

На правах рукописи



ЧЕРНЫШЕВ Федор Всеволодович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТОПНЫХ ЭФФЕКТОВ
И ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКАХ
ПО ПОТОКАМ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ**

(специальность 01.04.08 - физика плазмы)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2012

Работа выполнена в *Учреждении Российской Академии Наук
Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург)*

Официальные оппоненты:

- доктор физ.-мат. наук, профессор **В.С. Стрелков**
*Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
(Москва)*
- доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник **В.Ю. Сергеев**
*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
(Санкт-Петербург)*
- доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник **А.Н. Савельев**
*Учреждение Российской академии наук Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург)*

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (Санкт-Петербург)

Защита состоится <2> февраля 2012 г. в 14:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 002.205.03 при Физико-техническом институте
им. А.Ф. Иоффе по адресу:

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического
института им. А.Ф. Иоффе

Автореферат разослан <20> декабря 2011 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.205.03,

кандидат физ.-мат. наук



А.М. Красильщиков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации Работа, результаты которой, представлены в данной диссертации, была начата в 1985 году. В это время исследования в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза (УТС) вступили в новую фазу: правительствами ведущих государств было принято решение о создании международного экспериментального термоядерного реактора. Приблизительно к этому же моменту времени была выработана концепция осуществления реакции синтеза в термоядерном реакторе, созданном на основе токамака – установки с магнитным удержанием плазмы. Эта концепция содержала два важных условия: во-первых, использование в качестве «горючего» смешанной дейтериево-тритиевой плазмы, а, во-вторых, применение на стадии поджига термоядерной реакции нескольких методов нагрева плазмы. Необходимо отметить, что данная концепция не претерпела больших изменений вплоть до настоящего времени. Реакция синтеза дейтерий-тритий и на сегодняшний день считается наиболее легко осуществимой с точки зрения современных технологий. Что касается различных методов нагрева, то после апробации их разновидностей оказалось, что наиболее перспективными для достижения термоядерных температур плазмы являются инжекция нейтральных атомов (НИ) и ионный циклотронный нагрев (ИЦН). Оба эти метода планируется использовать для нагрева плазмы в токамаке-реакторе ИТЭР, строительство которого начато в исследовательском центре Кадараш (Франция) в 2008 году.

Одновременно с выработкой общей концепции осуществления УТС возник ряд актуальных задач, некоторые из которых могли быть решены только средствами корпускулярной диагностики плазмы, т.е. диагностики, основанной на регистрации и анализе выходящих из плазмы потоков атомов, возникающих при перезарядке ионов. Эти задачи можно кратко сформулировать следующим образом:

- 1). Разработка методики определения изотопного состава смешанной плазмы по потокам атомов перезарядки, и использование данной методики для управления соотношением изотопов в плазме. Актуальность этой задачи была непосредственно связана с проблемой регулирования соотношения дейтерия и трития в токамаке-реакторе для обеспечения оптимального режима термоядерного горения.
- 2). Создание диагностической аппаратуры – анализаторов атомных частиц нового поколения с высоким массовым разрешением, предназначенных для одновременной регистрации потоков частиц нескольких масс. Актуальность данной задачи заключалась в том, что аппаратура, имевшаяся к началу настоящей работы, не обладала этими возможностями.

- 3). Исследование воздействия дополнительных методов нагрева (ИЦН и НИ) на ионный компонент плазмы, поскольку многие аспекты, связанные с нагревом ионов, не были достаточно полно изучены и требовали проведения дополнительных исследований. При этом обширный материал мог быть получен на малых токамаках, где при относительно небольшой полной мощности нагрева (~ 100 кВт) значения удельной мощности достигали такого же уровня, как и на крупных установках (~ 1 Вт/см³). Поэтому особенности нагрева плазмы во многом совпадали как для малых, так и для больших установок и результаты, полученные на малых токамаках, могли быть экстраполированы на более крупные установки, в том числе и на токамак-реактор. Особый интерес представляли исследования оптимизации условий ввода мощности ИЦН и НИ в плазму и изучение параметрических зависимостей эффективности ее нагрева.
- 4). Исследование нагрева плазмы в токамаках с малым аспектным отношением (т.е. токамаков с низким отношением большого и малого радиусов тороидальной камеры). Актуальность этой задачи объясняется тем, что такие токамаки обладают рядом существенных преимуществ перед традиционными тороидальными установками [i]. Наиболее важное из преимуществ токамаков с малым аспектным отношением заключается с точки зрения УТС в относительно низких затратах на их строительство. В связи с этим установки с малым аспектным отношением (в частности сферические токамаки) рассматриваются, как одни из кандидатов для создания на их основе термоядерного реактора. При этом наиболее важным направлением исследований для этих установок является изучение удержания и термализации быстрых частиц, возникающих при применении дополнительного нагрева плазмы.

Цель настоящей работы заключалась:

- В разработке серии анализаторов атомных частиц нового поколения и создании на их основе комплексов корпускулярной диагностики, необходимых для проведения опытов по управлению изотопным составом плазмы и для изучения дополнительного нагрева плазмы.
- В создании методики управления изотопным составом плазмы по потокам атомов перезарядки и демонстрации возможности ее применения на практике.
- В исследовании нагрева ионного компонента плазмы и удержания быстрых частиц, возникающих при применении дополнительных методов нагрева, в токамаках с малым аспектным отношением.

Научная новизна работы состоит в том, что в результате ее выполнения:

- Разработан и создан новый тип анализаторов атомных частиц АКОРД, предназначенный для регистрации атомов перезарядки, поступающих из плазмы. Анализатор данного типа является первым прибором, в котором реализована, так называемая, схема двумерной пространственной дисперсии частиц по массе и энергии [11]. В результате этого нововведения анализатор обладает высокой массовой селективностью и позволяет одновременно регистрировать потоки водорода и дейтерия. Схема двумерной дисперсии впоследствии была использована в устройстве других типов анализаторов [ii-iv], в том числе аппаратуры, разрабатываемой в настоящее время для диагностики плазмы в токамаке-реакторе ИТЭР [70].
- Разработана методика управления изотопным составом плазмы по потокам атомов перезарядки. На токамаке COMPASS-C впервые произведены эксперименты по поддержанию соотношения водород-дейтерий в плазме на заданном уровне с помощью анализатора атомных частиц.
- Впервые в практике отечественных исследований произведено изучение параметрических зависимостей нагрева ионов в токамаках с малым аспектным отношением (т.е. токамаков с низким отношением большого и малого радиусов тороидальной камеры).
- Зарегистрированы рекордные значения температуры ионов для установок ТУМАН-3М и Глобус-М (360 и 650 эВ соответственно), достигнутые в режиме пучкового нагрева плазмы.
- Обнаружен эффект ИЦН ионов в токамаках с малым аспектным отношением в широком диапазоне содержания водорода в дейтериевой плазме (10-75%). Данный результат получен впервые при реализации схемы нагрева смешанной плазмы на частоте ионного циклотронного резонанса для легкого ионного компонента.
- Впервые показано, что одним из основных факторов, ограничивающих эффективность дополнительного нагрева плазмы в токамаках с низким аспектным отношением, являются высокие потери быстрых ионов.

Практическая значимость работы заключается в том, что в результате ее выполнения разработан новый тип анализаторов атомных частиц – АКОРД. Всего создано 11 анализаторов этой серии, которые вошли в состав диагностических комплексов токамаков ТУМАН-3(М), Глобус-М (Россия), COMPASS-C(D), START (Великобритания), COMPASS-D (Чехия) и стеллараторов TJ-II (Испания), W7-AS(X)

(Германия). Их применение на перечисленных установках позволило получить ряд важных научных результатов, по контролю изотопного состава плазмы, нагреву ионов и удержанию быстрых частиц, возникающих при применении дополнительных методов нагрева плазмы. Эти результаты продемонстрировали возможность управления изотопным составом плазмы по потокам атомов перезарядки, а также дали основание сформулировать рекомендации по повышению эффективности дополнительных методов нагрева плазмы и снижению потерь быстрых частиц в токамаках с малым аспектным отношением.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка многоканальных атомных анализаторов с высокой массовой селективностью и возможностью одновременного измерения потоков и энергетических распределений атомов водорода и дейтерия, испускаемых плазмой.
2. Создание комплексов корпускулярной диагностики с применением разработанных анализаторов на отечественных и зарубежных токамаках: ТУМАН-3(М), COMPASS-C(D), Глобус-М.
3. Разработка методики управления изотопным составом плазмы по потокам атомов перезарядки.
4. Проведение исследований на основе анализа потоков атомов, поступающих из плазмы при применении дополнительных методов нагрева (нейтральной инжекции и на частоте ионного циклотронного резонанса):
 - нагрева ионного компонента плазмы,
 - удержания и термализации ионов высоких энергий $E > (5-10) T_i$.

Апробация работы и публикации Результаты работы неоднократно докладывались на семинарах лаборатории Процессов атомных столкновений и лаборатории Физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Калемской лаборатории (Великобритания), Институте физики плазмы в Грейфсвальде (Германия), представлялись на конкурсе лучших работ ФТИ им. А.Ф. Иоффе (премия ФТИ 2006 года), а также на всероссийских и международных совещаниях и конференциях:

- Всесоюзное совещание по диагностике высокотемпературной плазмы (Алушта-1986);
- Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (Звенигород-2003, Звенигород-2004, Звенигород-2005, Звенигород-2006, Звенигород-2007, Звенигород-2008, Звенигород-2009, Звенигород-2010);

- European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics (Budapest-1985, Madrid-1987, Cavtat-1988, Venice-1989, Berlin-1991);
- ITER Meeting on Generic Access Routes for Diagnostic (Garching-1994);
- EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics (St.Petersburg-2003, London-2004, Tarragona-2005, Rome-2006, Warsaw-2007, Hersonissos-2008, Sofia-2009, Dublin-2010);
- IAEA Fusion Energy Conference (Vilamora-2004, Chengdu-2006);
- International Congress on Plasma Physics (Nice-2004);
- International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion (Alushta-2004);
- Joint Meeting of IAEA Technical Meeting on Spherical Tori and International Workshop on Spherical Torus (St. Petersburg-2005);
- International Seminar “Experimental Capabilities of KTM Tokamak and Research Programme” (Astana-2005);
- International Workshop on Burning Plasma Diagnostics (Varenna-2007).

Основное содержание диссертации опубликовано в 71 научной публикации, 14 из них – статьи в рецензируемых журналах.

Личный вклад автора Все новые результаты, изложенные в диссертации, получены при личном участии автора. При этом автору принадлежит определяющая роль в разработке новых атомных анализаторов, представленных в работе, как на стадии их проектирования, так и в экспериментах по их калибровке и применении на плазменных установках. Автор принял активное участие в запуске комплексов корпускулярной диагностики на токамаках ТУМАН-3, ТУМАН-3М, Глобус-М (Россия); COMPASS-C, COMPASS-D (Великобритания). При непосредственном участии автора были подготовлены и проведены эксперименты по управлению изотопным составом плазмы на токамаке COMPASS-C. Основные результаты, касающиеся исследований параметрических зависимостей нагрева ионов в токамаках с малым аспектным отношением (ТУМАН-3(М), Глобус-М) были получены лично автором. Он также принял активное участие в экспериментах, направленных на изучение потерь быстрых частиц, возникающих при применении дополнительных методов нагрева на этих установках.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 332 страницы, включая 111 рисунков, 16 таблиц и список литературы из 243 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко сформулированы актуальность и научная значимость темы, обоснована постановка задачи исследований и сформулирована их основная цель, а также представлены основные положения, выносимые на защиту, и обрисована структура диссертации.

Первая глава представляет собой обзор литературы, посвященный диагностическим методам определения изотопного состава плазмы, а также дополнительным методам ее нагрева (НИ и ИЦН).

В параграфе 1.1 дан обзор основных диагностических методов определения изотопного состава плазмы, имеющих на настоящий момент. Изложены физические принципы и особенности применения методов спектроскопии (разд.1.1.1), нейтронной спектрометрии (разд.1.1.2), а также ВЧ рефлектометрии (разд.1.1.3) и коллективного томсоновского рассеяния (разд.1.1.4) для определения соотношения изотопов. Сформулированы достоинства и недостатки методов. Показано, что спектроскопия позволяет определять изотопный состав лишь в поверхностном слое плазмы, а нейтронная спектрометрия изотопного состава является интегральным методом и имеет ограничения в точности, связанные с различием потоков DD и DT нейтронов на два порядка. Что касается ВЧ рефлектометрии и коллективного томсоновского рассеяния, то эти методы находятся на стадии разработки и широкого применения пока не имеют. Делается вывод о том, что анализ потоков атомов перезарядки является сейчас практически единственным методом, позволяющим надежно определять изотопный состав во внутренних областях плазмы.

В параграфах 1.2 и 1.3 представлены основные аспекты применения методов НИ и ИЦН плазмы.

В параграфе 1.2, посвященном НИ, рассмотрен принцип работы инжекторов нейтральных атомов и области их применения, а также приведены их основные характеристики. В разделе 1.2.2 представлены наиболее важные процессы, приводящие к ионизации пучка атомов. Проводится анализ возможных каналов потерь мощности при использовании НИ – потеря на пролет (потерь, связанных с атомами пучка, пролетевшими через плазму без ионизации), орбитальных потерь (потерь, связанных с ионизовавшимися атомами пучка, попавшими на орбиты, выходящие за пределы плазмы) и потерь за счет перезарядки. В разделе 1.2.3 кратко изложены основы теории торможения быстрых ионов, образовавшихся после ионизации нейтрального пучка, рассмотрены особенности нагрева плазмы и формирования функции распределения быстрых частиц по энергии, приведен вид функции распределения, полученный в результате аналитического решения уравнения Фоккера-

Планка [v]. Эти данные используются в главе 4 диссертации при анализе функции распределения ионов надтепловых энергий и изучении нагрева ионного компонента плазмы в экспериментах по НИ на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М. В заключительной части параграфа перечислены основные достижения по пучковому нагреву на плазменных установках (разд. 1.2.4).

В параграфе 1.3, посвященном ИЦН, кратко изложены вопросы теории распространения и поглощения волн в плазме в диапазоне частот ионного циклотронного резонанса (ИЦР) (разд. 1.3.1). Рассмотрено два случая – когда плазма состоит из ионов одного сорта, и при наличии в плазме ионов малой добавки. Перечислены процессы, влияющие на формирование функции распределения ионов по энергии при схеме ИЦН плазмы через ионы малой добавки (разд. 1.3.2). В разделе 1.3.3 дана краткая характеристика процессов ускорения, потерь, торможения и изотропизации ионов малой добавки. Приведен вид функции распределения ионов добавки, полученный в рамках модели Стикса [vi]. Эти данные используются в главе 3 диссертации при изучении нагрева ионного компонента плазмы и анализе поведения ионов надтепловых энергий в экспериментах по ИЦН на токамаках ТУМАН-3 и Глобус-М. В конце параграфа приведен обзор современного состояния экспериментальных работ в области ИЦН.

Вторая глава посвящена методике определения изотопного состава плазмы по потокам атомов перезарядки. В начале главы (параграф 2.1) кратко изложены физические принципы корпускулярной диагностики плазмы и представлены основные идеи, на которых основана методика определения изотопного состава. Показано, что в случае равновесной плазмы невысокой интегральной плотности ($\langle n_e \rangle a < 10^{19} \text{ м}^{-2}$, где $\langle n_e \rangle$ – среднехордовая плотность плазмы, a – малый радиус плазмы), между отношением плотности ионов водорода и дейтерия в плазме и отношением потоков атомов этих изотопов, выходящих из плазмы, имеется линейная связь:

$$n_H/n_D = 0.7 \Gamma_H^{cx}(E)/\Gamma_D^{cx}(E), \quad E > (2-3)T_i.$$

Здесь n_H, n_D – плотности ионов водорода и дейтерия в центральной области плазмы, $\Gamma_H^{cx}(E), \Gamma_D^{cx}(E)$ – потоки атомов водорода и дейтерия с энергией E . Это позволяет, используя достаточно простую методику, развитую в настоящей работе, определять изотопный состав центральной области такой плазмы по потокам атомов перезарядки надтепловой области энергий ($E > (2-3)T_i$). Представлено несколько способов реализации этой методики.

Параграф 2.2 посвящен аппаратуре – анализаторам атомных частиц. Обозначена основная проблема, которая имела к моменту начала данной

работы, связанная с низкой способностью имевшейся аппаратуры (пятиканальный и десятиканальный анализаторы) разделять частицы по массе. Указано, что значение коэффициента подавления частиц соседней массы в этих приборах при разделении водорода и дейтерия составляло величину около 1:10. Это снижало точность определения изотопного состава плазмы, которая находилась на уровне $\sim 10\%$, что существенно ограничивало применимость этой методики. Сформулирована задача создания нового прибора, обладающего высокой массовой селективностью.

В разд. 2.2.1 рассмотрены особенности разделения частиц по массе в анализаторах атомов. Показано, что для пятиканального и десятиканального анализаторов атомов низкая массовая селективность обусловлена их конструкцией [3,13].

В разд. 2.2.2 представлено устройство, принцип работы и основные параметры анализаторов серии АКОРД [11], созданных в ходе выполнения настоящей работы. Отмечено, что в этой модели анализатора был применен метод двумерной пространственной дисперсии частиц, который обеспечил высокую массовую селективность, а также позволил одновременно регистрировать потоки частиц двух масс, что существенно повысило точность относительных измерений. Рассмотрен принцип работы анализатора, основанный на ионизации нейтральных частиц, поступающих из плазмы, и на последующем анализе вторичных ионов в магнитном и электрическом полях. Ионизация осуществляется в газовой камере за счет обдирки атомов в азоте. Для магнито-электрического анализа используется схема типа E||B, которая обеспечивает двумерную дисперсию вторичных ионов и приводит к разделению частиц по массе и энергии в области детекторной плоскости. Регистрация водорода и дейтерия производится с помощью детекторных линеек, расположенных в два ряда друг над другом. В качестве детекторов используются каналовые умножители типа ВЭУ-6 (Россия) или СЕМ KBL (Германия), работающие в режиме счета отдельных импульсов.

Далее приведены основные параметры анализаторов серии АКОРД, полученные в результате калибровки с помощью пучков атомов водорода и дейтерия в диапазоне энергий 0.25-35 кэВ. Здесь же представлена экстраполяция данных калибровки до энергии 70 кэВ, выполненная с учетом сечений обдирки атомов водорода и дейтерия в азоте [vii]. Эффективность регистрации атомов водорода и дейтерия в энергетическом диапазоне 0.25-70 кэВ принимает значения от 2×10^{-5} до 1.5×10^{-2} . Отношение энергий в крайних каналах составляет $\sim 1:7-1:8$. Энергетическая светосила каналов меняется от 9% для каналов с низкой энергией, до 40% для каналов с высокой энергией. Особое внимание уделяется определению коэффициента подавления частиц соседней массы в анализаторе, выполненному во время калибровки, а также во время экспериментов на

токамаке COMPASS-C. Делается вывод, о том, что достигнутое в приборе значение коэффициента подавления при разделении водорода и дейтерия $< 1:100$ является достаточным для измерения относительного содержания этих изотопов в интервале 1-99 %. Результаты, полученные с помощью анализаторов серии АКОРД, представлены в главах 2, 3, 4 данной работы.

В параграфе 2.3 приведены результаты экспериментов по управлению изотопным составом водородно-дейтериевой плазмы на токамаке COMPASS-C [10].

В разд. 2.3.1. представлены параметры установки и размещение экспериментальной аппаратуры. В экспериментах был использован анализатор атомов АКОРД-12, а для вспомогательных целей (контроля соотношения водород-дейтерий на плазменной периферии) использовался монохроматор излучения, измеряющий интенсивности линий H_{α} и D_{α} .

В разд. 2.3.2 рассматриваются особенности измерения соотношения водород-дейтерий с помощью корпускулярной и спектроскопической диагностик на установке COMPASS-C. Что касается корпускулярной диагностики, то благодаря тому, что водород и дейтерий имели одинаковые энергетические распределения, оказалось возможным использовать наиболее простой способ определения изотопного состава плазмы. Этот способ заключался в измерении отношения сигналов в двух каналах анализатора, детектирующих водород и дейтерий примерно одинаковых энергий. Проводится сравнение результатов, полученных с помощью корпускулярной и спектроскопической диагностик. Показано, что данные диагностики могут давать разную информацию о соотношении водород-дейтерий. Отмечается, что в некоторых случаях (например, при предварительной боронизации стенок камеры токамака) различие в показаниях этих диагностик достигало трех раз. Называется основная причина этого различия, заключающаяся в том, что корпускулярная диагностика измеряет соотношение изотопов в центральной области плазмы, в то время как спектроскопия определяет соотношение частиц на плазменной периферии. Причем в периферийной области плазмы плотность ионов определяется рециклигом, при котором значительная часть частиц поступает со стенок камеры виде молекулярных соединений (CH_4 в случае боронизации), не дающих свечения линий H_{α} .

В разделе 2.3.3 рассмотрена работа схемы обратной связи, которая позволяла поддерживать отношение потоков водорода и дейтерия выбранной энергии на определенном постоянном уровне. Напуск водорода в камеру токамака осуществлялся независимым способом, а регулировка напуска дейтерия в камеру установки осуществлялась с помощью системы обратной связи. Далее в работе приводятся результаты экспериментов, которые иллюстрируют устойчивую работу предложенной системы обратной связи и демонстрируют принципиальную возможность

управления изотопным составом плазмы по потокам атомов перезарядки. Дополнительные эксперименты с напуском водорода во время действия системы обратной связи, которые также представлены в работе, показали осуществимость управления изотопным составом плазмы в нестационарных условиях.

В заключительной части главы (параграф 2.4) обсуждается возможность контроля изотопного состава дейтериево-тритиевой плазмы в токамаке-реакторе ИТЭР [12,14]. Приведены результаты численного моделирования потоков атомов дейтерия и трития с использованием кода DOUBLE [viii] для параметров плазмы, соответствующих фазе полномасштабного D-T эксперимента.

В разд. 2.4.1 представлено краткое описание метода расчетов потоков атомов, в котором использовалась плоская модель проникновения нейтральных атомов внутрь плазменного шнура [ix]. Профиль плотности нейтральных атомов (распределение плотности атомов вдоль малого радиуса плазмы) рассчитывался с учетом процессов резонансной перезарядки, ионизации электронным и протонным ударом и радиационной рекомбинации.

В разд. 2.4.2 приводятся основные результаты моделирования. Делается вывод о том, что ожидаемые потоки атомов перезарядки дейтерия и трития в диапазоне энергий (10-100) кэВ имеют достаточно высокие интенсивности для их регистрации и могут быть использованы для определения изотопного состава плазмы. Показано, что абсолютная величина и отношение потоков атомов перезарядки весьма чувствительны к профилю ионной температуры и концентрации плазмы для энергий выше 50 кэВ. Приведены результаты расчета функций светимости атомов (зависимости интенсивности излучения атомов от радиуса плазмы). Эти расчеты позволили определить пространственные зоны в плазме, из которых выходят потоки атомов разных энергий. Указывается на то, что эти зоны находятся во внутренней области плазмы ($0 > r/a > 0.7$), которая недоступна для спектроскопических методов определения изотопного состава. Отмечается, что на основании этих расчетов были сформулированы предложения по измерению изотопного состава плазмы в токамаке ИТЭР. Эти предложения в дальнейшем получили свое развитие в разработке диагностического комплекса нейтральной диагностики для этой установки, который в настоящее время находится на стадии предварительного проектирования [70].

В третьей главе представлены результаты исследований ИЦН плазмы, которые были начаты в 1985 году на токамаке ТУМАН-3, а затем с 2003 года продолжены на сферическом токамаке Глобус-М. Во введении к главе указывается, что обе плазменные установки являются токамаками с низким

аспектным отношением и невысоким значением тороидального магнитного поля ($R/a = 2.25$, $B_{tor} \sim 0.6$ Тл для токамака ТУМАН-3 и $R/a = 1.5$, $B_{tor} \sim 0.4$ Тл для токамака Глобус-М). Поэтому многие проблемы, связанные с нагревом и удержанием ионов в этих установках, имеют одни и те же особенности. В то же время отмечается, что отличительные черты в поведении ионного компонента плазмы, характерные для установок с низким аспектным отношением, должны быть наиболее ярко выражены в случае токамака Глобус-М, который принадлежит к классу сферических токамаков.

Параграф 3.1 посвящен исследованиям ИЦН на токамаке ТУМАН-3. Сформулирована основная задача, стоявшая перед корпускулярной диагностикой в этих исследованиях, которая заключалась в оптимизации ввода ВЧ мощности и в изучении параметрических зависимостей эффективности нагрева ионного компонента плазмы.

В разд. 3.1.1 рассмотрены условия проведения экспериментов, представлены параметры установки и размещение диагностической аппаратуры [4]. Указывается на то, что опыты по ИЦН проводились в дейтериевой плазме в режиме с малой добавкой водорода или гелия. Отмечается, что в комплекс корпускулярной диагностики наряду с атомным анализатором входил также диагностический инжектор атомов ДИНА-4А [x], позволявший исследовать локальные функции распределения ионов.

В разд. 3.1.2 приводятся результаты оптимизации условий ввода ВЧ мощности в плазму, выполненной на предварительной стадии экспериментов [8]. Оптимизация заключалась в подавлении вредного явления – генерации быстрых ионов на плазменной периферии. Для этого был разработан специальный сценарий развития плазменного разряда. Подчеркивается, что при оптимизации ИЦН ключевую роль сыграла корпускулярная диагностика плазмы, данные которой были использованы для анализа временных зависимостей потоков атомов водорода и дейтерия, поступающих из плазмы, а также для исследования локальной функции распределения ионов в области ИЦП, полученной с помощью диагностического инжектора атомов.

В разд. 3.1.3-3.1.6 представлены результаты исследования параметрических зависимостей эффективности нагрева ионного компонента плазмы [1,2,5-7,9]. Эффективность нагрева определялась, как отношение прироста температуры ионов основной плазмы к величине ВЧ мощности в пересчете на плотность ионов [xi]:

$$\eta_{IC} = \Delta T_i / P_{IC} n_i.$$

Приводятся следующие результаты:

(1) Установлено, что при низких значениях ВЧ мощности ($P_{IC} < 100$ кВт) эффективность нагрева не зависит от уровня мощности. Это

согласуется с параметрической зависимостью для приращения ионной температуры, полученной в разд. 3.1.4.

(2) В области $P_{IC} > 100$ кВт было обнаружено насыщение эффективности нагрева с ростом ВЧ мощности. С помощью траекторных расчетов показано, что данное явление объясняется орбитальными потерями частиц из плазмы (т.е. потерями, связанными с выходом ионов за пределы плазмы во время своего движения в магнитном поле установки). Приводится эмпирическое соотношение для предельного значения мощности, при котором влияние потерь начинает снижать эффективность нагрева:

$$P_{IC}^* \sim 300 \times 10^{-19} [\text{кВт} / \text{см}^3] n_i C_H, \quad C_H = n_H / (n_H + n_D).$$

(3) Обнаружено снижение эффективности ИЦН при уменьшении плотности малой добавки. Это хорошо согласуется с моделью орбитальных потерь частиц из плазмы, которая предсказывает падение эффективности нагрева при значениях C_H ниже 25% для уровня мощности 100 кВт и плотности плазмы $1.3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

В заключении параграфа отмечается, что результаты исследований ИЦН на токамаке ТУМАН-3 позволили сформулировать рекомендации по оптимизации нагрева плазмы. В частности, для снижения эффекта неконтролируемого роста плотности во время ИЦН было предложено распределить вводимую в плазму мощность вдоль обхода тора, установив вторую ВЧ антенну, что впоследствии было реализовано.

Параграф 3.2 посвящен исследованию ИЦН на токамаке Глобус-М.

В разд. 3.2.1 представлены параметры установки и размещение аппаратуры. Отмечается, что основным диагностическим инструментом в представленных исследованиях был анализатор АКОРД-12.

В разд. 3.2.2, 3.2.3 рассмотрены условия проведения экспериментов в двух режимах: до проведения оптимизации ввода ВЧ мощности (генерация на частоте 9.2 МГц) [18,22,23,25] и после проведения оптимизации (генерация на частоте 7.5 МГц) [30-33,37,40,50]. Суть оптимизации заключалась в перемещении зоны ИЦР для первой водородной гармоники ближе к центральной области плазмы, а также в вынесении за пределы плазмы зоны резонанса для второй водородной гармоники. Сравниваются результаты измерения ионной температуры, выполненные в этих двух режимах. Отмечается, что после проведения оптимизации было зафиксировано увеличение температуры ионов более чем в два раза по сравнению с аналогичным омическим разрядом. Приводятся результаты, свидетельствующие о том, что ИЦН на токамаке Глобус-М можно осуществлять в широком диапазоне содержания легкого ионного компонента (10-75 %). Данные особенности ИЦН плазмы на установке Глобус-М, а также похожие результаты, полученные ранее, на токамаке

ТУМАН-3, позволили сделать заключение, что они, в первую очередь, связаны со спецификой магнитной конфигурации токамаков с малым аспектным отношением [30,37,50].

Разд. 3.2.4, 3.2.5 посвящены исследованию удержания надтепловых частиц на токамаке Глобус-М, возникающих при ИЦН [45,50,55,63,64]. Представлены следующие результаты:

(1) Анализ потоков атомов перезарядки в опытах по ИЦН плазмы позволил установить наличие быстрых «хвостов» в энергетических спектрах водородной добавки, отсутствующих в спектрах основного дейтериевого компонента. Тем самым было показано, что доминирующим механизмом нагрева плазмы является нагрев через водородную добавку.

(2) Обнаружено, что эффективная температура «хвоста» энергетического распределения ионов добавки, определенная в диапазоне энергий (2-5) кэВ, не превышает значения $T_{tail}^L = 1.2$ кэВ. Сделано заключение о том, что причиной ограничения эффективной температуры являются наличие значительных потерь быстрых частиц.

(3) Показано, что ионы водородной добавки, удерживаемые в плазме токамака, имеют ограничение по энергии. В связи с тем, что прямое наблюдение частиц с энергиями выше 5 кэВ было затруднено по статистическим причинам, автором была применена методика определения максимальной энергии ионов, по измерению времени спада потока атомов перезарядки надтепловой энергии (~ 4 кэВ) после выключения ВЧ импульса. Было обнаружено, что максимальная энергия ионов водородной добавки, удерживаемых в плазме, составляет ~ 15 кэВ.

(4) Выполнены расчеты траекторий ионов в магнитном поле токамака Глобус-М, восстановленном с помощью кода EFIT [xii]. В результате расчетов продемонстрировано, что максимальная энергия ускоренных ионов водородной добавки не может превышать 16 кэВ для имеющегося расположения зоны ИЦР. Это хорошо согласуется с данными эксперимента. Таким образом, показано, что основным механизмом потерь быстрых ионов являются орбитальные потери (т.е. потери, связанные с выходом частиц за пределы плазмы во время своего движения в магнитном поле установки).

В заключении параграфа сформулированы предложения по повышению эффективности ИЦН плазмы на токамаке Глобус-М, основанные на траекторных расчетах [64]. В частности, рекомендовано перемещение зоны ИЦР в область удержания быстрых ионов с энергиями выше 60-70 кэВ (значение большого радиуса плазмы $R = 0.38$ м).

В четвертой главе представлены результаты исследований НИ, на токамаках Глобус-М и ТУМАН-3М. Во вводной части главы отмечается, что эксперименты по пучковому нагреву на этих установках были начаты

приблизительно в одно и то же время в 2003-2005 г.г. Далее указывается на то, что результаты исследования НИ на этих токамаках рассматриваются в рамках данной работы, как дополняющие друг друга. Обсуждаются сходство и различие этих установок и условий проведения экспериментов.

Параграф 4.1 посвящен исследованиям НИ на токамаке Глобус-М. Сформулирована основная задача этих исследований, которая заключалась в снижении возможных потерь мощности НИ и повышении эффективности этого вида нагрева.

В разд. 4.1.1 обсуждаются параметры установки и размещение диагностической аппаратуры. Отмечается, что диагностический комплекс токамака был оснащен двумя анализаторами атомов серии АКОРД, позволяющими производить измерения потоков атомов, выходящих в перпендикулярном и тангенциальном направлении по отношению к оси плазменного шнура [55,71].

В разд. 4.1.2 представлены основные результаты по нагреву ионов и обсуждаются особенности НИ на токамаке Глобус-М [28,29,34,36,38,41,45,46,50,52]. Анализируются результаты измерений рекордной ионной температуры ($T_i \sim 650$ эВ) в режиме с «перегретыми ионами», т.е. в режиме с ионной температурой, превышающей электронную температуру плазмы [50,52]. Приводится ряд экспериментальных результатов, которые расходятся с предварительными оценками эффектов, ожидаемых в результате применения пучкового нагрева плазмы. К этим результатам можно отнести: низкое значение мощности, передаваемой ионному компоненту плазмы; отсутствие существенного роста электронной температуры; отсутствие отчетливого «изотопного эффекта» на ионной температуре при переходе от инъекции водорода к инъекции дейтерия. На основе данных фактов сделано предположение о наличии значительных потерь быстрых ионов, возникающих при НИ.

Для подтверждения этого предположения проведено исследование спектров тормозящихся частиц, зарегистрированных с помощью тангенциального анализатора атомов перезарядки (разд. 4.1.3) [53,55,59,63,71]. Анализ компонентного состава пучка (соотношения быстрых частиц в спектрах, отвечающих энергиям E_b , $E_b/2$ и $E_b/3$) позволил сделать вывод о наличии прямых потерь частиц с энергией инъекции (т.е. суммы потерь на пролет и орбитальных потерь). Проведенная оценка величины прямых потерь показала, что они составляют приблизительно 25 % для водородного пучка и 50 % для дейтериевого пучка относительно полной мощности инъекции. В результате анализа формы спектров надтепловых частиц (величины наклона спектров, построенных в логарифмических координатах), сделано заключение о наличии еще одного механизма потерь – потерь частиц в результате перезарядки.

В разд. 4.1.4 приводится дополнительная оценка величины прямых потерь, сделанная с помощью компьютерного моделирования процессов, происходящих с частицами пучка в плазме токамака Глобус-М [55, 71]. 3D-моделирование включало в себя расчет ионизации атомов пучка в плазме, и расчет траекторий ионов в магнитном поле токамака Глобус-М, восстановленном с помощью кода EFIT [xii]. Результаты моделирования находятся в хорошем согласии с оценками уровня прямых потерь, полученных в эксперименте.

В разд. 4.1.5 представлены рекомендации по повышению эффективности НИ, сделанные с помощью компьютерного моделирования [59,61,71]. Было показано, что орбитальные потери могут быть существенно подавлены, если повысить суммарное магнитное поле токамака (тороидальное и полоидальное), в результате чего уменьшится ларморовский радиус быстрых ионов. В подтверждение приводятся экспериментальные спектры быстрых ионов, полученные при снижении магнитного поля, демонстрирующие сильную зависимость уровня орбитальных потерь от величины суммарного магнитного поля [69,71].

В параграфе 4.2 представлены результаты экспериментов по НИ на токамаке ТУМАН-3М, которые дополняют исследования на токамаке Глобус-М и создают более полную картину особенностей пучкового нагрева плазмы на токамаках с малым аспектным отношением.

В разд. 4.2.1 приведены параметры установки и размещение диагностической аппаратуры. Отмечается, что наряду с анализатором атомов АКОРД-12, направленным перпендикулярно по отношению к плазменному шнуру, в комплекс корпускулярной диагностики также входил металлический отражатель, позволявший регистрировать потоки атомов, выходящие из плазмы в тангенциальном направлении [44].

В разд. 4.2.2 представлены основные результаты, полученные по нагреву ионов при НИ на токамаке ТУМАН-3М [35,42,48,49,51]. Приводятся данные, указывающие на падение эффективности нагрева ионов с ростом мощности пучка атомов. Делается заключение о наличии существенного канала потерь мощности НИ.

Разд. 4.2.3, 4.2.4 посвящены сравнению нагрева плазмы в экспериментах по Ко- и Контр-инъекции [49,50]. Приводится ряд экспериментальных фактов, свидетельствующих о снижении эффективности дополнительного нагрева плазмы при переходе от Ко- к Контр-инъекции. Одним из таких фактов является отсутствие значительного роста ионной температуры во время НИ в случае Контр-инъекции. Различие в наблюдаемых эффектах по нагреву плазмы в этих режимах объясняется в настоящей работе ростом потерь быстрых ионов при переходе от Ко- к Контр-инъекции. В доказательство этому приводятся результаты компьютерного моделирования орбитальных потерь быстрых ионов, пространственные

области действия которых в плазме токамака кардинально отличаются для случаев Ко- и Контр-инжекции.

В разд. 4.2.5, 4.2.6 обсуждаются результаты экспериментов по НИ в режиме с увеличенным суммарным магнитным полем (тороидальным полоидальным) [66,67]. В этом режиме было зарегистрировано рекордное значение температуры ионов для токамака ТУМАН-3М, которое составило ~ 360 эВ. При этом эффект повышения температуры ионов во время НИ при переходе от базового режима к режиму с увеличенным магнитным полем составил около 1.5 раз. На основе анализа энергетического баланса ионного компонента плазмы получена параметрическая зависимость для температуры ионов. Показано, что в случае токамака ТУМАН-3М увеличение магнитного поля оказывает сильное влияние на температуру ионов в основном за счет уменьшения ионной теплопроводности плазмы поперек магнитного поля.

В Заключение сформулированы **основные результаты работы**:

1. Разработаны многоканальные атомные анализаторы АКОРД с высокой селективностью частиц по массе и возможностью одновременного измерения потоков и энергетических распределений атомов водорода и дейтерия. Изготовлено и прокалибровано 11 приборов этой серии, которые работают на плазменных установках в России, Великобритании, Испании, Германии, Чехии.
2. Созданы комплексы корпускулярной диагностики на токамаках ТУМАН-3 (3М), COMPASS-C (D) и Глобус-М.
3. Разработана методика управления изотопным составом плазмы на основе анализа потоков атомов перезарядки:
 - На токамаке COMPASS-C с помощью анализатора АКОРД-12 проведены эксперименты, демонстрирующие принципиальную возможность управления изотопным составом плазмы по потокам атомов.
 - Показана применимость методики для контроля изотопного состава плазмы в токамаке-реакторе ИТЭР (в термоядерной плазме).
4. Проведено исследование нагрева ионного компонента плазмы в экспериментах по ИЦН:
 - На токамаке ТУМАН-3 изучены параметрические зависимости нагрева ионов. Обнаружено насыщение нагрева при увеличении ВЧ мощности и уменьшении плотности малой добавки.
 - На сферическом токамаке Глобус-М в экспериментах со смешанной плазмой продемонстрирован нагрев ионов в широком диапазоне содержания легкого ионного компонента (10-75%). Установлено, что

увеличение ионной температуры при ИЦН слабо зависит от изотопного состава плазмы.

5. Выполнены исследования удержания надтепловых частиц $E > (5-10) T_i$, возникающих при ИЦН, на токамаке Глобус-М. Определена максимальная энергия ионов водородной добавки, удерживаемых в плазме токамака Глобус-М, которая составила 15 кэВ. Сформулированы рекомендации по повышению предельной энергии ионов.
6. Проведено исследование нагрева ионного компонента плазмы в экспериментах по НИ:
 - На токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М в опытах по НИ зарегистрировано рекордное значение температуры ионов для этих установок (360 и 650 эВ соответственно).
 - На токамаке ТУМАН-3М исследован нагрев ионов в широком диапазоне параметров. Зарегистрировано влияние направления инжекции относительно тока по плазме и величины тороидального магнитного поля на эффективность нагрева ионов.
7. Получены важные результаты по удержанию ионов высоких энергий $E > (5-10) T_i$ при НИ на установке Глобус-М. В результате анализа спектров частиц надтепловых энергий показано, что основной канал потерь инжектируемой мощности связан с орбитальными потерями ионов. Исследована изотопная зависимость данного механизма потерь. Зарегистрировано увеличение орбитальных потерь при снижении тороидального магнитного поля. Сформулированы рекомендации по уменьшению потерь быстрых ионов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Аскинази Л.Г., Голант В.Е., Гончаров С.Г., Грязневич М.П., Гусев В.К., Дьяченко В.В., Извозчиков А.Б., Кисляков А.И., Крикунов С.В., Лебедев С.В., Липин Б.М., Павлов И.П., Раздобарин Г.Т., Рождественский В.В., Сахаров Н.В., Халилов М.А., Чернышев Ф.В., Шаховец К.Г., Щербинин О.Н., Беляков В.А., Бендер С.Е., Косцов Ю.А., Литуновский Р.Н., Миняев О.А., Наумшин Ю.А., Уверский Л.Г. Первые эксперименты по высокочастотному нагреву плазмы на токамаке ТУМАН-3 // Письма в ЖТФ. — 1985. — Т. 11, Вып. 5. — С. 315-318.
2. Askinazi L.G., Golant V.E., Goncharov S.G., Gryaznevich M.P., Gusev V.K., Djachenko V.V., Izvozchikov A.B., Krikunov S.V., Lebedev S.V., Lipin B.M., Pavlov I.P., Razdobarin G.T., Rozhdestvenskij V.V., Sakharov N.V., Khalilov M.A., Chernyshev F.V., Shakhovets K.G., Shcherbinin O.N., Bender S.E., Litunovskij R.N., Minyaev O.A., Teplov P.P. Experiments on R-Compression and ICR Heating in Tokamak TUMAN-3: Proc. of 12th Europ. Conf. on Control. Fusion and Plasma Phys. — Budapest, 1985. — Vol. 9F, Part I. — P. 363-366.
3. Извозчиков А.Б., Петров С.Я., Чернышев Ф.В. Влияние массового разрешения атомного анализатора на определение изотопного состава водородной плазмы: Тезисы докл. IV Всесоюзн. совещ. по диагностике высокотемпературной плазмы. — Алушта, 1986. — С. 88.
4. Абрамов А.И., Афанасьев В.И., Бондаренко И.С., Извозчиков А.Б., Кисляков А.И., Комарова Н.И., Крупник Л.И., Мельников А.В., Минаев В.Б., Недельский И.С., Худолеев А.В., Чернышев Ф.В., Шаховец К.Г. Корпускулярная диагностика плазмы на токамаке ТУМАН-3: Препринт — 1205. ФТИ, Л., 1987. — 49 с.
5. Askinazi L.G., Golant V.E., Goncharov S.G., Gryaznevich M.P., Djachenko V.V., Izvozchikov A.B., Krikunov S.V., Lebedev S.V., Lipin B.M., Pavlov I.P., Razdobarin G.T., Rozhdestvenskij V.V., Sakharov N.V., Khalilov M.A., Chernyshev F.V., Shakhovets K.G., Shcherbinin O.N. Ion Cyclotron Heating Experiments on the TUMAN-3 Tokamak: Proc. of 14th Europ. Conf. on Control. Fusion and Plasma Phys. — Madrid, 1987. — Vol. 11D, Part III. — P. 993.
6. Askinazi L.G., Afanas'ev V.I., Golant V.E., Goncharov S.G., Gryaznevich M.P., Djachenko V.V., Izvozchikov A.B., Korotkov A.A., Krikunov S.V., Lebedev S.V., Lipin B.M., Pavlov I.P., Razdobarin G.T., Rozhdestvenskij V.V., N.V.Sakharov, Khalilov M.A., Chernyshev F.V., Shakhovets K.G., Shcherbinin O.N., Yaroshevich S.P., Kostzov Yu.A., Litunovskij R.N., Minyaev O.A. Investigation of ICRH at the Tokamak TUMAN-3: Preprint — 1285. FTI, Leningrad, 1988. — 17 p.

7. *Shakhovets K.G., Askinazi L.G., Afanasiev V.I., Vinogradov N.I., Golant V.E., Goncharov S.G., Gryaznevich M.P., Djachenko V.V., Izvozchikov A.B., Its E.R., Korotkov A.A., Krikunov S.V., Lebedev S.V., Lipin B.M., Pavlov I.P., Podushnikova K.A., Razdobarin G.T., Rozhdestvenskij V.V., Sakharov N.V., Fedorov A.A., Khalilov M.A., Khudoleev A.V., Chernyshev F.V., Shcherbinin O.N., Yaroshevich S.P., Burtcev A.V., Litunovskij R.N., Minyaev O.A., Kaminskij A.O., Pyatov V.N., Yasin I.P.* Combined ICRF Heating and Adiabatic Compression in TUMAN-3: Proc. of 15th Europ. Conf. on Control. Fusion and Plasma Phys. — Cavtat, 1988. — Vol. 30, No. 11. — P. 1549-1558.
8. *Afanasiev V.I., Djachenko V.V., Izvozchikov A.B., Pavlov I.P., Chernyshev F.V., Shakhovets K.G., Shcherbinin O.N., Khudoleev A.V., Yaroshevich S.P.* The Hydrogen and Deuterium Atom Fluxes During ICRF Heating on Hydrogen Minority in TUMAN-3 Plasma: Preprint — 1362. FTI, Leningrad, 1989. — 12 p.
9. *Askinazi L.G., Afanas'ev V.I., Golant V.E., Goncharov S.G., Gryaznevich M.P., D'yachenko V.V., Izvozchikov A.B., Korotkov A.A., Krikunov S.V., Lebedev S.V., Lipin B.M., Pavlov I.P., Razdobarin G.T., Rozhdestvenskij V.V., Sakharov N.V., Khalilov M.A., Chernyshev F.V., Shakhovetz K.G., Shcherbinin O.N., Yaroshevich S.P., Kostzov Yu.A., Litunovskij R.N., Teplov P.P.* Experiments on ICR heating in Tokamak 'TUMAN-3' // Plasma Phys. Control. Fusion. — 1989. — Vol. 31, No. 1. — P. 3-9.
10. *Fielding S.J., Axon K.B., Carolan P.G., Chernyshev F.V., Duntstan M., Durst R., Esser Y.G., Edlington T., Hanks S.D., Jenkins I., Jonson P.C., Kislyakov A.I., Petrov S.Ya., Manhood S.J., Morris A.W., Nicholson P., Parham B.A., Stammers K., Todd T.N., Trotman D.L., Valovich M.V., Winter J.* Boronization, Recycling and Isotope Ratio Control Experiments on COMPASS: Proc. of 18th Europ. Conf. on Control. Fusion and Plasma Phys. — Berlin, 1991. — Vol. 15C, Part III. — P. 73-76.
11. *Извозчиков А.Б., Петров М.П., Петров С.Я., Чернышев Ф.В., Шустов И.В.* Многоканальный анализатор для одновременной регистрации спектров атомов водорода и дейтерия “АКОРД-12” // ЖТФ. — 1992. — Т. 62, Вып. 2. — С. 157-163.
12. *ITER Russian Home Team*, Proposals on Diagnostic Access for ITER: Proc. of ITER Meeting on Generic Access Routes for Diagnostic. — Garching, 1994. — IP 58 4-06-16F.
13. *Афанасьев В.И., Извозчиков А.Б., Петров С.Я., Чернышев Ф.В.* Влияние массового разрешения многоканального атомного анализатора на определение изотопного состава водородной плазмы // ЖТФ. — 1997. — Т. 67, Вып. 4. — С. 13-18.

14. Худолеев А.В., Афанасьев В.И., Чернышев Ф.В., Возможности контроля изотопного состава плотной плазмы по потокам атомов перезарядки: В сб. 9-е Совещание по Диагностике Высокотемпературной Плазмы. — С.-Петербург. — 1997.
15. Minaev V.B., Barsukov A.G., Chernyshev F.V., Chugunov I.N., Dech A.V., Esipov L.A., Golant V.E., Gusev V.K., Kapralov V.G., Kochergin M.M., Krikunov S.V., Kuznetsov V.V., Leonov V.M., Levin R.G., Lupin A.V., Mineev A.B., Mironov M.I., Mukhin E.E., Novokhatskii A.N., Panasenkov A.A., Petrov A.A., Petrov V.G., Petrov Yu.V., Podushnikova K.A., Polevoy A.R., Rozhdestvenskii V.V., Shevelev A.E., Tilinin G.N., Tolstyakov S.Yu., Vildjunas M.I. First Results of the Experiment with NBI on the Globus-M Spherical Tokamak: Proc. of 30th EPS Conf. on Control. Fusion and Plasma Phys. — St. Petersburg, 2003. — Vol. 27A. — P. 2.174.
16. Sakharov N.V., Chernyshev F.V., Gusev V.K., R.G. Levin, Minaev V.B., Mineev A.B., Mironov M.I., Petrov Yu.V. The Behavior of Ion Components in OH Plasma of Globus-M Spherical Tokamak: Proc. of 30th EPS Conf. on Control. Fusion and Plasma Phys. — St. Petersburg, 2003. — Vol. 27A. — P. 3.107.
17. Бабенко П.Ю., Барсуков А.Г., Гусев В.К., Деч А.В., Дьяченко В.В., Капралов В.Г., Кочергин М.М., Кузнецов В.В., Левин Р.Г., Леонов В.М., Лупин А.В., Минаев В.Б., Мухин Е.Е., Панасенков А.А., Петров Ю.В., Подушникова К.А., Рождественский В.В., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю., Тилинин Г.Н., Чернышев Ф.В., Чугунов И.Н., Шевелев А.Е., Щербинин О.Н. Первые результаты экспериментов по нейтральной инжекции на сферическом токамаке Глобус-М: В сб. XXX Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2003. — МС-1-33 (М-53).
18. Гусев В.К., Дьяченко В.В., Чернышев Ф.В., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Щербинин О.Н. Первые эксперименты по ВЧ-нагреву плазмы в сферическом токамаке “Глобус-М” на ионных циклотронных частотах // Письма в ЖТФ. — 2004. — Т. 30, Вып. 16. — С. 58-64.
19. Minaev V.B., Barsukov A.G., Chernyshev F.V., Esipov L.A., Gusev V.K., Kapralov V.G., Krikunov S.V., Kuznetsov V.V., Leonov V.M., Levin R.G., Mineev A.B., Panasenkov A.A., Petrov Yu.V., Rozhdestvenskii V.V., Sakharov N.V., Tilinin G.N., Tolstyakov S.Yu. NBI heating experiment on the Globus-M spherical tokamak: Proc. of 31th EPS Conf. on Plasma Phys. — London, 2004. — Vol. 28G. — P.1.190.
20. Gusev V.K., Ananyev A.S., Chernyshev F.V., Chugunov I.N., Dyachenko V.V., Ivanov N.M., Kapralov V.G., Krikunov S.V., Kochergin M.M., Kurskiev G.S., Kuznetsov E.A., Lebedev A.D., Levin R.G., Minaev V.B., Mironov M.I.,

- Mineev A.B., Mukhin E.E., Novokhatsky A.N., Patrov M.I., Petrov A.A., Petrov V.G., Petrov Yu.V., Podushnikova K.A., Poniaev S.A., Rozhdestvenskii V.V., Sakharov N.V., Shcherbinin O.N., Scherbitskii V.N., Shevelev A.E., Smirnov A.S., Sushkov A.V., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Vildjunas M.I., Yagnov V.A., Zhenishek E.Yu.* High performance OH regime in the Globus-M spherical tokamak: Proc. of 31th EPS Conf. on Plasma Phys. — London, 2004. — Vol. 28G. — P 4.158.
21. *Gusev V.K., Barsukov A.G., Bender S.E., Belyakov V.A., Chernyshev F.V., Chugunov I.N., Dyachenko V.V., Gin D.B., Golant V.E., Kapralov V.G., Khromov N.A., Kostsov Yu.A., Krikunov S.V., Kuznetsov E.A., Kuznetsov V.V., Leonov V.M., Levin R.G., Minaev V.B., Mineev A.B., Mukhin E.E., Patrov M.I., Petrov A.A., Petrov V.G., Petrov Yu.V., Podushnikova K.A., Rozhdestvensky V.V., Sakharov N.V., Semenov A.A., Shcherbinin O.N., Scherbitskii V.N., Shevelev A.E., Smirnov A.S., Tilinin G.N., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Vasiliev V.I., Vildjunas M.I., Voronin A.V., Yagnov V.A.* Plasma Heating and Fuelling in the Globus-M Spherical Tokamak: Proc. of 20th IAEA Fusion Energy Conf. — Vilamora, 2004. — IAEA-CN-116 / EX / P. 4-24.
22. *Gusev V.K., Chernyshev F.V., Dyachenko V.V., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shcherbinin O.N., Vdovin V.L.* ICRH Experiments on the Spherical Tokamak Globus-M: Proc. of 20th IAEA Fusion Energy Conf. — Vilamora, 2004. — IAEA-CN-116 / EX / P. 5-6.
23. *Sakharov N.V., Ayushin B.B., Barsukov A.G., Chernyshev F.V., Gusev V.K., Leonov V.M., Levin R.G., Minaev V.B., Mineev A.B., Mironov M.I., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Tilinin G.N., Tolstyakov S.Yu.* Study of plasma heating in ohmically and auxiliary heated regimes in spherical tokamak Globus-M: Proc. of 12th Int. Congress on Plasma Phys. — Nice, 2004. — Topic D. — P. 171.
24. *Афанасьев В.И., Кисляков А.И., Козловский С.С., Миронов М.И., Петров М.П., Петров С.Я., Чернышев Ф.В.* Диагностика горячей плазмы по потокам нейтральных атомов. Состояние и перспективы: В сб. XXXI Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2004. — С. 20 (О-17).
25. *Гусев В.К., Дьяченко В.В., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Чернышев Ф.В., Щербинин О.Н.* Первые результаты по дополнительному нагреву плазмы в сферическом токамаке ГЛОБУС-М на ионных циклотронных частотах: В сб. XXXI Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2004. — С. 53 (М-31).
26. *Petrov M.P., Afanasiev V.I., Chernyshev F.V., Kislyakov A.I., Kozlovski S.S., Mironov M.I., Petrov S.Ya.* New Trends in the Plasma Diagnostic Using Neutral Particle Analysis (Apparatus and Experimental Results): Proc. of Int.

- Conf. and School on Plasma Phys. and Control. Fusion . — Alushta, 2004. — P. 27.
27. *Askinazi L.G., Barsukov A.G., Chernyshev F.V., Golant V.E., Kornev V.A., Krikunov S.V., Kuznetsov V.V., Lebedev A.D., Lebedev S.V., Melnik A.D., Panasenkov A.A., Polevoi A.R., Ponaev S.A., Razumenko D.V., Rozhdestvensky V.V., Smirnov A.I., Tilin G.N., Tukachinsky A.S., Vildjunas M.I., Zhubr N.A.* First experiments on NBI in the TUMAN-3M tokamak: Proc. of 32nd EPS Plasma Phys. Conf. — Tarragona, 2005. — Vol. 29C. — P-1.102.
28. *Minaev V.B., Ayushin B.B., Barsukov A.G., Chernyshev F.V., Esipov L.A., Gusev V.K., Kapralov V.G., Krikunov S.V., Leonov V.M., Levin R.G., Novokhatskii A.N., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Podushnikova K.A., Rozhdestvenskii V.V., Sakharov N.V., Tilin G.N., Tolstyakov S.Yu.* Study of the Beam - Plasma Interaction in the Globus-M Spherical Tokamak: Proc. of 32nd EPS Plasma Phys. Conf. — Tarragona, 2005. — Vol. 29C. — P-1.103.
29. *Gusev V.K., Barsukov A.G., Chernyshev F.V., Chugunov I.N., Golant V.E., Kapralov V.G., Krikunov S.V., Kurskiev G.S., Leonov V.M., Levin R.G., Minaev V.B., Mineev A.B., Miroshnikov I.V., Mukhin E.E., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Podushnikova K.A., Rozhdestvenskii V.V., Sakharov N.V., Shevelev A.E., Smirnov A.S., Sushkov A.V., Tilin G.N., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Vildjunas M.I.* Comparison of High Density Discharges Heated Ohmically and with NBI in the Globus-M Spherical Tokamak: Proc. of 32nd EPS Plasma Phys. Conf. — Tarragona, 2005. — Vol. 29C. — P-5.076.
30. *Dyachenko V.V., Ayushin B.B., Chernyshev F.V., Gusev V.K., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shcherbinin O.N., Tolstyakov S.Yu., Leonov V.M.* Specific feature of ICR heating on the spherical tokamak Globus-M at high concentration of light ion component: Proc. of 32nd EPS Plasma Phys. Conf. — Tarragona, 2005. — Vol. 29C. — P-5.104.
31. *Shcherbinin O.N., Chernyshev F.V., Dyachenko V.V., Gusev V.K., Petrov Yu.V., Sakharov N.V.* Numerical Modeling and Experimental Study of ICR Heating in the Spherical Tokamak Globus-M: Proc. of Joint Meeting of the 3rd IAEA Technical Meeting on Spherical Tori and the 11th Int. Workshop on Spherical Torus. — St. Petersburg, 2005. — (<http://www.apmath.spbu.ru/iaea/>).
32. *Gusev V.K., Petrov Yu.V., Barsukov A.G., Chernyshev F.V., Chugunov I.N., Golant V.E., Dyachenko V.V., Esipov L.A., Kapralov V.G., Krikunov S.V., Leonov V.M., Levin R.G., Minaev V.B., Mineev A.B., Miroshnikov I.V., Mukhin E.E., Novokhatskii A.N., Patrov M.I., Podushnikova K.A., Rozhdestvenskii V.V., Sakharov N.V., Shcherbinin O.N., Shevelev A.E., Smirnov A.S., Sushkov A.V., Tilin G.N., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I.*

- Vildjunas M.I., Voronin A.V., Kurskiev G.S., Ayushin B.B.* Latest Results from the Globus-M Spherical Tokamak: Proc. of Joint Meeting of the 3rd IAEA Technical Meeting on Spherical Tori and the 11th Int. Workshop on Spherical Torus. — St. Petersburg, 2005. — (<http://www.apmath.spbu.ru/iaea/>).
33. *Гусев В.К., Дьяченко В.В., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Чернышев Ф.В., Щербинин О.Н., Леонов В.М.* Эксперименты по ИЦР нагреву на сферическом токамаке Глобус-М: В сб. XXXII Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2005. — С. 89 (М-68).
34. *Барсуков А.Г., Гусев В.К., Капралов В.Г., Кочергин М.М., Левин Р.Г., Леонов В.М., Минаев В.Б., Мухин Е.Е., Патров М.И., Петров Ю.В., Подушникова К.А., Рождественский В.В., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю., Тилинин Г.Н., Чернышев Ф.В., Чугунов И.Н., Шевелев А.Е.* Исследование нагрева плазмы при нейтральной инжекции на сферическом токамаке Глобус-М: В сб. XXXII Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2005. — С. 90 (М-69).
35. *Аскинази Л.Г., Барсуков А.Г., Вильдджюнас М.И., Голант В.Е., Жубр Н.А., Корнев В.А., Крикунов С.В., Кузнецов В.В., Лебедев С.В., Панасенков А.А., Полевой А.Р., Разуменко Д.В., Рождественский В.В., Смирнов А.И., Тилинин Г.Н., Тукачинский А.С., Чернышев Ф.В.* Первые результаты по нагреву плазмы пучком быстрых нейтральных атомов на токамаке ТУМАН-3М: В сб. XXXII Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2005. — С. 99 (М-78).
36. *Gusev V.K., Chernyshev F.V., Golant V.E., Leonov V.M., Levin R.G., Minaev V.B., Mineev A.B., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Voronin A.V., Zhilin E.G.* Density limits and control in the Globus-M spherical tokamaks // Nucl. Fusion. — 2006. — Vol. 46, No. 8. — S584-S591.
37. *Shcherbinin O.N., Chernyshev F.V., Dyachenko V.V., Gusev V.K., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Leonov V.M.* Numerical modelling and experimental study of ICR heating in the spherical tokamak Globus-M // Nucl. Fusion. — 2006. — Vol. 46, No. 8. — S592-S597.
38. *Minaev V.B., Ayushin B.B., Barsukov A.G., Chernyshev F.V., Gilin E.G., Gusev V.K., Kapralov V.G., Krikunov S.V., Kurskiev G.S., Leonov V.M., Levin R.G., Novokhatskii A.N., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Podushnikova K.A., Rozhdestvenskii V.V., Sakharov N.V., Tilinin G.N., Tolstyakov S.Yu.* Study of the Neutral Beam Heated Plasma in the Globus-M Spherical Tokamak: Proc. of 33rd EPS Conf. on Plasma Phys. — Rome, 2006. — Vol. 30I. — P.4-104.

39. Gusev V.K., Ayushin B.B., Chernyshev F.V., Chugunov I.N., Dyachenko V.V., Esipov L.A., Gin D.B., Golant V.E., Khitrov S.A., Khromov N.A., Krikunov S.V., Kurskiev G.S., Larionov M.M., Levin R.G., Minaev V.B., Mukhin E.E., Novokhatskii A.N., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Podushnikova K.A., Rozhdestvensky V.V., Sakharov N.V., Shcherbinin O.N., Shevelev A.E., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Vildjunas M.I., Voronin A.V., Kapralov V.G., Miroshnikov I.V., Rozhansky V.A., Senichenkov I.Yu., Smirnov A.S., Veselova I.Yu., Bender S.E., Belyakov V.A., Kostsov Yu.A., Mineev A.B., Vasiliev V.I., Kuznetsov E.A., Scherbitskii V.N., Yagnov V.A., Barsukov A.G., Kuznetsov V.V., Leonov V.M., Panasenkov A.A., Tilinin G.N., Zhilin E.G. Overview of the Globus-M Spherical Tokamak Results: Proc. of 21st IAEA Fusion Energy Conf. — Chengdu, 2006. — OV/P-3. — P. 29.
40. Дьяченко В.В., Аюшин Б.Б., Гусев В.К., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Чернышев Ф.В., Щербинин О.Н., Леонов В.М. Развитие экспериментов по ИЦР нагреву на сферическом токамаке ГЛОБУС-М: В сб. XXXIII Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2006. — С. 52 (М-31).
41. Аюшин Б.Б., Барсуков А.Г., Гусев В.К., Жилин Е.Г., Капралов В.Г., Курскиев Г.С., Левин Р.Г., Леонов В.М., Минаев В.Б., Мухин Е.Е., Новохацкий А.Н., Патров М.И., Петров Ю.В., Подушникова К.А., Рождественский В.В., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю., Тилинин Г.Н., Чернышев Ф.В., Чугунов И.Н., Шевелев А.Е. Исследование зависимости поглощения мощности нейтрального пучка от параметров плазменного разряда в сферическом токамаке ГЛОБУС-М: В сб. XXXIII Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2006. — С. 67 (М-50).
42. Аскинази Л.Г., Вильджюнас М.И., Голант В.Е., Жубр Н.А., Корнев В.А., Крикунов С.В., Лебедев С.В., Мельник А.Д., Разуменко Д.В., Рождественский В.В., Смирнов А.И., Тукачинский А.С., Чернышев Ф.В. Исследования по нагреву плазмы пучком быстрых нейтральных атомов на токамаке ТУМАН-3М: В сб. XXXIII Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2006. — С. 59 (М-37).
43. Петров Ю.В., Аюшин Б.Б., Барсуков А.Г., Bender С.Е., Вильджюнас М.И., Гусев В.К., Дьяченко В.В., Крикунов С.В., Кузнецов Е.А., Курскиев Г.С., Левин Р.Г., Леонов В.М., Капралов В.Г., Минаев В.Б., Mineev А.Б., Патров М.И., Рожанский В.А., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю., Тилинин Г.Н., Чернышев Ф.В., Щербинин О.Н. Результаты экспериментов на токамаке ГЛОБУС-М за период 2005-2006 годов: В сб. XXXIV Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2007. — С. 14 (О-12).

44. Аскинази Л.Г., Вильджюнас М.И., Корнев В.А., Лебедев С.В., Мельник А.Д., Разуменко Д.В., Тукачинский А.С., Чернышев Ф.В. Применение металлического отражателя для измерения спектров замедляющихся частиц пучка на установке ТУМАН-3М: В сб. XXXIV Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2007. — С. 62 (М-41).
45. Аюшин Б.Б., Гусев В.К., Дьяченко В.В., Крикунов С.В., Левин Р.Г., Минаев В.Б., Миронов М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Хитров С.А., Чернышев Ф.В., Щербинин О.Н. Корпускулярная диагностика на токамаке ГЛОБУС-М. Обзор наиболее важных результатов: В сб. XXXIV Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2007. — С. 64 (М-43).
46. Аюшин Б.Б., Гусев В.К., Курские Г.С., Левин Р.Г., Минаев В.Б., Миронов М.И., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю., Чернышев Ф.В. Определение области потерь пучковых частиц на установке ГЛОБУС-М: В сб. XXXIV Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2007. — С. 66 (М-45).
47. Аюшин Б.Б., Барсуков А.Г., Гусев В.К., Есинов Л.А., Жилин Е.Г., Курские Г.С., Левин Р.Г., Леонов В.М., Минаев В.Б., Миронов М.И., Мирошников И.В., Мухин Е.Е., Новохацкий А.Н., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю., Тилинин Г.Н., Чернышев Ф.В. Оптимизация эксперимента по нейтральной инжекции на сферическом токамаке ГЛОБУС-М: В сб. XXXIV Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2007. — С. 81 (М-60).
48. Аскинази Л.Г., Барсуков А.Г., Вильджюнас М.И., Голант В.Е., Жубр Н.А., Ирзак М.А., Корнев В.А., Крикунов С.В., Кузнецов В.В., Лебедев С.В., Мельник А.Д., Панасенков А.А., Разуменко Д.В., Рождественский В.В., Рушкевич А.А., Смирнов А.И., Тилинин Г.Н., Тукачинский А.С., Чернышев Ф.В. Влияние геометрии эксперимента на эффективность нейтральной инжекции в токамаке ТУМАН-3М: В сб. XXXIV Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2007. — С. 103 (М-82).
49. Askinazi L.G., Barsukov A.G., Chernyshev F.V., Golant V.E., Irzak M.A., Kornev V.A., Krikunov S.V., Kuznetsov V.V., Lebedev S.V., Melnik A.D., Panasenkov A.A., Razumenko D.V., Rozhdestvensky V.V., Rushkevich A.A., Smirnov A.I., Tilinin G.N., Tukachinsky A.S., Vildjunas M.I., Zhubr N.A. Confinement of NBI-originated fast ions in TUMAN-3M: Proc. of 34th EPS Conf. on Plasma Phys. — Warsaw, 2007. — Vol. 31F. — P-1.146.
50. Chernyshev F.V., Ayushin B.B., Dyachenko V.V., Gusev V.K., Khitrov S.A., Kornev V.A., Krikunov S.V., Kurskiev G.S., Lebedev S.V., Levin R.G.,

- Melnik A.D., Minaev V.B., Mironov M.I., Petrov Yu.V., Razumenko D.V., Sakharov N.V., Shcherbinin O.N., Tolstyakov S.Yu., Tukachinsky A.S., Vildjunas M.I.* Recent Results from CX Diagnostics at Ioffe Institute Tokamaks: Proc. of 34th EPS Conf. on Plasma Phys. — Warsaw, 2007. — Vol. 31F. — P-5.107.
51. *Аскинази Л.Г., Вильдджюнас М.И., Голант В.Е., Жубр Н.А., Корнев В.А., Крикунов С.В., Лебедев С.В., Мельник А.Д., Разуменко Д.В., Рождественский В.В., Рушкевич А.А., Тукачинский А.С., Чернышев Ф.В.* Исследование удержания быстрых ионов с помощью нейтронных измерений при нейтральной инжекции в токамаке ТУМАН-3М: В сб. XXXV Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2008. — С. 60 (М-34).
52. *Аюшин Б.Б., Барсуков А.Г., Гусев В.К., Есупов Л.А., Жилин Е.Г., Курский Г.С., Левин П.Г., Леонов В.М., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Тилинин Г.Н., Толстяков С.Ю., Чернышев Ф.В.* Исследование нагрева плазмы в разрядах с нейтральной инжекцией на сферическом токамаке Глобус-М // Физ. плазмы. — 2008. — Т. 34, Вып. 2. — С. 99-113.
53. *Minaev V.B., Ayushin B.B., Barsukov A.G., Chernyshev F.V., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Mironov M.I., Panasenkov A.A., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Rozhansky V.A., Sakharov N.V., Senichenkov I.Yu., Tilihin G.N., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Zhilin E.G.* Progress in the Neutral Beam Heating Experiment on the Globus-M Spherical Tokamak: Proc. of 35th EPS Conf. on Plasma Phys. — Hersonissos, 2008. — Vol. 32D. — P-1.110.
54. *Senichenkov I.Yu., Rozhansky V.A., Bogomolov A.V., Gusev V.K., Sakharov N.V., Petrov Yu.V., Minaev V.B., Tolstyakov S.Yu., Patrov M.I., Chernyshev F.V., Ayushin B.B., Kurskiev G.S. and the Globus-M team.* Simulation of L and H regimes for spherical tokamak Globus-M with ASTRA transport code: Proc. of 35th EPS Conf. on Plasma Phys. — Hersonissos, 2008. — Vol. 32D. — P-2.046.
55. *Chernyshev F.V., Afanasyev V.I., Ayushin B.B., Dyachenko V.V., Gusev V.K., Khitrov S.A., Krikunov S.V., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Minaev V.B., Mironov M.I., Nesenevich V.G., Petrov S.Ya., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shcherbinin O.N., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I.* Fast Particle Confinement Studies in the Globus-M Spherical Tokamak: Proc. of 35th EPS Conf. on Plasma Phys. — Hersonissos, 2008. — Vol. 32D. — P-2.097.
56. *Kornev V.A., Askinazi L.G., Chernyshev F.V., Golant V.E., Krikunov S.V., Lebedev S.V., Melnik A.D., Razumenko D.V., Rozhdestvensky V.V., Tukachinsky A.S., Vildjunas M.I., Zhubr N.A.* Analysis of Density Dependence of Neutron Rate in NBI Experiments on TUMAN-3M: Proc. of

- 35th EPS Conf. on Plasma Phys. — Hersonissos, 2008. — Vol. 32D. — P-2.103.
57. *Afanasyev V.I., Mironov M.I., Konovalov S.V., Khudoleev A.V., Petrov M.P., Kozlovsky S.S., Nesenevich V.G., Lyublin B.V., Petrov S.Ya., Kislyakov A.I., Chernyshev F.V., Melnik A.D.* Neutral particle analysis on ITER and requirements for DEMO: AIP Conf. Proc. — 2008. — Vol. 988. — P. 177-184. — AMER INST PHYSICS ISSN 2008: 0094-243X.
58. *Аскинази Л.Г., Вильджюнас М.И., Жубр Н.А., Корнев В.А., Крикунов С.В., Лебедев С.В., Мельник А.Д., Панасенков А.А., Разуменко Д.В., Рождественский В.В., Тилинин Г.Н., Тукачинский А.С., Чернышев Ф.В.* Удержание быстрых ионов и влияние изотопного состава на эффективность NBI нагрева в токамаке ТУМАН-3М: В сб. XXXVI Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2009. — С. 69 (М-44).
59. *Аюшин Б.Б., Гусев В.К., Минаев В.Б., Миронов М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Чернышев Ф.В.* Исследование удержания быстрых ионов при нейтральной инжекции на сферическом токамаке ГЛОБУС-М: В сб. XXXVI Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2009. — С. 78 (М-53).
60. *Аюшин Б.Б., Барсуков А.Г., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Жилин Е.Г., Курскиев Г.С., Минаев В.Б., Миронов М.И., Панасенков А.А., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Сениченков И.Ю., Рожанский В.А., Толстяков С.Ю., Тилинин Г.Н., Чернышев Ф.В.* Исследование нагрева плазмы в разрядах с нейтральной инжекцией на сферическом токамаке ГЛОБУС-М: В сб. XXXVI Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2009. — С. 102 (М-77).
61. *Patrov M.I., Ayushin B.B., Gusev V.K., Chernyshev F.V., Kurskiev G.S., Khromov N.A., Minaev V.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Petrov Yu.V., Rozhdestvensky V.V., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Zabuga A.V., Zhilin E.G.* High density regimes in Globus-M: Proc. of 36th EPS Conf. on Plasma Phys. — Sofia, 2009. — Vol. 33E. — P-5.153.
62. *Аюшин Б.Б., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Дьяченко В.В., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Хитров С.А., Чернышев Ф.В., Щербинин О.Н.* О роли графитового покрытия стенок камеры в экспериментах по ИИР нагреву плазмы в сферическом токамаке ГЛОБУС-М // Письма ЖТФ. — 2009, Т. 35. — С. 49-54.
63. *Gusev V.K., Aleksandrov S.E., Alimov V.Kh., Arkhipov I.I., Ayushin B.B., Barsukov A.G., Ber B.Ya., Chernyshev F.V., Chugunov I.N., Dech A.V., Golant V.E., Gorodetsky A.E., Dyachenko V.V., Kochergin M.M.,*

- Kurskiev G.S., Khitrov S.A., Khromov N.A., Lebedev V.M., Leonov V.M., Litunovskiy N.V., Mazul I.V., Minaev V.B., Mineev A.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Mukhin E.E., Nikolaev Yu.A., Novokhatsky A.N., Panasenkov A.A., Patrov M.I., Petrov M.P., Petrov Yu.V., Podushnikova K.A., Rozhansky V.A., Rozhdestvensky V.V., Sakharov N.V., Shcherbinin O.N., Senichenkov I.Yu., Shevelev A.E., Suhov E.V., Trapenikova I.N., Terukov E.I., Tilinin G.N., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Voronin A.V., Zakharov A.P., Zalavutdinov R.Kh., Yagnov V.A., Kuznetsov E.A., Zhilin E.G.* Overview of results obtained at the Globus-M Spherical tokamak // Nucl. Fusion. — 2009. — Vol. 49, No. 10. — 104021. — 11 p.
64. Чернышев Ф.В., Аюшин Б.Б., Гусев В.К., Дьяченко В.В., Минаев В.Б., Миронов М.И., Петров М.П., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Хитров С.А., Щербинин О.Н. Исследование ионного циклотронного нагрева плазмы на сферическом токамаке Глобус-М методом корпускулярной диагностики // Физ. плазмы. — 2009. — Т. 35, № 11. — С. 979-988.
65. Афанасьев В.И., Кисляков А.И., Козловский С.С., Леонов В.М., Люблин Б.В., Мельник А.Д., Миронов М.И., Несеневич В.Г., Петров М.П., Петров С.Я., Чернышев Ф.В. Возможности диагностики по анализу нейтральных атомов на установке ИТЭР и перспективы ее развития: В сб. XXXVII Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2010. — С. 382 (E-05).
66. Лебедев С.В., Аскинази Л.Г., Барсуков А.Г., Вильджюнас М.И., Жубр Н.А., Корнев В.А., Крикунов С.В., Мельник А.Д., Панасенков А.А., Разуменко Д.В., Рождественский В.В., Тилинин Г.Н., Тукачинский А.С., Чернышев Ф.В. Исследование влияния величины продольного магнитного поля на нагрев плазмы в токамаке ТУМАН-3М: В сб. XXXVII Звенигородская конф. по физ. плазмы и УТС. — Звенигород, 2010. — С. 29 (M-06).
67. *Lebedev S.V., Askinazi L.G., Barsukov A.G., Chernyshev F.V., Kornev V.A., Krikunov S.V., Melnik A.D., Panasenkov A.A., Razumenko D.V., Rozhdestvensky V.V., Tilinin G.N., Tukachinsky A.S., Vildjunas M.I., Zhubr N.A.* Effect of toroidal magnetic field on plasma heating in the TUMAN-3M: Proc. of 37th EPS Conf. on Plasma Phys. — Dublin, 2010. — Vol. 34A. — P-1.1056.
68. *Kornev V.A., Askinazi L.G., Chernyshev F.V., Krikunov S.V., Lebedev S.V., Melnik A.D., Razumenko D.V., Rozhdestvensky V.V., Tukachinsky A.S., Vildjunas M.I., Zhubr N.A.* Study of fast ion confinement using 2.45 MeV D-D emission in TUMAN-3M: Proc. of 37th EPS Conf. on Plasma Phys. — Dublin, 2010. — Vol. 34A. — P-5.160.

69. *Minaev V.B., Chernyshev F.V., Gusev V.K., Ivanov A.E., Khromov N.A., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Senichenkov I.Yu., Tolstyakov S.Yu., Zhilin E.G.* Fast Particle Confinement and NBI Heating Study on Globus-M: Proc. of 37th EPS Conf. on Plasma Phys. — Dublin, 2010. — Vol. 34A. — P-5.169.
70. *Afanasyev V.I., Chernyshev F.V., Kislyakov A.I., Kozlovski S.S., Lyublin B.V., Mironov M.I., Melnik A.D., Nesenevich V.G., Petrov M.P., Petrov S.Ya.* Neutral particle analysis on ITER: present status and prospects // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. — 2010. — Vol. 621, Issues 1-3, P. 456-467.
71. *Чернышев Ф.В., Афанасьев В.И., Гусев В.К., Иванов А.Е., Курскиев Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Миронов М.И., Несеневич В.Г., Патров М.И., Петров М.П., Петров С.Я., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю.* Исследование потерь быстрых ионов в экспериментах по нейтральной инжекции на сферическом токамаке Глобус-М // Физ. плазмы. — 2011. — Т. 37, № 7. — С. 595-615.

ЛИТЕРАТУРА, ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ

- i. *Peng Y.-K.M. and Strickler D.J.* Features of spherical torus plasmas // Nucl. Fusion. — 1986. — Vol. 26, No. 6. — P. 769-778.
- ii. *Kusama Y., Nemoto M., Afanassiev V.I., et al.* Neutral particle analyzer with energy range up to 4 MeV for both alpha particles and protons // Fusion Eng. Design. — 1997. — Vol. 34-35. — P. 531-534.
- iii. *Afanassiev V.I., Gondhalekar A., Babenko P.Yu., et al.* A Neutral Particle Analyzer/Isotope Separator for Measurement of Hydrogen Isotope Composition of JET Plasmas // Rev. Sci. Instrum. — 2003. — Vol. 74, Issue 4. — P. 2338-2352.
- iv. *Чернышев Ф.В., Афанасьев В.И., Деч А.В. и др.* Компактный анализатор атомных частиц для диагностики плазмы // ПТЭ. — 2004. — № 2. — С. 87-93.
- v. *Cordey J.G., Gorbunov E.P., Hugill J., et al.* Neutral injection heating of a tokamak plasma: theory and experiment // Nucl. Fusion. — 1975. — Vol. 15, No. 3. — P. 441-451.
- vi. *Stix T.H.* Fast-Wave Heating of a Two-Component Plasma // Nucl. Fusion. — 1975. — Vol. 15, No. 5. — P. 737-754.
- vii. *Van Zyl B., Neumann H., Le T.E. and Amme R.C.* H+N and H+O Collisions: Experimental Charge-Production Cross Section and Differential Scattering Calculations // Phys. Rev., A. — 1978. — Vol. 18, No. 2. — P. 506-516.
- viii. *Afanasyev V.I., Gondhalekar A., Kislyakov A.I.* On the Possibility of Determining the Radial Profile of Hydrogen Isotope Composition of JET Plasmas, and of Deducing Radial Transport of the Isotope Ions: Preprint — JET-R-(00)04. Luxemburg: ECSC/EEC/EURATOM, 2004. — 16 p.
- ix. *Днестровский Ю.Н., Костомаров Д.П.* Математическое моделирование плазмы. — М.: Наука, 1982. — 239 с.
- x. *Димов Г.И., Росляков Г.В., Савкин В.Я.* Диагностический инжектор атомов водорода // ПТЭ. — 1977. — № 4. — С. 29-32.
- xi. *Лонгинов А.В., Степанов К.Н.* Высокочастотный нагрев плазмы в токамаках в области ионных циклотронных частот: В сб. Высокочастотный нагрев плазмы. Материалы Всесоюзного совещания. — Горький, ИПФ АН СССР, 1983. — С. 281-323.
- xii. *Lao L.L., John H.St., Stambaugh R.D., et al.* Reconstruction of current profile parameters and plasma shapes in tokamaks // Nuclear Fusion. — 1985. — Vol. 25, No. 11. — P. 1611-1622.