confinement systems / Rosenbluth M.N., Hazeltine R.D., Hinton F.L. // Physics of Fluids – 1972. – Т. 15 – № 1 – С.116–140.
9. Diamond P.H. Zonal flows in plasma—a review / Diamond P.H., Itoh S.-I., Itoh K., Hahm T.S. // Plasma Physics and Controlled Fusion – 2005. – Т. 47 – № 5 – С.R35–R161.
10. Kim E. Zonal Flows and Transient Dynamics of the L-H Transition / Kim E., Diamond P.H. // Physical Review Letters – 2003. – Т. 90 – № 18 – С.185006.
11. Burrell K.H. Effects of ExB velocity shear and magnetic shear on turbulence

- and transport in magnetic confinement devices / Burrell K.H. // *Physics of Plasmas* – 1997. – T. 4 – № 5 – C.1499–1518.
12. Staebler G.M. New paradigm for suppression of gyrokinetic turbulence by velocity shear / Staebler G.M., Waltz R.E., Candy J., Kinsey J.E. // *Physical Review Letters* – 2013. – T. 110 – C.055003.
  13. Xu G.S. Low-to-High Confinement Transition Mediated by Turbulence Radial Wave Number Spectral Shift in a Fusion Plasma / Xu G.S., Wan B.N., Wang H.Q., Guo H.Y., Naulin V., Rasmussen J.J., Nielsen A.H., Wu X.Q., Yan N., Chen L., Shao L.M., Chen R., Wang L., Zhang W. // *Physical Review Letters* – 2016. – T. 116 – № 9 – C.1–5.
  14. Melnikov A.V. Heavy ion beam probing—diagnostics to study potential and turbulence in toroidal plasmas / Melnikov A.V., Krupnik L.I., Eliseev L.G., Barcala J.M., Bravo A., Chmyga A.A., Deshko G.N., Drabinskij M.A., Hidalgo C., Khabanov P.O., Khrebtov S.M., Kharchev N.K., Komarov A.D., Kozachek A.S., Lopez J., Lysenko S.E., Martin G., Molinero A., Pablos J.L. de, Soletto A., Ufimtsev M.V., Zenin V.N., Zhezhera A.I. // *Nuclear Fusion* – 2017. – T. 57 – № 7 – C.072004.
  15. Yang X.Z. The space potential in the tokamak text / Yang X.Z., Zhang B.Z., Wootton A.J., Schoch P.M., Richards B., Baldwin D., Brower D.L., Castle G.G., Hazeltine R.D., Heard J.W., Hickok R.L., Li W.L., Lin H., McCool S.C., Simcic V.J., Ritz C.P., Yu C.X. // *Physics of Fluids B* – 1991. – T. 3 – № 12 – C.3448–3461.
  16. Heard J.W. Broadband density fluctuation measurements using a heavy ion beam probe on the Texas Experimental Tokamak / Heard J.W., Crowley T.P., Schoch P.M., Hickok R.L., Ross D.W., Zhang B.Z., Yang X.Z. // *Physics of Plasmas* – 1995. – T. 2 – C.3360.
  17. Melnikov A. V. The features of the global GAM in OH and ECRH plasmas in the T-10 tokamak / Melnikov A. V., Eliseev L.G., Perfilov S. V., Lysenko S.E., Shurygin R. V., Zenin V.N., Grashin S.A., Krupnik L.I., Kozachek A.S., Solomatin R.Y., Elfimov A.G., Smolyakov A.I., Ufimtsev M. V., Team T.H. //



Nuclear Fusion – 2015. – T. 55 – № 6 – C.63001.

18. Askinazi L.G. Evolution of Geodesic Acoustic Mode in Ohmic H Mode in TUMAN 3M Tokamak / Askinazi L.G., Vildjunas M.I., Zhubr N.A., Komarov A.D., Kornev V.A., Krikunov S. V., Krupnik L.I., Lebedev S. V., Rozhdestvensky V. V., Tendler M., Tukachinsky A.S., Khrebtov S.M. // Technical Physics Letters – 2012. – T. 38 – № 3 – C.268–271.
19. Melnikov A. V. Study of interactions between GAMs and broadband turbulence in the T-10 tokamak / Melnikov A. V., Eliseev L.G., Lysenko S.E., Ufimtsev M. V., Zenin V.N. // Nuclear Fusion – 2017. – T. 57 – № 11.
20. Heard J.W. Path integral effects in heavy ion beam probe density measurements: A comparison of simulation results and experimental data / Heard J.W., Crowley T.P., Ross D.W., Schoch P.M., Hickok R.L., Zhang B.Z. // Review of Scientific Instruments – 1993. – T. 64 – № 4 – C.1001–1009.
21. Hamada Y. Density fluctuations in JIPP T-IIU tokamak plasmas measured by a heavy ion beam probe / Hamada Y., Nishizawa A., Kawasumi Y., Fujisawa A., Narihara K., Ida K., Ejiri A., Ohdachi S., Kawahata K., Toi K., Sato K., Seki T., Iguchi H., Adachi K., Hidekuma S., Hirokura S., Iwasaki K., Ido T., Kojima M., Koong J., Kumazawa R., Kuramoto H., Minami T., Nomura I., Sakakita H., Sasao M., Sato K.N., Tsuzuki T., Xu J., Yamada I., Watari T. // Nuclear Fusion – 1997. – T. 37 – № 7 – C.999–1014.
22. Shimizu A. Density profile measurement with a heavy ion beam probe in a toroidal plasma of the compact helical system / Shimizu A., Fujisawa A., Ohshima S., Nakano H., Minami T., Isobe M., Okamura S., Matsuoka K. // Review of Scientific Instruments – 2018. – T. 89 – C.113507.
23. Nakamura S. Real-Time Control of Beam Trajectories Using Digital Signal Processor for the Heavy Ion Beam Probe on the Large Helical Device / Nakamura S., Shimizu A., Ido T., Toi K., Nishimura M., LHD Experiment Group // Plasma and Fusion Research – 2010. – T. 5 – C.043–043.
24. Shimizu A. 2D potential measurements by applying automatic beam adjustment system to heavy ion beam probe diagnostic on the Large Helical

- Device / Shimizu A., Ido T., Kurachi M., Makino R., Nishiura M., Kato S., Nishizawa A., Hamada Y. // *Review of Scientific Instruments* – 2014. – T. 85 – № 11 – C.11D853.
25. Shimizu A. Development of 2D potential profile measurements using the heavy ion beam probe on the large helical device / Shimizu A., Ido T., Nishiura M., Takahashi H., Igami H., Yoshimura Y., Kubo S., Shimozuma T., Kato S., Yokoyama M. // *Plasma and Fusion Research* – 2016. – T. 11 – № 1 – C.1–5.
26. Shimizu A. 2D spatial profile measurements of potential fluctuation with heavy ion beam probe on the Large Helical Device / Shimizu A., Ido T., Nishiura M., Kato S., Ogawa K., Takahashi H., Igami H., Yoshimura Y., Kubo S., Shimozuma T. // *Review of Scientific Instruments* – 2016. – T. 87 – C.11E731.
27. Solomatin R.Y. Investigations of the Peripheral Plasma By Langmuir Probes on the T-10 Tokamak / Solomatin R.Y., Grashin S.A. // *Problems of Atomic Science and Technology, Ser. Thermonuclear Fusion* – 2017. – T. 40 – № 2 – C.55–60.
28. Pedrosa M.A. Fast movable remotely controlled Langmuir probe system / Pedrosa M.A., López-Sánchez A., Hidalgo C., Montoro A., Gabriel A., Encabo J., de la Gama J., Martínez L.M., Sánchez E., Pérez R., Sierra C. // *Review of Scientific Instruments* – 1999. – T. 70 – № 1 – C.415–418.
29. Nocedal J. *Numerical Optimization* / J. Nocedal, S. J. Wright – Springer, 1999.
30. Barth C.J. High-resolution multiposition Thomson scattering for the TJ-II stellarator / Barth C.J., Pijper F.J., Meiden H.J. v. d., Herranz J., Pastor I. // *Review of Scientific Instruments* – 1999. – T. 70 – C.763.
31. Melnikov A. V. A quasi-coherent electrostatic mode in ECRH plasmas on TJ-II / Melnikov A. V., Eliseev L.G., Ochando M.A., Nagaoka K., Ascasibar E., Cappa A., Castejon F., Estrada T., Hidalgo C., Lysenko S.E., Pablos J.L. de, Pedrosa M.A., Yamamoto S., Ohshima S. // *Plasma and Fusion Research* – 2011. – T. 6 – C.2402030.