

На правах рукописи

Патров Михаил Иванович 

**МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ
ПЛАЗМЫ В ОМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ
СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА ГЛОБУС-М**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник
Петров Ю.В.

Научный консультант доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник
Гусев В.К.

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, зав. лабораторией, ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Кузнецов В.И.

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник ГНЦ РФ ТРИНИТИ
Белов А.М.

Ведущая организация ФГУП Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова

Защита состоится «31» мая 2012 г. в 16:00 на заседании
Диссертационного Совета Д002.205.03 при Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф.
Иоффе Российской академии наук по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул.
Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Автореферат разослан «26» апреля 2012 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
Кандидат физико-математических наук

Красильщиков А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы диссертации.

Диссертация посвящена актуальной проблеме магнитогидродинамической устойчивости плазменного шнура сферического токамака. Работа выполнена на компактном сферическом токамаке Глобус-М [1].

Концепция сферического токамака [2] является потенциально важной для оптимизации параметров термоядерного реактора, возможного уменьшения его размеров и стоимости. Сферические токамаки обладают большей магнитогидродинамической (МГД) устойчивостью плазменного шнура, по сравнению с традиционными токамаками, что положительно сказывается на увеличении относительного давления плазмы, то есть отношения газокINETического давления плазмы к давлению магнитного поля [3].

Для реализации УТС, основными являются проблемы нагрева плазмы до высоких ионных температур (около десятка кэВ) при достаточно высокой плотности и ее удержания в течение долгого времени, для чего требуется обеспечить магнитогидродинамическую устойчивость плазменного шнура [4]. Очевидно, что в любом токамаке нельзя превзойти предела устойчивости по отношению к развитию идеальных МГД возмущений. В противном случае, плазма подвергается катастрофическому разрушению за характерные времена много меньше необходимого времени удержания. Это говорит о необходимости всестороннего изучения МГД возмущений плазмы сферического токамака. Опыт предыдущих исследований позволил выделить целый ряд МГД возмущений, ограничивающих диапазон рабочих параметров сферического токамака [5], и показал, что применяя различные сценарии разряда, приемы и технологии подготовки эксперимента, управления плазменным шнуром и т.д. [6], можно либо предотвратить, либо существенно снизить негативное влияние МГД возмущений на параметры разряда.

Основной целью данной работы было изучение влияния МГД возмущений плазменного шнура сферического токамака на достижение

предельных параметров разряда, идентификация и попытка предотвращения развития неустойчивостей, ограничивающих диапазон рабочих параметров сферических токамаков.

Цели работы.

1. Разработать и подготовить к эксперименту диагностику МГД возмущений плазмы сферического токамака Глобус-М на основе массивов магнитных зондов и камеры обскуры мягкого рентгеновского излучения.
2. Разработать метод обработки сигналов магнитных зондов для определения полоидальных и тороидальных номеров мод винтовых МГД возмущений плазмы сферического токамака Глобус-М.
3. Провести экспериментальное исследование МГД возмущений, влияющих на формирование устойчивого плазменного шнура токамака на начальной стадии разряда и стадии плато тока плазмы.
4. Изучить асимметрию вакуумного магнитного поля и разработать методы ее компенсации.
5. Провести исследование МГД возмущений, приводящих к срыву и ограничивающих достижение предельных величин тока и плотности плазмы в омическом режиме.
6. Разработать методы борьбы с наиболее опасными МГД неустойчивостями.

Новизна работы.

Впервые на компактном сферическом токамаке:

1. Создан полный диагностический комплекс МГД возмущений на основе магнитных зондов, позволяющий экспериментально определять их полоидальную и тороидальную структуру;
2. Экспериментально определены полоидальные и тороидальные номера МГД мод на различных стадиях разряда;

3. Экспериментально продемонстрирована возможность влиять на запираание МГД мод и, как следствие, на параметры разряда посредством корректировки асимметрии вакуумного магнитного поля;
4. В широком диапазоне параметров получены данные по порогам запираания моды 2/1;
5. Экспериментально исследовано и численно промоделировано развитие возмущения типа «снейк».

Достоверность научных результатов. Полученные в ходе работы результаты экспериментально подтверждены и теоретически обоснованы. Их достоверность обеспечена сопоставлением с данными измерений, выполненных различными диагностическими средствами и построенных на других физических принципах.

Личное участие автора. Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии. При определяющем участии автора создан диагностический комплекс для исследования МГД возмущений на основе магнитных зондов и камеры обскуры мягкого рентгеновского излучения. Автором разработан метод обработки сигналов магнитных зондов для восстановления полоидальной структуры МГД возмущений. При непосредственном участии автора изучена асимметрия вакуумного магнитного поля и разработаны методы ее компенсации. При активном участии автора проведено исследование пилообразных колебаний и тиринг моды. Автором проведено исследование и моделирование развития возмущения «снейк».

Практическая значимость работы. Главным практическим результатом работы стало определение наиболее опасных МГД возмущений, приводящих к срыву или к деградации параметров плазмы на различных стадиях разряда сферического токамака Глобус-М и выработка методов по минимизации их негативного влияния на параметры разряда.

Предложены рекомендации по оптимальной скорости подъема тока. Проведена корректировка асимметрии вакуумных магнитных полей с помощью специально изготовленных катушек, в результате которой увеличилась длительность и улучшились параметры разряда.

Предложен метод обработки экспериментальных сигналов массивов магнитных зондов, позволяющий оперативно определять номера доминирующих МГД возмущений практически на всех стадиях разряда.

Впервые всесторонне экспериментально исследованы основные МГД неустойчивости, ограничивающие рабочие параметры плазмы компактного сферического токамака.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработка и создание диагностики и метода идентификации мод МГД возмущений сферического токамака Глобус-М.
2. Экспериментальное определение полоидальной структуры МГД возмущений начальной стадии разряда и стадии плато.
3. Оптимизация структуры магнитного поля путем корректировки вакуумного магнитного поля моды $n=1$.
4. Экспериментальное обнаружение и изучение характеристик тиринг моды в режиме с высоким полоидальным бета на сферическом токамаке Глобус-М.
5. Результаты исследования возмущения «снейк» в плазме сферического токамака Глобус-М

Апробация работы и публикации. Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены в период 2001 – 2011 гг. и изложены в 22 печатных работах, в т.ч. в 6 статьях в реферируемых журналах. Результаты диссертации представлялись автором на международных конференциях: XXXVI EPS Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion (София, 2009), Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (XXXI, XXXII,

XXXIII, XXXIV, XXXVII, Звенигород, 2004, 2005, 2006, 2007, 2010), на всероссийских конференциях: 11-я Всероссийская конференция Диагностика высокотемпературной плазмы (Звенигород, 2005), День науки Санкт-Петербургского Государственного Технического Университета (Санкт-Петербург, 2001, 2002); на совместных симпозиумах, проводимых Калэмским (Culham) научным центром (Великобритания) и ФТИ им. А.Ф. Иоффе, проводимых Helsinki University of Technology (Финляндия) и ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также на семинарах лаборатории Физики высокотемпературной плазмы ФТИ им А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Диссертация изложена на 148 страницах, содержит 62 рисунка и 6 таблиц; список литературы содержит 150 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируется цель. Далее указывается научная новизна полученных результатов и степень участия автора в проведенной работе.

В главе 1 диссертации представлен обзор основных результатов, полученных на сферических токамаках, описаны предпосылки развития винтовых неустойчивостей. Представлено описание токамака Глобус-М, анализируются особенности его конструкции и условия проведения плазменных экспериментов. Приведен обзор основных МГД возмущений, ограничивающих рабочие параметры сферических токамаков. На основании обзора, формулируются задачи диссертационной работы.

В разделе 1.1 описана задача равновесия плазмы. Формулируются предпосылки развития винтовых возмущений различных типов – кинк, тиринг моды, баллонной и желобковой неустойчивости. Как показывает анализ, проявление различных типов неустойчивостей, разделяется по характерному

масштабу. Самые мощные из них, приводят к ограничению таких важных параметров плазмы токамака как бета и плотность, или даже затуханию разрядного тока и завершению разряда.

В разделе 1.2 описаны основные методы диагностики МГД возмущений плазменного шнура токамаков, к которым относятся магнитные зонды и датчики мягкого рентгеновского излучения.

В разделе 1.3 описаны основные преимущества концепции сферического токамака. Показано, что магнитная конфигурация сферического токамака обладает большей МГД устойчивостью и позволяет достигать большего относительного давления плазмы. Описаны основные экспериментальные результаты, подтверждающие эту концепцию.

В разделе 1.4 приведено описание компактного сферического токамака Глобус-М, его электромагнитной системы, вакуумной камеры, основных диагностик. К особенностям сферического токамака Глобус-М относятся близкое расположение плазменного шнура к поверхности вакуумной камеры и большая плотность тока.

Раздел 1.5 посвящен МГД возмущениям, ограничивающим рабочие параметры сферических токамаков на различных стадиях разряда. Именно эти возмущения являлись предметом исследований настоящей диссертационной работы.

На основании материалов, приведенных в главе 1, в разделе 1.6 формулируются задачи настоящей диссертационной работы.

В **Главе 2** физически обосновывается конструкция и характеристики комплекса диагностики МГД возмущений на основе магнитных зондов, камеры обскуры мягкого рентгеновского излучения, метода обработки экспериментальных сигналов. Анализируется модовый состав МГД возмущений, наблюдаемых в плазме сферического токамака Глобус-М.

В разделе 2.1 формулируются основные требования к разрабатываемой магнитной диагностике МГД возмущений сферического токамака Глобус-М (требуемые характеристики магнитных зондов, их количество и расположение).

В разделе 2.2 приведено описание конструкции созданного диагностического комплекса МГД возмущений сферического токамака Глобус-М, включающего два массива зондов (28 зондов полоидального массива и 16 тороидального), которые позволяют регистрировать винтовые возмущения с полоидальным числом $m \leq 10$ и тороидальным $n \leq 3$, а также 32-х канальной диагностики мягкого рентгеновского излучения.

В разделе 2.3 подробно описан, разработанный автором, метод определения номеров мод винтовых возмущений плазменного шнура токамака Глобус-М.

В разделе 2.4 описаны результаты первых наблюдений МГД возмущений при помощи созданной диагностики. Показано, что кроме неустойчивостей начальной стадии разряда, наблюдаются моды $m/n=2/1$, $m/n=1/1$, пилообразные колебания, внутреннее перезамыкание силовых линий магнитного поля, которое может приводить к окончанию (срыву) разряда. Экспериментально замечено «запирание» развитых винтовых МГД возмущений, что может свидетельствовать о наличии неоднородности вакуумного магнитного поля, создаваемого обмотками токамака.

Глава 3 содержит подробное описание возмущений, развивающихся на стадии роста тока и плато тока плазмы. Анализируется их полоидальная структура и влияние на формирование разряда. Приводится описание конструкции корректирующих обмоток токамака Глобус-М, метода определения асимметрии вакуумных магнитных полей и результатов ее корректировки. Приведены результаты измерений параметрических зависимостей порогов запания моды 2/1.

В раздел 3.1 описаны возмущения, развивающиеся на стадии роста тока и плато тока плазмы. Показано, что развивающиеся возмущения имеют значения

$m \leq 4$ и $n \leq 2$ и, скорее всего, носят характер тиринг мод. Приведен результат изучения влияния МГД возмущений начальной стадии на формирование разряда. Показано, что для создания МГД устойчивой и чистой плазмы в токамаке Глобус-М, ток плазмы в разряде следует наращивать с умеренной скоростью около 4 – 6 МА/с.

В разделе 3.2 показано, что тиринг неустойчивости стадии плато тока плазмы токамака Глобус-М имеет пороговый характер развития от величины полоидального бета и, возможно, являются неоклассической тиринг модой (НТМ). Развитие тиринг моды происходит без видимой предшествующей МГД активности. Исследовано взаимодействие тиринг моды и пилообразных колебаний. Установлено, что в омическом режиме токамака Глобус-М, пилообразные колебания являются стабилизирующим фактором по отношению к тиринг моде, затрудняющим ее развитие

В разделе 3.3 приведены результаты исследования асимметрии вакуумного магнитного поля. Описана, созданная при участии автора, система корректирующих катушек, способная создавать компенсирующее поле моды $n=1$ произвольного направления. Описаны результаты применения этой системы в экспериментах – предотвращение развития запертых МГД мод, увеличение длительности разряда токамака, увеличение энергосодержания плазмы, рост нормализованного бета. Также приведены результаты исследования параметрических зависимостей порога запирающей моды 2/1 от величины плотности и запаса устойчивости, существенно дополняющие базу данных других установок.

Глава 4 посвящена внутренним МГД неустойчивостям плазменного шнура сферического токамака Глобус-М. Анализируются результаты численного моделирования развития возмущения «снейк». Приведены результаты исследований воздействия пилообразных колебаний на достижение предельных плотностей. Определяется диапазон рабочих параметров компактного

сферического токамака Глобус-М и обсуждаются причины развития неустойчивости срыва.

В разделе 4.1 описано наблюдение спонтанного развития возмущения типа «снейк» модой 1/1. Приведены результаты численного моделирования экспериментально наблюдаемого развития этого возмущения. Показано, что наиболее вероятной причиной развития «снейка» в токамаке Глобус-М, является поступление в плазму большого количества примесных частиц и их аккумуляция в центральной области плазменного шнура. Анализ экспериментальных данных показывает, что технологический предел по плотности характерный развитием возмущения «снейк» можно преодолеть более тщательной подготовкой вакуумной камеры к эксперименту.

В разделе 4.2 описаны исследования влияния пилообразных колебаний на достижение предельных плотностей плазмы. Показано, что пилообразные колебания не являются фактором, ограничивающим достижение предельных плотностей.

В разделе 4.3 определяется диапазон рабочих параметров токамака, обсуждаются причины развития неустойчивости срыва. Приводятся экспериментальные данные, показывающие, что плотность плазмы ограничивается пределом Гринвальда, по крайней мере, в режимах с омическим нагревом плазмы.

В **заключении** сформулированы основные физические результаты диссертационной работы и положения выносимые на защиту.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты работы сводятся к следующим:

1. Разработана диагностика МГД возмущений плазменного шнура токамака Глобус-М, включающая полоидальный и тороидальный массивы магнитных зондов и камеру обскуру мягкого рентгеновского излучения, позволяющая регистрировать винтовые возмущения с числами $m \leq 6$ и $n \leq 4$.

2. Разработан и применен в экспериментах метод определения номеров мод винтовых возмущений плазменного шнура токамака Глобус-М.
3. Установлены характерные типы развивающихся возмущений – кроме неустойчивостей начальной стадии разряда, наблюдаются моды $m/n=2/1$, $m/n=1/1$, пилообразные колебания, внутреннее перезамыкание силовых линий магнитного поля, которое может приводить к окончанию (срыву) разряда.
4. Изучены неустойчивости начальной стадии разряда. Установлено, что развиваются МГД возмущения $m \leq 4$ и $n \leq 2$.
5. Изучено влияние возмущений начальной стадии на формирование разряда и установлено, что для достижения больших токов по плазме и длительного поддержания их в течение разряда, следует проводить разряды с умеренной скоростью роста тока около 4 – 6 МА/с.
6. Проведены исследования асимметрии вакуумного магнитного поля. Создана система корректирующих катушек, способная создавать компенсирующее поле моды $n=1$ произвольного направления. Применение этой системы в экспериментах позволило ослабить, а в некоторых случаях предотвратить развитие запертых МГД мод, увеличить длительность разряда токамака, повысить энергосодержание и нормализованную бету, при этом величины тороидального и нормализованного бета в омическом разряде достигли рекордных значений 10 % и 5 % мТл/МА соответственно.
7. Проведено исследование параметрических зависимостей порога запираания моды 2/1 от величины плотности и тока плазмы. Полученные зависимости существенно дополняют базу данных других установок, в особенности, в области высоких плотностей плазмы.
8. Установлено, что предел по плотности плазмы сферического токамака Глобус-М, характерный развитием возмущения «снейк» является лишь технологическим. Показано, что этот предел может быть преодолен тщательной подготовкой вакуумной камеры к эксперименту, что

подтверждается экспериментальными наблюдениями и численным моделированием.

9. Исследована интенсивность пилообразных колебаний в экспериментах по достижению предельных плотностей плазмы. Установлено, что пилообразные колебания не является фактором, препятствующим достижению предельных плотностей.
10. Экспериментально исследована тиринг мода, развивающаяся на стадии плато тока плазмы в разрядах с высокими полоидальными бета. Установлен пороговый характер развития тиринг моды в плазме сферического токамака Глобус-М от величины полоидального бета.
11. Исследовано взаимодействие тиринг моды и пилообразных колебаний. Установлено, что в плазме токамака Глобус-М, пилообразные колебания являются стабилизирующим фактором по отношению к тиринг модам стадии плато тока плазмы, затрудняющим их развитие.
12. Получен МГД устойчивый разряд в широком диапазоне плотности и тока плазмы, который в настоящее время используется в качестве мишени в проводимых исследованиях по дополнительному нагреву методом инъекции пучка нейтральных частиц и введением высокочастотной мощности на частоте ионно-циклотронного резонанса.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты работы были представлены в 16 докладах:

1. V.K. Gusev, V.M. Amoskov, A.S. Ananiev, ... , M.I. Patrov, et al. New Results from Globus-M Spherical Tokamak // Proceedings of 19th IAEA Fusion Energy Conference Lyon, France, 14-19 October 2002, IAEA CD-ROM (2003) IAEA-CN-94, EX/P3-10.

2. Yu.V.Petrov, S.E. Bender, V.K. Gusev, E.G. Kuzmin, A.B. Mineev, I.A. Mironov, R.G. Levin, M.I. Patrov, N.V.Sakharov. Experimental Study of Mirnov Oscillations in Low Aspect Ratio Globus-M Plasma. // Proc. of 30th EPS Conference

on Contr. Fusion and Plasma Phys., St.Petersburg, 7-11 July 2003 ECA Vol.27A. P-3.109.

3. V.K. Gusev, A.S. Ananyev, F.V. Chernyshev, ..., M.I. Patrov, et al. High Performance OH Regimes in the Globus-M Spherical Tokamak. // Proc. of 31th EPS Conference on Plasma Phys. London, 2004, ECA Vol. 28G, P-4.158

4. С.Е. Бендер, В.К. Гусев, Р.Г. Левин, А.Б. Минеев, М.И. Патров, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров. Экспериментальное исследование МГД возмущений плазменного шнура сферического токамака Глобус-М. // В сб. XXXI Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 16 – 20 февраля 2004 г.

5. С.Е. Бендер, В.К. Гусев, С.В. Крикунов, Р.Г. Левин, В.Б. Минаев, А.Б. Минеев, И.А. Миронов, М.И. Патров, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, А.В. Сушков. МГД неустойчивости ограничивающие рост плотности плазмы в сферическом токамаке Глобус-М. // В сб. XXXII Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 14 – 18 февраля 2005 г., с. 97, Москва, 2005.

6. С.Е. Бендер, В.К. Гусев, А.В. Деч, В.Б. Минаев, И.А. Миронов, М.И. Патров, Ю.В. Петров. Диагностика флуктуаций магнитного поля плазменного шнура сферического токамака Глобус-М. // В сб. XI Всероссийской конференции по диагностике высокотемпературной плазмы, 13 – 18 июня 2005 г., с. 25-26, Троицк, 2005.

7. V.K.Gusev, A.G.Barsukov, F.V.Chernyshev, ..., M.I.Patrov, et al. Comparison of High Density Discharges Heated Ohmically and with NBI in the Globus-M Spherical Tokamak // Proc. of 32nd EPS Conference on Plasma Phys. Tarragona, 2005, P-5.076.

8. М.И. Патров, С.Е. Бендер, В.К. Гусев, Д.В. Кравцов, С.В. Крикунов, Р.Г. Левин, В.Б. Минаев, И.А. Миронов, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, А.В. Сушков. МГД неустойчивости ограничивающие рост плотности плазмы в сферическом токамаке Глобус-М. // В сб. XXXIII Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 13 – 17 февраля 2006 г., с. 96, Москва, 2006.

9. Yu.V.Petrov, S.E. Bender, V.K. Gusev, ..., M.I. Patrov, N.V. Sakharov, S.Yu.Tolstyakov. Plasma MHD Stability at Limiting Density on Globus M. // Proc. of 33rd EPS Plasma Physics conference, 19 – 23 June 2006, Roma, Italy, P.4-103.

10. V.K.Gusev, B.B.Ayushin, F.V.Chernyshev, ..., M.I.Patrov, et al. Overview of the Globus-M Spherical Tokamak Results. // Proc. of 21st IAEA Fusion Energy Conference, 16 – 21 October 2006, Chengdu, China, OV/P-3, p. 29.

11. Петров Ю.В., Аюшин Б.Т., Барсуков А.Г..., Патров М.И., и др. Результаты экспериментов на токамаке ГЛОБУС-М за период 2005-2006 годов. // В сб. XXXIV Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 12 – 16 февраля 2007 г., с. 14, Москва, 2007.

12. Патров М.И., Бендер С.Е., Гусев В.К., Крикунов С.В., Курские Г.С., Левин Р.Г., Минаев В.Б., Новохацкий А.Н., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю. МГД устойчивость при предельной плотности плазмы на сферическом токамаке ГЛОБУС-М. // В сб. XXXIV Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 12 – 16 февраля 2007 г., с. 46, Москва, 2007.

13. V.K. Gusev, B.B. Ayushin, F.V. Chernyshev, ..., M.I.Patrov, et al. First results on H-mode generation in the Globus-M spherical tokamak. // Proc. of 34th EPS Conference on Plasma Phys., 2 – 6 July 2007, Warsaw, Poland, 2007, ECA Vol. 31I P.1-078.

14. V.K. Gusev, S.E. Aleksandrov, V.Kh. Alimov, ..., M.I. Patrov, et al. Overview of Results obtained at the Globus-M Spherical Tokamak. // Proc. of 22nd IAEA Fusion Energy Conference, 13 – 18 October 2008, Geneva, Switzerland, 2008, OV/5-4.

15. M.I.Patrov, B.B.Ayushin, V.K.Gusev et al. High density regimes in Globus-M. // Proc. Of 36th EPS Conference on Plasma Phys. Sofia, June 29 - July 3, 2009 ECA Vol.33E, P-5.153.

16. В.И. Варфоломеев, В.К. Гусев, М.И. Патров, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров. Корректировка аксиальной асимметрии полоидального магнитного поля в сферическом токамаке ГЛОБУС-М. // В сб. XXXVII Звенигородская

конференция по физике плазмы и УТС, 8 – 12 февраля 2010 г., с. 59, Москва, 2010.

и опубликованы в 6 статьях в реферируемых изданиях:

1. 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 and E.G. Zhilin. Density limits and control in the Globus-M spherical tokamak. // Nuclear Fusion, vol. 46, No 8 (August 2006), S584-S591.

2. М.И. Патров, С.Е. Бендер, В.К. Гусев, Д.Э. Кравцов, И.А. Миронов, Ю.В. Петров, А.В. Сушков. Диагностика МГД неустойчивостей на сферическом токамаке ГЛОБУС-М. // Физика плазмы, 2007, т.33, №2, с. 81 – 90.

3. В.К. Гусев, С.Ю. Толстяков, В.И. Варфоломеев, А.В. Воронин, М.М. Кочергин, Г.С. Курскиев, М.М. Ларионов, Р.Г. Левин, В.Б. Минаев, Е.Е. Мухин, М.И. Патров, Ю.В. Петров, Г.Т. Раздобарин, Н.В. Сахаров, В.В. Семенов, А.Е. Шевелев, Д.Б. Гин, А.Б. Минеев. Исследование электронного компонента плазмы на сферическом токамаке Глобус-М в условиях предельных плотностей с помощью диагностики томсоновского рассеяния. // В сб. Вопросы атомной науки и техники, 2007, вып. 1, с. 39 – 56.

4. V.K. Gusev , S.E. Aleksandrov , V. Kh Alimov , I.I. Arkhipov , V.B. Ayushin, A.G. Barsukov , B. Ya Ber , F.V. Chernyshev , I.N. Chugunov , A.V. Dech, V.E. Golant , A.E. Gorodetsky , V.V. Dyachenko , M.M. Kochergin , G.S. Kurskiev, S.A. Khitrov , N.A. Khromov , V.M. Lebedev , V.M. Leonov , N.V. Litunovsky , I.V. Mazul , V.B. Minaev , A.B. Mineev , M.I. Mironov , I.V. Miroshnikov , E.E. Mukhin, Yu A. Nikolaev , A.N. Novokhatsky , A.A. Panasenkov , M.I. Patrov , M.P. Petrov, Yu V. Petrov , K.A. Podushnikova , V.A. Rozhansky , V.V. Rozhdestvensky, N.V. Sakharov , O.N. Shcherbinin , I. Yu Senichenkov , A.E. Shevelev , E.V. Suhov , I.N. Trapesnikova , E.I. Terukov , G.N. Tilinin , S. Yu Tolstyakov , V.I. Varfolomeev, A.V. Voronin , A.P. Zakharov, R. Kh Zalavutdinov , V.A. Yagnov , E.A. Kuznetsov and

E.G. Zhilin. Overview of results obtained at the Globus-M Spherical Tokamak. // Nuclear Fusion, 2009, vol. 49, №10, 104021 (11pp).

5. Ю.В. Петров, М.И. Патров, В.И. Варфоломеев, В.К. Гусев, Е.А. Ламзин, Н.В. Сахаров, С.Е. Сычевский. Корректировка аксиальной асимметрии полоидального магнитного поля в сферическом токамаке Глобус-М // Физика плазмы, 2010, т.36, №6, с. 492 – 498.

6. М.И. Патров, Ю.В. Петров, В.К. Гусев, Г.С. Курскиев, А.Н. Новохацкий, Н.В. Сахаров, С.Ю. Толстяков. Неустойчивость «снейк» в плазме сферического токамака Глобус-М // ЖТФ, 2011, т. 81, вып. 9, с. 38 – 44.

ЛИТЕРАТУРА, ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ

- [1]. Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З. и др., ЖТФ, 1999, т. 69, № 9, 58-62.
- [2]. Y-K. M. Peng, D. J. Strickler. Features of spherical torus plasmas. Nuclear fusion. №6 1986.
- [3]. V.K. Gusev, F. Alladio, A.W. Morris, Basics of Spherical Tokamaks and Progress in European Research, Plasma Physics and Controlled Fusion, 2003, 45, issue 12.1, A59 -A82.
- [4]. J. D. Lawson, Proceedings of the Physical Society B, vol 70 (1957), p. 6.
- [5]. S.M. Kaye, M. G. Bell, R. E. Bell et al. Proc. of 27th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. Budapest, 12-16 June 2000 ECA Vol. 24B (2000) 1437-1440.
- [6]. Howell D.F., Hender T.C. and Cunningham G., Nuclear Fusion. 2007. V. 47. P. 1336.