

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А.Ф.ИОФФЕ

На правах рукописи

**ЛЕВИН РОМАН ГРИГОРЬЕВИЧ**

**РЕКОНСТРУКЦИЯ МАГНИТНОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО  
РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ НА СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ  
ГЛОБУС-М**

Специальность 01.04.08 - “Физика плазмы”

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2007

Работа выполнена в Физико-Техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН.

Научный руководитель                      снс, кандидат физико-математических наук  
Сахаров Н.В.

Официальные оппоненты                      доктор физико-математических наук  
Абрамова К.Б.

кандидат физико-математических наук  
Цаун С.В.

Ведущая организация                      Российский Научный Центр  
«Курчатовский институт»

Защита состоится «\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2007 г. в \_\_\_\_\_ на заседании  
Диссертационного Совета Д002.205.03 при Физико-Техническом институте  
им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул.  
Политехническая, 26.

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

Автореферат разослан «\_\_\_»\_\_\_\_\_2007 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

Кандидат физико-математических наук \_\_\_\_\_ Орбели А.Л.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

**Актуальность темы диссертации.** Тема диссертации посвящена актуальной проблеме реконструкции магнитных поверхностей в плазме с вытянутым сечением и управлению ее положением. Вытянутая в вертикальном направлении магнитная конфигурация диверторного типа признана наиболее эффективной для нагрева и удержания плазмы в токамаке. Такая конфигурация будет использоваться в экспериментальном термоядерном реакторе ИТЭР и в проектах новых отечественных установок.

Работы, вошедшие в диссертацию, выполнены на первом в России сферическом токамаке Глобус-М. Концепция сферического токамака является потенциально важной для оптимизации параметров термоядерного реактора, возможного уменьшения его размеров и стоимости. В сферическом токамаке плазма изначально имеет некруглое сечение с сильной вытянутостью в вертикальном направлении и треугольностью шнура. Применение даже простых методов магнитной диагностики при малом аспектном отношении требует своего физического обоснования и проведения специальных исследований. В целом, осуществление разносторонних экспериментов в сферическом токамаке невозможно без использования совершенной методики магнитных измерений, позволяющей получать исчерпывающую информацию о положении и форме плазменного шнура и интегральных параметрах плазмы.

Настоящая диссертация посвящена разработке методов магнитной диагностики для измерения параметров плазмы с малым аспектным отношением и проведению экспериментальных исследований на сферическом токамаке Глобус-М.

**Цели работы.** Целью диссертации является

1. Разработка алгоритма размещения магнитных датчиков для реконструкции равновесия плазмы с целью минимизации ошибки реконструкции и улучшения сходимости задачи.
2. Разработка магнитной диагностики по предложенной методике.
3. Разработка математической модели токонесущих элементов токамака Глобус-М для кода равновесия EFIT.

4. Исследование плазмы с помощью магнитной диагностики и реконструкции равновесия плазмы.
5. Разработка методов измерения положения границы плазмы в реальном масштабе времени и применение этих методов на сферическом токамаке Глобус-М в контурах управления с отрицательной обратной связью.

### **Новизна работы.**

1. Предложен метод выбора магнитных датчиков и их координат для реконструкции равновесия плазмы. Показано, что оптимальным датчиком для решения данной задачи является необходимая магнитная петля. Предложенный метод позволяет существенно (в 3-4) раза сократить количество датчиков, используемых для реконструкции равновесия плазмы.
2. Разработан комплекс магнитной диагностики по предложенной выше методике. Комплекс включает в себя 21-ю петлю, расположенную на вакуумной камере токамака. Комплекс рассчитан на выход из строя 2-х любых петель и на ошибку измерения 3%.
3. Разработана математическая модель токамака Глобус-М для реконструкции равновесия плазмы. Модель учитывает обмотки полоидального магнитного поля токамака, центральный соленоид, лимитер, магнитные петли и вакуумную камеру. Предложен и реализован алгоритм реконструкции модели центрального соленоида по измерениям магнитного потока, сделанным с помощью магнитных петель. Произведены расчеты наведенных токов на вакуумную камеру с помощью трехмерного кода для разряда токамака.
4. Разработаны быстрые методы определения радиального положения плазмы сферического токамака. Выполнена экспериментальная реализация разработанной методики для определения положения геометрического центра плазмы и автоматического управления положением шнура через контур с отрицательной обратной связью.
5. Разработаны методы определения вертикального положения плазмы. Произведено экспериментальное исследование двух типов датчиков. На основании исследований существенно улучшено автоматическое

управление вертикальным положением плазмы для сложных магнитных конфигураций.

**Достоверность научных результатов.** Основные результаты диссертации получены с помощью кода равновесия плазмы активно применяющегося на всех крупных токамаках в мире. Основные результаты, полученные в данной работе, проверялись с помощью других кодов равновесия и независимых диагностик.

Все предложенные методы были проверены на действующей установке Глобус-М.

### **Практическая значимость работы.**

1. В работе были исследованы различные виды датчиков магнитной диагностики. Результаты исследований показали преимущество магнитных петель перед магнитными зондами для задачи реконструкции равновесия плазмы.
2. Разработан алгоритм расстановки магнитных петель на вакуумной камере токамака. Данный алгоритм реализован на токамаке Глобус-М. Комплект состоит из 21-й полнообходной магнитной петли и позволяет производить реконструкцию равновесия плазмы при выходе из строя 2-х любых петель, при максимальной ошибке измерения 3%.
3. Разработана модель токамака Глобус-М для реконструкции равновесия плазмы. Модель учитывает обмотки полоидального магнитного поля токамака, Лимитер, магнитные петли и вакуумную камеру. Распределение тока по вакуумной камере измеряется с помощью того же комплекта магнитных петель.
4. Произведен полный анализ ошибки реконструкции параметров плазмы для предложенного комплекта магнитной диагностики. На основе этих данных были сформулированы ограничения по области реконструкции равновесия плазмы в разрядах токамака Глобус-М.
5. Исследовано влияние конфигурации плазмы на работоспособность дипольного датчика радиального потока. Корректировка программы радиального потока позволила в ряде разрядов токамака Глобус-М устранить срыв и увеличить длительность примерно в два раза.

6. Произведен анализ квадрупольного датчика для стабилизации вертикального положения плазмы. Анализ с помощью кода EFIT показал, что соответствие показаний датчика и реального положения плазмы существенно улучшены. При управлении вертикальным положением плазмы с помощью квадрупольного датчика существенно увеличивается устойчивость плазмы.
7. Методика высокоточной реконструкции позволила отрабатывать сценарии формирования лимитерных и диверторных конфигураций с длительностью превышающей все характерные времена переноса тепла, диффузии частиц и магнитного поля. Кроме этого, позволила отрабатывать различные сценарии разрядов для исследования мощных дополнительных нагревов плазмы.
8. Все выше приведенные результаты позволили производить в автоматическом режиме измерение данных и их обработку. Все разряды токамака Глобус-М обрабатываются с помощью реконструкции равновесия в приведенных выше пределах. В основной базе данных токамака содержатся выходные данные кода равновесия EFIT, начиная с разряда номер № 11000.
9. Опыт работы может быть использован при разработке и эксплуатации установок типа токамак следующего поколения.

#### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Физическое обоснование и выбор датчиков для решения задач расчета и реконструкции равновесия плазмы с малым аспектным отношением.
2. Апробация методов реконструкции равновесных параметров плазмы сферического токамака Глобус-М
3. Магнитная диагностика для реконструкции равновесия плазмы в сферическом токамаке Глобус-М.
4. Математическая модель токамака Глобус-М для решения задачи реконструкции равновесия плазмы.
5. Физическое обоснование и экспериментальное применение датчиков вертикального и горизонтального положения для систем автоматического управления положением плазмы в сферическом токамаке.

**Апробация работы и публикации.** Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены в период 2000 – 2006 гг. и изложены более чем в 60 печатных работах, в т.ч. в 6 статьях в реферируемых журналах. Результаты диссертации представлялись автором на международных конференциях: XXX EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics (Санкт-Петербург, 2003), The 3rd IAEA TM on Spherical Tori and 11th IWS on Spherical Tori (Санкт-Петербург, 2005); на всероссийских конференциях: Седьмая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (Санкт-Петербург, 2003), Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (XXIX, XXX, XXXI, XXXII, XXXIII, Звенигород, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006), II Курчатовская молодежная школа (Москва, 2004), 11-я всероссийская конференция Диагностика высокотемпературной плазмы (Звенигород, 2005), День науки Санкт-Петербургского Государственного Технического Университета (Санкт-Петербург, 2000, 2001); на семинарах лаборатории Физики высокотемпературной плазмы ФТИ им А.Ф.Иоффе РАН (Санкт-Петербург).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация введения, четырех глав и заключения. Диссертация изложена на 163 страницах, содержит 62 рисунка и 5 таблиц; список литературы содержит 136 наименований.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во **Введении** к диссертации сформулированы цели и задачи диссертационной работы, обоснована актуальность работы.

В **Главе 1** содержатся основные результаты, полученные на сферических токамаках [1]. Приводится подробное описание концепции сферических токамаков. Особое внимание уделяется применению кода EFIT [2] на основных установках токамак с малым аспектным отношением.

В разделе 1.1 описываются преимущества малого аспектного токамака. Обсуждаются гипотезы о возможности получения улучшенных параметров плазмы в существенно более низких тороидальных магнитных полях. Особое внимание уделяется запасу устойчивости плазмы. При уменьшении аспектного отношения в цилиндрическом приближении тороидальное

магнитное поле может быть уменьшено как обратное аспектное отношение при том же токе по плазме. Анализ показывает, что поле можно дополнительно уменьшить при учете поправки на тороиальность. Кроме этого, тороиальное магнитное поле может быть снижено из-за возникновения естественной вытянутости плазмы и уменьшении запаса устойчивости на краю плазмы по сравнению с классическим токамаком. Кроме этого, приводится обоснование возможности получения предельных значений энергозапаса плазмы (тороиального бета) [3].

Приведено описание ныне действующих и закрытых сферических токамаков, с их основными параметрами. Обсуждаются результаты экспериментов. Предельные параметры, полученные на сферических токамаках, полностью подтвердили сделанные выше предположения. Продемонстрирована повышенная устойчивость плазмы.

В разделе 1.2 описана задача равновесия плазмы. Приводится уравнение Грэда-Шафранова [4] с предположениями, сделанными для его вывода и описанием возможности его использования. Обсуждается вопрос о возможности измерения энергозапаса плазмы.

В разделе 1.3 показано, что в том случае, когда плазма имеет вытянутость отличную от единицы, имеется возможность определять полный кинетический энергозапас плазмы по магнитным измерениям (без привлечения диамагнитных измерений) [5].

В разделе 1.4 приводятся результаты использования кода равновесия EFIT на основных сферических токамаках. Приводятся магнитные конфигурации плазмы для некоторых токамаков. Продемонстрировано соответствие измерений энергосодержания плазмы с помощью магнитной диагностики и кинетических измерений.

Постановка задачи настоящей диссертации описана в разделе 1.5. Основным направлением деятельности является построение магнитной диагностики токамака для реконструкции равновесия плазмы и управления плазмой в реальном масштабе времени.

В **Главе 2** приводится описание сферического токамака Глобус-М [6] и его магнитной диагностики. Обсуждается модель равновесия плазмы,

методика исследования и набор определяемых параметров. Приведено описание оболочки для работы с кодом EFIT.

В разделе 2.1 приведено подробное описание токамака Глобус-М. Описаны системы тороидального и полоидального магнитных полей, включая описание обмоток токамака, источников питания и способов контроля токов в них [7]. Особое внимание уделено вакуумной камере токамака [8].

В разделе 2.2 приводится подробное описание магнитной диагностики токамака Глобус-М, спроектированной на стадии изготовления самой установки. Диагностика включает в себя комплекты полоидальных магнитных зондов, магнитных петель и поясов Роговского для измерений токов в обмотках, тока по плазме и тока по вакуумной камере [9].

Описание кода EFIT сделано в разделе 2.3. Вводятся понятия решения задач равновесия со свободной границей, фиксированными токами и задачи реконструкции равновесия по внешним измерениям магнитных полей и потоков.

В рамках данной работы была разработана оболочка кода EFIT для удобного его использования. Подробное описание ее приводится в разделе 2.4 настоящей диссертации.

В разделе 2.5 обсуждается методика оптимизации магнитных датчиков для выбора оптимального комплекта. На фазе разработки кода равновесия EFIT, в нем была предусмотрена возможность задавать максимальную ошибку измерения сигнала.

В разделе 2.6 обсуждается вопрос влияния данной ошибки на сходимость задачи реконструкции равновесия.

В заключении 2-й главы диссертации, в разделе 2.7 активно обсуждается вопрос о возможности применения различных видов датчиков магнитной диагностики для реконструкции равновесия плазмы. Сделан вывод о трудностях применения магнитных зондов в общем случае для решения данной задачи.

В **Главе 3** описана задача расчета равновесия плазмы. Данная задача позволяет по измеренным токам в обмотках токамака восстанавливать форму

плазмы. Кроме этого, данная задача является необходимым шагом для реконструкции равновесия плазмы.

В рамках настоящей диссертации разработан алгоритм измерения положения плазмы по большому радиусу (раздел 3.1). Показана неприменимость методик измерения, использующихся на классических токамаках, для сферического токамака.

Анализ показал, что предложенная методика слабо зависит от основных плазменных параметров (вытянутость, треугольность, полоидальное бета и внутренняя индуктивность). Алгоритм рассчитан на измерение большого радиуса плазмы в реальном масштабе времени в лимитерной плазме. Диагностика использует сигналы седловидной магнитной петли, двух однокоординатных магнитных зондов или пояса Роговского, измеряющего ток по плазме. Приводятся результаты экспериментов по управлению плазмой по предложенной методике [10].

В разделе 3.2 приводится подробное описание задачи расчета равновесия плазмы. Сформулированы возможности данной диагностики (входные и выходные параметры). Обсуждается вопрос о возможном исследовании плазмы с помощью решения данной задачи.

В разделе 3.3 исследовано влияние различных обмоток токамака на плазму. Особое внимание уделяется центральному соленоиду токамака. В эксперименте было показано, что существует возможность получить дополнительное напряжение на обходе токамака с помощью обмотки RF2. Здесь же приводятся результаты работы с предельными значениями вытянутости плазмы. Определен диапазон выхода ветвей сепаратрисы на вакуумную камеру токамака.

В разделе 3.4 обсуждается возможность управления плазмой в вертикальном направлении. Показано, что вследствие искажения формы плазмы относительно средней плоскости токамака показания дипольного датчика не соответствуют положению плазмы по вертикали. Предлагаются альтернативные способы управления плазмой.

В этом же разделе описывается реконструкция равновесия плазмы с использованием магнитных зондов. Сходимость задачи реконструкции носила случайный характер. На основе данных экспериментов был сделан

окончательный вывод о нецелесообразности использования (без использования магнитных петель) магнитных зондов для реконструкции равновесия плазмы.

В **Главе 4** приводится описание задачи реконструкции равновесия плазмы. Предложен алгоритм выбора комплекта магнитных датчиков для реконструкции равновесия плазмы. Приводятся результаты экспериментов.

Разработан алгоритм выбора комплекта магнитной диагностики для реконструкции равновесия плазмы. Данный алгоритм и его реализация описаны в разделе 4.1. Координаты петель выбираются из условия минимизации ошибки интерполяции измеренных данных до замкнутого контура. Такой выбор комплекта магнитных петель позволяет решать широкий круг задач помимо равновесия. К ним можно отнести реконструкцию полоидального магнитного поля внутри вакуумной камеры токамака в отсутствие плазмы.

В разделе 4.2 подробно описана модель токамака Глобус-М для реконструкции равновесия плазмы. Модель состоит из обмоток полоидального магнитного поля, центрального соленоида, вакуумной камеры, лимитера и магнитных петель [11].

Описан способ моделирования катушек токамака по измерениям сделанным с помощью магнитных петель. На основе этих измерений создана модель центрального соленоида токамака Глобус-М. С помощью уточненной модели избавиться от несоответствия входных и выходных данных кода EFIT. После создания новой модели, результаты расчета и реконструкции равновесия совпадают с хорошей точностью.

В рамках создания модели токамака, была разработана модель вакуумной камеры, состоящая 69-ти элементов, каждый из которых представляет собой параллелограмм, с фиксированной шириной, толщиной, углом наклона, положением в пространстве и проводимостью. Ток в каждом элементе вычисляется по закону Ома, напряжение измеряется с помощью ближайшей к нему магнитной петли. Для уточнения модели были произведены расчеты наведенных токов в разряде токамака Глобус-М с помощью трехмерного кода TUPHOON. Для этого была создана трехмерная конечноэлементная модель вакуумной камеры токамака Глобус-М, учитывающая все патрубки.

В разделе 4.3 приводятся основные экспериментальные результаты, полученные с помощью магнитной диагностики. Приводится диапазон магнитных конфигураций в эксперименте. По результатам реконструкции равновесия была скорректирована программа радиального магнитного потока, что позволило увеличить длительность разряда более чем в 2-а раза.

Оценки, проведенные для разрядов с рекордными значениями полоидального бета, показали, что в предельных режимах токамака Глобус-М наблюдается магнитная яма. Зарегистрировано влияние перехода плазмы из лимитерной в диверторную конфигурацию. Показано что интенсивность всех линий падает в средней плоскости токамака и не изменяется на куполах.

В настоящей работе произведено исследование различных видов датчиков вертикального управления (на основе магнитных петель). Результаты исследования приведены в разделе 4.4. Эксперименты показали, что при управлении по квадрупольному датчику плазма стабилизируется значительно лучше. Кроме этого, управление по квадрупольному датчику способствует подавлению срыва плазмы.

В разделе 4.5 произведена оценка ошибки измерения основных выходных параметров кода EFIT для предложенной диагностики и модели токамака [12]. Оценки произведены с учетом возможного выхода из строя 2-х магнитных петель и ошибкой измерения 3%. Кроме этого, построены зависимости ошибок измерения всех параметров от соотношения тока по плазме и тока по вакуумной камере токамака. В результате был сделан вывод, что реконструкция равновесия корректна при токе по плазме больше 50кА.

В **Заключении** к диссертации приведены основные физические результаты, полученные в работе.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты работы сводятся к следующим:

1. Разработана модель токамака Глобус-М для расчета равновесия плазмы по экспериментальным данным. Произведено сравнение данных полученных с помощью двух кодов равновесия. Данные, полученные по коду DIALEQT, сравнивались с фотографиями плазмы, сделанными с помощью

скоростной видеокамеры. Результаты показали хорошее соответствие полученных данных.

2. Разработана методика измерения радиального положения плазмы сферического токамака. Методика была реализована для токамака Глобус-М. Анализ границ применимости методики показал, что она работает при смещении на  $\pm 10$  см и ошибка измерения составляет 2мм и зависимость от остальных плазменных параметров является достаточно слабой. В вакуумную камеру токамака Глобус-М установлены две седловидные петли, которые позволяют управлять плазмой с помощью предложенной методики в реальном масштабе времени.
3. Исследованы различные датчики магнитной диагностики. Произведен глубокий анализ различных видов датчиков для различных видов задач. Показано, что для реконструкции равновесия плазмы оптимальным датчиком является замкнутая в тороидальном направлении магнитная петля.
4. Разработана модель токамака Глобус-М для реконструкции равновесия плазмы. Модель учитывает обмотки полоидального магнитного поля токамака, лимитер, магнитные петли и вакуумную камеру. Распределение тока по вакуумной камере измеряется с помощью того же комплекта магнитных петель.
5. Произведен подробный анализ ошибок реконструкции параметров плазмы для предложенного комплекта магнитной диагностики. На основе этих данных были сформулированы ограничения по области реконструкции равновесия плазмы в разрядах токамака Глобус-М.
6. Разработан комплекс магнитной диагностики для корректной реконструкции равновесия плазмы. Комплекс рассчитан на выход из строя до 10% петель и на ошибку измерения 3%. Предложен алгоритм размещения магнитных петель на вакуумной камере токамака.
7. Исследован диапазон геометрических параметров плазмы. Было показано, что большую часть разряда внутри вакуумной камеры находятся X-точки. Изучен диапазон выхода ветвей сепаратрисы на вакуумную камеру токамака. Результаты обработки большого числа разрядов токамака

показал, что в токамаке Глобус-М плазма получается со следующими параметрами: вытянутость 1,0 – 2,2, треугольность 0,0 - 0,45.

8. Исследовано влияние конфигурации плазмы на работоспособность дипольного датчика радиального потока. Корректировка программы радиального потока позволила в ряде разрядов токамака Глобус-М устранить срыв и увеличить длительность примерно в два раза.
9. Исследован квадрупольный датчик для стабилизации вертикального положения плазмы. Анализ с помощью кода EFIT показал, что соответствие показаний датчика и реального положения плазмы существенно улучшены. При управлении вертикальным положением плазмы с помощью квадрупольного датчика существенно увеличивается устойчивость плазмы.
10. Исследовано влияние плазменной конфигурации на поток примеси. В проведенных экспериментах при переходе плазмы из лимитерной в диверторную конфигурацию уменьшается интенсивность свечения примесных и основных линий в средней плоскости токамака. При этом интенсивность линии основной компоненты плазмы на куполах не изменяется, а сигнал обзорного болометра уменьшается.
11. Все вышеприведенные результаты позволили производить в автоматическом режиме измерение данных и их обработку. Все разряды токамака Глобус-М обрабатываются с помощью реконструкции равновесия в приведенных выше пределах. В основной базе данных токамака содержатся выходные данные кода равновесия EFIT, начиная с разряда номер № 11000.
12. Работа способствовала получению широкого спектра магнитных конфигураций сложной формы и проведению в этих конфигурациях различных экспериментов по дополнительному нагреву, определению рабочих пределов, достижению предельной плотности и т.д.

#### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бендер С.Е, Голант В.Е., Гусев В.К., Деч А.В., Косцов Ю.А, Кузнецов Е.А., Левин Р.Г., Минаев В.Б., Минеев А.Б., Миняев О.А., Новохацкий А.Н., Петров Ю.В., Румянцев Е.Н., Сахаров Н.В., Щербицкий В.Н.,

- Васильев В.И., Ягнов В.А., Investigation of Equilibrium in Globus-M Ohmic Plasmas. //Proceedings of 28<sup>th</sup> EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Funchal, Madeira, 18-22 June 2001
2. В.К. Гусев, С.Е. Бендер, А.В. Деч, Ю.А. Косцов, Р.Г. Левин, А.Б. Минаев, Н.В. Сахаров. Методы реконструкции равновесия плазмы на сферическом токамаке Глобус-М. // ЖТФ, т. 76, Вып. 8, с.25-33, 2006
  3. V.K. Gusev, F.V. Chernyshev, V.E. Golant, V.M. Leonov, R.G. Levin, V.B. Minaev, A.B. Mineev, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, S.Yu. Tolstyakov, V.I. Varfolomeev, A.V. Voronin, E.G. Zhilin. Density limits and control in the Globus-M spherical tokamak. // Nucl. Fusion 46 (2006) s584-s591
  4. V.I. Vasiliev, Yu.A. Kostsov, K.M. Lobanov, L.P. Makarova, A.B. Mineev, V.K. Gusev, R.G.Levin, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov. On-line plasma shape reconstruction algorithm in tokamaks and its verification in the Globus-M. // Nucl. Fusion 46 (2006) s625-628
  5. Гусев В.К., Дьяченко В.В., Жилин Е.Г., Левин Р.Г., Леонов В.М., Минаев В.Б., Новохацкий А.Н., Петров Ю.В., Подушникова К.А., Сахаров Н.В., Тилинин Г.Н., Щербинин О.Н. Получение и изучение режимов с предельными давлениями плазмы в токамаке Глобус-М при комбинированном дополнительном нагреве. // Отчет о НИР № 0220.0 600939, Иоффе Фьюжн Текнолоджи, 2005
  6. Гусев В.К., Ананьев А.С., Бурцева Т.А., Голант В.Е., Деч А.В., Крикунов С.В., Левин Р.Г., Медведев С.Ю., Минаев В.Б., Минеев А.Б., Миняев О.А., Мухин Е.Е., Новохацкий А.Н., Петров Ю.В., Подушникова К.А., Рождественский В.В., Сахаров Н.В., Вильджунас М.И., Виноградов Н.И. Operational Limits and Plasma Stability in OH Discharge of Globus-M Spherical Tokamak. // Proceedings of 28<sup>th</sup> EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Funchal, Madeira, 18-22 June 2001
  7. Сахаров Н.В., Ананьев А.С., Бендер С.Е., Голант В.Е., Гусев В.К., Деч А.В., Коньков О.И., Косцов Ю.А., Кузнецов Е.А., Левин Р.Г., Минаев В.Б., Минеев А.Б., Миняев О.А., Новохацкий А.Н., Петров Ю.В., Румянцев Е.Н., Щербицкий В.Н., Теруков Е.И., Трапезникова И.Н., Ягнов В.А. // Scenario of Globus-M Operation in OH Regime, Proceedings of

- Joint 2nd IAEA Technical Committee Meeting on Spherical Tori and 7th International Spherical Torus Workshop, 2001, S J Campos, SP
8. Гусев В.К., Александров С.В., Бурцева Т.А., Чугунов И.Н., Деч А.В., Гаврилов Г.А., Голант В.Е., Косцов Ю.А., Крикунов С.В., Кузнецов Е.А., Левин Р.Г., Минаев В.Б., Минеев А.Б., Миняев О.А., Мухин Е.Е., Новохацкий А.Н., Петров Ю.В., Подушникова К.А., Румянцев Е.Н., Сахаров Н.В., Семенов В.В., Шарапов В.М., Сотникова Г.Ю., Узлов В.С., Васильев В.И., Вильджунас М.И., Ягнов В.А. Plasma Formation and First OH Experiments in the Globus-M Tokamak. // Proc. of 18<sup>th</sup> Fusion Energy Conference, Sorrento, Italy, 2000, (2000) EXP1/03
  9. Гусев В.К., Бурцева Т.А., Деч А.В., Гаврилов Г.А., Голант В.Е., Крикунов С.В., Левин Р.Г., Минаев В.Б., Минеев А.Б., Миняев О.А., Мухин Е.Е., Новохацкий А.Н., Петров Ю.В., Румянцев Е.Н., Сахаров Н.В., Шарапов В.М. Plasma Formation and First OH Experiments in the Globus-M Tokamak. // Nuclear Fusion, July, 2001, p.919.
  10. В.А.Беляков, С.Е.Бендер, А.А.Кавин, Ю.А.Косцов, Р.Г.Левин, К.М.Лобанов, В.В.Васильев. Digital Plasma Position Control System in Globus-M Tokamak. // 30<sup>th</sup> EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, July 2003.
  11. В.М.Амосков, С.Е.Бендер, В.К.Гусев, А.В. Деч, Р.Г. Левин, А.Б.Минеев, О.А.Миняев, Н.В.Сахаров, С.В.Цаун. Особенности МГД равновесия плазмы в токамаках с вытянутым сечением. // Тезисы докладов 31-й Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 2004
  12. V.Amoskov, A.Belov, V.Belyakov, T.Belyakova, O.Filatov, E.Gapionok, D.Garkusha, V.Gusev, E.Lamzin, R.Levin, V.Kukhtin, N.Sakharov, S Sytchevsky. Simulation and analysis of eddy currents induced in the GLOBUS-M tokamak. // Plasma Devices and Operations, Vol. 13, No. 1, March 2005, 25-38
  13. В.М.Амосков, А.В.Белов, Т.Ф. Белякова, Е.И. Гапионок, Д.Б. Гаркуша, В.К.Гусев, В.А.Коротков, В.П. Кухтин, Е.А.Ламзин, Р.Г.Левин, С.Н.Садаков, Н.В.Сахаров, С.Е.Сычевский. Численное моделирование

распределения вихревых токов на вакуумной камере установки «Глобус-М». // Препринт НИИЭФА П-0980.

14. С.Е.Бендер, В.К.Гусев, А.В.Деч, Ю.А.Косцов, Р.Г.Левин, А.Б.Минеев, Н.В.Сахаров. Реконструкция формы и энергосодержания плазмы по магнитным измерениям на токамаке Глобус-М. // Тезисы докладов конференции ДВП-11, Звенигород 2005
15. V.B.Minaev, V.B.Ayushin, A.G.Barsukov, F.V.Chernyshev, L.A.Esipov, V.K.Gusev, V.G.Kapralov, S.V.Krikunov, V.M.Leonov, R.G.Levin, A.N.Novokhatskii, M.I.Patrov, Yu.V.Petrov, K.A.Podushnikova, V.V.Rozhdestvenskii, N.V.Sakharov, G.N.Tilinin, S.Yu.Tolstyakov. Study of the Beam - Plasma Interaction in the Globus-M Spherical Tokamak. // Proc. of 32nd EPS Conference on Plasma Phys. Tarragona, 2005, P-1.103
16. V.M. Amoskov, V.A.Belyakov, S.E.Bender, V.K. Gusev, A.A. Kavin, E.A. Lamzin R.G.Levin, S.N. Sadakov, S.E. Sychevskii, O.G. Filatov. Real-Time Determination of the Position and Shape of the Plasma Column from External Magnetic Measurements in the Globus-M Tokamak. // Plasma Physics, Vol.29, № 12, pp. 997-1008, 2003
17. Амосков В.М., Беляков В.А., Бендер С.Е., Гусев В.К., Кавин А.А., Ламзин Е.А., Левин Р.Г., Садаков С.Н., Сычевский С.Е., Филатов О.Г. Определение положения и формы плазменного шнура по данным внешних магнитных измерений для токамака Глобус-М в режиме реального времени. // Физика плазмы, т. 29, № 12, 2003, с. 1-3.
18. S. Bender, V.Gusev, A.Detch, Yu.Kostsov, R. Levin, K. Lobanov, N.Sakharov. Reconstruction of plasma shape and plasma energy in Spherical Tokamak Globus-M. // The 3rd IAEA TM on Spherical Tori and 11th IWS on Spherical Tori Санкт-Петербург, 2005
19. Бендер С.Е., Гусев В.К., Деч А.В., Косцов Ю.А., Левин Р.Г., Минеев А.Б., Сахаров Н.В. Методы реконструкции равновесия плазмы на сферическом токамаке ГЛОБУС-М. // Тезисы докладов 33-й Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 2005.

## ЛИТЕРАТУРА, ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ

1. Morris A., et al. // Plasma Physics and Controlled Fusion v. 41 p.191, 1999
2. Lao, L., et al. // Nuclear Fusion, Vol. 25, No 10 (1985)
3. A Sykes. // International conference Physics at the Turn of the 21<sup>st</sup> century (1983)
4. Шафранов В.Д. // ЖЭТФ Вып.3(9), 1957
5. С.Е.Бендер и др. // Тезисы докладов конференции ДВП-11, Звенигород 2005
6. N.V Sakharov, et al. // Plasma Devices and Operations Vol. 9 Nos. 1-2 (2001) 25-38
7. A.Alekseev, et al. // Plasma Devices and Operations Vol. 9 Nos. 1-2 (2001) 57-82
8. V.A. Divavin, et al. // Plasma Devices and Operations Vol. 9 Nos. 1-2 (2001) 95-104
9. V.V. Bulanin, et al. // Plasma Devices and Operations Vol. 9 Nos. 1-2 (2001) 129-142
10. С.Е.Бендер и др. // Труды 2-й Курчатовской Молодежной Научной Школы, Москва, 2004
11. V.I. Vasiliev et al. // Nucl. Fusion 46 (2006) s625-628
12. В.К. Гусев и др. // ЖТФ, т. 76, Вып. 8, с.25-33, 2006