

На правах рукописи

СУДНИКОВ Антон Вячеславович

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ПЛАЗМЫ
В МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКЕ
С ПРОДОЛЬНЫМ ТОКОМ**

01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

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

НОВОСИБИРСК – 2013

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ПОСТУПАЕВ
Владимир Валерьевич – кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

АХМЕТОВ
Тимур Дарвинович – кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск,
старший научный сотрудник.

ШАПИРО
Давид Абрамович – доктор физико-математических наук,
профессор, Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки Институт
автоматики и электротехники СО РАН,
г. Новосибирск, заведующий лабораторией.

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

Защита диссертации состоится « _____ » _____ 2013 г.
в « _____ » часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской
академии наук.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики
имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Концепция открытых систем для удержания плазмы представляет собой один из возможных путей термоизоляции плазмы с термоядерными параметрами, основанный на подавлении поперечных потерь энергии продольным магнитным полем.

На установке ГОЛ-3 в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН изучается удержание плотной плазмы, нагреваемой сильноточным электронным пучком, в многопробочной открытой ловушке. На стадии нагрева пучок возбуждает в плазме мелкомасштабную ленгмюровскую турбулентность, которая, в частности, приводит к появлению аномально низких коэффициентов переноса вдоль магнитного поля. Создаваемая встречными пучковым и плазменным токами структура магнитного поля с широм является, с одной стороны, стабилизирующим фактором для некоторых перестановочных мод, а с другой стороны, она же является источником свободной энергии для развития различных неустойчивостей. Это определяет важность исследования динамики распределения токов с точки зрения её влияния на устойчивость плазменной конфигурации в многопробочной открытой ловушке.

Цель работы состоит в исследовании динамики азимутальных возмущений токов и их влияния на систему «плазма–пучок» как непосредственно во время инжекции электронного пучка, так и после её окончания.

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Автором была создана система диагностики возмущений азимутальной компоненты магнитного поля в установке ГОЛ-3, разработано математическое обеспечение для обработки получаемых экспериментальных данных. На основе анализа полученных данных автором описаны эффекты дифференциального вращения плазмы в скрещенных полях, уменьшения азимутального масштаба магнитных возмущений, импульсных апериодических процессов на стадии остывания плазмы, стабилизации неустойчивости, связанной с существованием в плазме поверхности с $q=1$, а также спектральные характеристики колебаний, связанные с удержанием и стабилизацией плазмы в многопробочной ловушке.

Научная новизна

Впервые в многопробочной ловушке определены пространственные и временные спектры возмущений азимутальной компоненты магнитного поля, обнаружено дифференциальное вращение плазмы, показано существование (в конфигурации с сильным широм магнитного поля и областью $q > 1$ в центре плазмы) насыщенной винтовой неустойчивости с $m = 1$, $n = 1$, обнаружен квазистационарный внос отрицательного потенциала в плазму электронными пучками.

Научная и практическая ценность

Экспериментально подтверждён ряд теоретических положений, описывающих поведение плазмы с продольным током. Обнаружение винтовой неустойчивости с $m = 1$, $n = 1$ согласуется с данными ранее проводившихся экспериментов [1] и подтверждает результаты трёхмерного моделирования тиринг-неустойчивости в открытых ловушках с электронным пучком [2]. Результаты, связанные с дифференциальным вращением плазмы и инъекцией заряда электронным пучком, значимы с точки зрения концепции вихревого удержания [3]. Практически важны также данные об устойчивости системы «плазма–пучок» в различных экспериментальных конфигурациях.

Материалы диссертации в целом могут быть использованы для дальнейшего развития физики удержания горячей плазмы в многопробочных открытых ловушках.

Результаты, значимые для концепции вихревого удержания, могут быть использованы при создании открытых ловушек следующего поколения, применяющих подобные системы подавления конвективных неустойчивостей.

Результаты по стабилизации системы «плазма–пучок» облаком тяжёлого газа могут быть применены в экспериментах по пучковому нагреву в открытых ловушках.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Наблюдение при квазистационарной инъекции электронного пучка вращения плазмы в скрещенных полях, требуемого для реализации схемы вихревого удержания, в направлении, соответствующем отрицательному потенциалу на оси.
2. Существование дифференциального по радиусу вращения плазмы во время инъекции сильноточного РЭП в открытую ловушку.
3. Возникновение насыщенной моды с волновыми числами $m = 1$, $n = 1$ во время инъекции РЭП в плазменных условиях ГОЛ–3, отвечающих существованию критической по Крускалу–Шафранову поверхности с $q = 1$.

4. Передача энергии азимутальных возмущений токовой границы к высоким волновым числам (т.е., уменьшение их пространственного масштаба).
5. Гибель протяжённых токов с малым азимутальным масштабом как причина импульсных аperiодических процессов, возникающих в плазме ГОЛ-3 на стадии остывания.
6. Улучшение устойчивости РЭП в плазме с помощью создания облака тяжёлого газа в области пробок.

Апробация диссертации

Материалы, на которых основана диссертация, докладывались на Международных конференциях по физике плазмы и УТС (2009 – 2013, г. Звенигород), XIV конференции по диагностике высокотемпературной плазмы (2011, г. Звенигород), Международных конференциях по открытым системам для удержания плазмы (2010, г. Новосибирск; 2012, г. Цукуба, Япония), Европейских конференциях по физике плазмы (2010 – 2013), конференциях МАГАТЭ (2010, г. Тэджон; 2012, г. Сан-Диего), опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложена на 132 страницах, включая 64 иллюстрации, и содержит 107 наименований библиографии.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность поставленной научной задачи, определяемая необходимостью перехода от импульсного нагрева и удержания плазмы в открытой ловушке к квазистационарному режиму. На основе имеющихся научных данных по улучшенному удержанию плазмы в открытых ловушках ставятся цель и задачи диссертации.

В первой главе изложено описание технических и физических режимов эксперимента. Установка ГОЛ-3, на которой проводились эксперименты, представляет собой длинную соленоидальную многопробочную открытую ловушку, нагрев плазмы в которой производится при помощи электронного пучка (рис. 1).

Генерация пучка осуществляется одним из двух существующих источников. Генератор У-2 обеспечивает пучок электронов током до 30 кА с энергией до 1 МэВ длительностью ~10 мкс. Генератор длинноимпульсного электронного пучка обеспечивает следующие параметры: энергия электронов ~ 100 кэВ, ток пучка до 300 А, длительность инжекции — 100 мкс – 1 мс. В вакуумной камере диаметром 10 см системой импульсных клапанов

создается исходное распределение рабочего газа (водорода или дейтерия) максимальной плотностью $10^{20} - 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

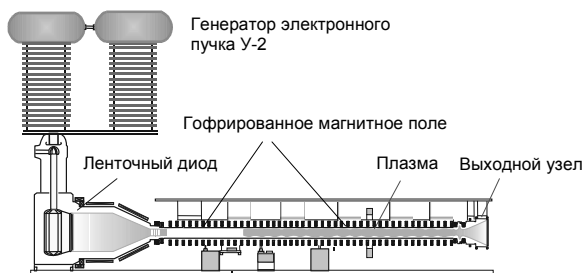


Рис. 1. Схема установки ГОЛ-3.

Регистрация сигналов диагностических и технологических измерений осуществляется многоканальной цифровой системой сбора данных. Основой системы регистрации диагностических сигналов являются 4-канальные 12-разрядные АЦП А-1220 с частотой дискретизации 50 Мвыб./с.

Вторая глава содержит обзор существующих на других установках диагностик магнитных явлений в плазме. В этой главе также приведены параметры магнитных диагностик комплекса ГОЛ-3 и описание использованных в работе алгоритмов обработки экспериментальных данных.

Система магнитных зондов, применённых в работе, в разных конфигурациях включала в себя до 16 каналов измерения азимутальной компоненты магнитного поля в одном сечении установки и до 7 точек измерения по длине установки. В качестве элементов, чувствительных к азимутальной компоненте магнитного поля, использовались компактные электростатически экранированные катушки с индуктивностью $L \sim 0,4 \text{ мкГн}$. Высокие требования по компактности и защищённости от электростатических наводок вызваны малым (1 см) зазором между плазменным шнуром и стенкой вакуумной камеры в ГОЛ-3. Применялись три типа сборок измерительных каналов: компактный одиночный зонд (устанавливается в стандартный круглый диагностический порт установки ГОЛ-3); компактный зонд с двумя катушками, разнесёнными по азимутальной координате на 45° (устанавливается в стандартный овальный диагностический порт установки ГОЛ-3); кольцевая сборка из 16 катушек с шагом $22,5^\circ$ (встраивается непосредственно внутрь вакуумной камеры).

Для диагностики высоких азимутальных мод возмущений требовалось обеспечение однородности токов, протекающих по корпусу установки. Применялся токоведущий лайнер с максимальным масштабом пространственной неоднородности проводимости не более 3 мм, что на порядок меньше характерного расстояния между измерительными каналами.

Все каналы были абсолютно калиброваны на стенде, представляющем собой секцию вакуумной камеры ГОЛ-3 с геометрически подобным плазме источником импульсного тока силой до ~ 2 кА. Точность относительной калибровки составляет $0,1 \div 0,5$ %. Для текущей проверки работоспособности датчика проверяется соответствие суммы сигналов всех каналов и производной полного тока. Чувствительность системы оценивается как

$$\omega \left(\frac{\delta r}{r} - \frac{\delta I}{I} \right) > \frac{c^2 r}{2NSI} U_{\min} = \frac{5 \times 10^6}{I[A]} c^{-1}$$

При восстановлении азимутальных мод возмущения по данным многоканальной измерительной системы применялась процедура, основанная на разложении сигналов по набору ортогональных гармонических функций. Использовалась модель однородного по сечению тока, обеспечивающая в условиях ГОЛ-3 достаточно малую ошибку. Частотные характеристики экспериментальных сигналов определялись с помощью преобразования Фурье в окне Хеннинга. Для продольных возмущений, не локализованных в пределах одного элементарного пробкотрона, находились корреляции отдельных мод в различных сечениях установки.

В третьей главе последовательно рассмотрены спектральные и пространственные характеристики магнитных возмущений в экспериментах по инжекции сильноточного релятивистского электронного пучка ограниченной длительности в плазму, удерживаемую в установке ГОЛ-3; приведён анализ данных.

При инжекции релятивистского электронного пучка в плазму высокой плотности (выше $\sim 3 \times 10^{20}$) наблюдается преимущественное вращение плазмы в скрещенных полях, проявляющееся в набеге фазы магнитных возмущений, в направлении, соответствующем «естественному» положительному потенциалу плазмы. При инжекции пучка в плазму низкой плотности ($\sim 2 \times 10^{20}$ и ниже) начальное направление вращения магнитных возмущений изменяется, оно соответствует отрицательному потенциалу плазменного столба. Через некоторое время после окончания инжекции пучка направление вращения в этом случае меняется на противоположное. Во всех случаях доминирует мода $m = 1$, сравнение с данными оптических диагностик показывает факт наличия дифференциального по радиусу вращения неоднородностей.

Наличие сдвигового вращения характерно для любого неравномерного радиального распределения электрического заряда. Указанный эффект в случае, если магнитные силовые линии имеют компоненту, сонаправленную градиенту угловой скорости, приводит к их удлинению и, соответственно, перекачке механической энергии в магнитную.

В эксперименте был обнаружен переход к более высоким волновым числам азимутальных возмущений. Характерное время уменьшения пространственного масштаба азимутальных возмущений составляет $t \sim 5$ мкс (рис. 2).

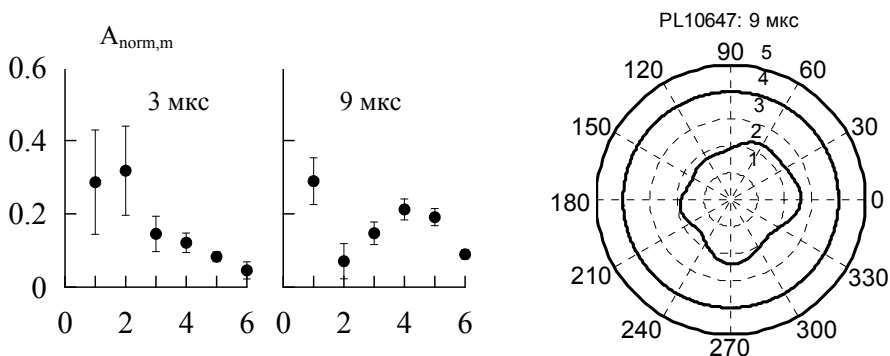


Рис. 2. Слева: нормированные амплитуды первых азимутальных мод в моменты времени 3 и 9 мкс после начала инжекции электронного пучка для выстрела PL10647. Нормировка проводилась на сумму амплитуд первых шести азимутальных мод. Справа: форма сечения условной токовой границы в момент времени 9 мкс. Радиальная координата отложена в сантиметрах, азимутальная – в градусах. Окружностью с радиусом $r = 4$ см показан ограничивающий плазму лимитер.

Обнаружен факт развития изгибающей неустойчивости с $m = 1$, $n = 1$ (рис. 3). В режимах с глобально устойчивой транспортировкой амплитуда возмущения составляла ~ 0.5 см. Возмущение скоррелировано в различных точках по длине установки. Продольные граничные условия определяются вмороженностью магнитных силовых линий в областях, обеспечивающих замыкание тока поперёк магнитного поля (металлический плазмоприёмник либо массивное облако плазмы тяжёлых элементов) и приводят к винтовому смещению исходной аксиально-симметричной структуры тока.

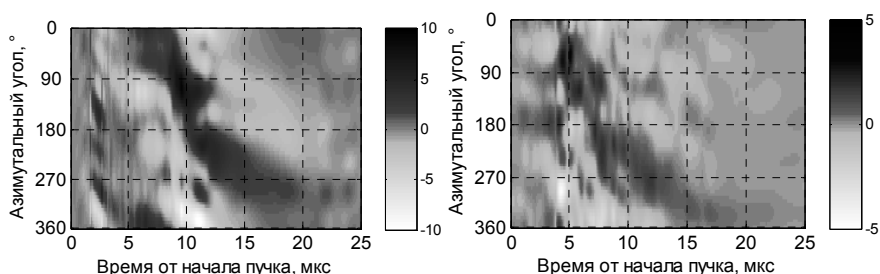


Рис. 3. Динамика крупномасштабных возмущений в выстрелах с одинаковыми газовыми условиями без создания предварительной плазмы (слева) и с инжекцией в предварительную плазму (справа). В последнем случае наблюдается стабилизация моды $m = 1$ на уровне ~ 0.5 см.

Введение аналогичного граничного условия в экспериментах по стабилизации релятивистского электронного пучка с пограничным по устойчивости профилем q непосредственно привело к подавлению возмущений на нецелых гармониках, повышению симметрии отпечатка пучка (рис. 4) и снижению уровня поперечных потерь энергии.

В экспериментах по инъекции РЭП в момент времени $\sim 100 \div 600$ мкс от конца инъекции пучка, при малом токе по плазменному шнуру, возникали обособленные короткоживущие возмущения азимутального магнитного поля, отвечающие импульсному протеканию обособленных встречных токов с малым азимутальным масштабом. Множественность импульсных магнитных событий в течение эксперимента и отсутствие магнитных сигналов как до, так и после импульса магнитной активности, позволяет предположить существование после окончания пучка мелкомасштабного распределения встречных токов, сформированного за счёт перехода азимутальных возмущений в сторону высоких волновых чисел.

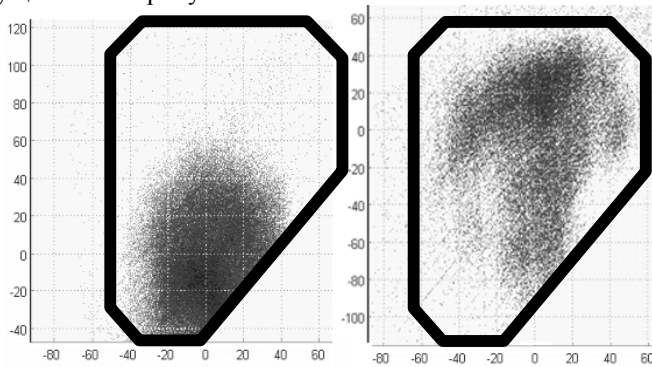


Рис. 4. Отпечатки пучка в режимах с инъекцией криптона (слева, PL9607) и без инъекции криптона (слева, PL9629). Рамкой отмечена видимая область. По осям отложены координаты в миллиметрах.

Четвёртая глава посвящена экспериментам по инъекции квазистационарного электронного пучка с мощностью 2 – 10 МВт.

Наиболее интенсивным магнитным возмущением при инъекции квазистационарного электронного пучка является вращение, интерпретируемое как $E \times V$ дрейф, при этом плазма может совершить до ~ 200 оборотов вокруг оси (рис. 5). Угловая скорость вращения с течением времени при неизменных параметрах пучка изменяется слабо. По скорости вращения определено электрическое поле $E \sim 100$ В/см, что соответствует отрицательному заряду на оси плотностью до 5×10^{-10} Кл/см ($\sim 5 \div 10\%$ заряда пучка).

Важным экспериментальным фактом является также то, что существует инверсия вращения при превышении порогового тока пучка. Тем самым,

сравнительно маломощный электронный пучок может быть использован для контролируемого вноса потенциала в плазму. В то же время, экспериментально не обнаружено значительной инерционности в задании скорости и направления вращения плазмы (рис. 6).

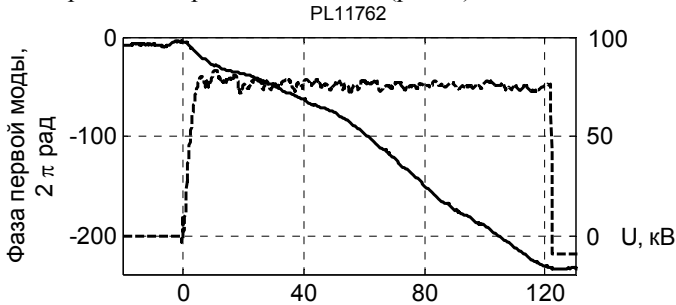


Рис. 5. Динамика фазы первой азимутальной моды возмущений (сплошная линия), для сравнения приведён сигнал напряжения на ускоряющем промежутке (пунктирная линия).

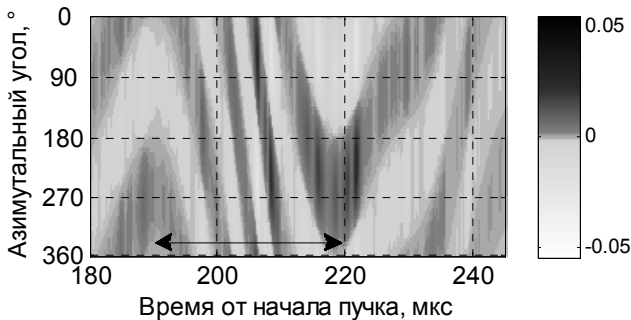


Рис. 6. Магнитные возмущения в эксперименте с модулированным пучком. Стрелкой указан промежуток времени с током выше порогового.

По корреляции сигналов в различных сечениях установки определена скорость распространения продольных возмущений $v \sim 10^7$ см/с, соответствующая ионно-звуковой скорости для $T_e \sim 100$ эВ.

При анализе спектрального состава сигналов заметной активности в области ионно-циклотронной частоты не обнаружено.

В заключении изложены основные результаты, полученные в диссертации:

1. Создана система диагностики азимутальной компоненты магнитного поля плазмы.

2. Разработан специализированный программный комплекс, позволяющий определять частотный и пространственные спектры азимутальных магнитных возмущений.
3. Продемонстрировано, что при инъекции электронного пучка в плазму, в том числе и предварительно наработанную, можно создать условия, при которых существует вращение плазмы в скрещенных полях в направлении, соответствующем отрицательный потенциалу на оси, требуемому для реализации схемы вихревого удержания. При этом в случае инъекции длинноимпульсного электронного пучка плазма совершает $\sim 10^2$ оборотов. Показано существование дифференциального по радиусу вращения плазмы во время инъекции сильнооточного РЭП.
4. Показано, что во время инъекции РЭП в ГОЛ-3 в плазменных условиях, отвечающих существованию критической по Крускалу-Шафранову поверхности с $q = 1$, возникает насыщенная мода с волновыми числами $m = 1$, $n = 1$; определена амплитуда насыщения данной неустойчивости $a \approx 0.5$ см при её стабилизации широм магнитного поля.
5. Показано, что при инъекции РЭП в плазму происходит передача энергии к магнитным возмущениям с высокими номерами азимутальных мод числам (т.е., уменьшение их пространственного масштаба).
6. Выяснена природа импульсных апериодических процессов, возникающих в плазме ГОЛ-3 на стадии остывания. Показано, что такие события вызываются гибелью протяжённых токов с малым азимутальным масштабом, длительное время существующих в плазме ГОЛ-3.
7. Идентифицирована причина потери устойчивости тонкого РЭП в плазме, продемонстрировано улучшение устойчивости при напуске тяжёлого газа.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Поступаев В. В., Судников А. В., Магнитная диагностика плазменных колебаний в многопробочной ловушке ГОЛ-3. // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2007. Том 2, выпуск 3.
2. A.V. Sudnikov, A.V. Burdakov, I.A. Ivanov, M.A. Makarov, K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, S.L. Sinitsky. MHD Activity in GOL-3 at the Stage of Plasma Cooling. // Fusion Science and Technology, V.59, No 1T, 2011, p.187-189.
3. V.V. Postupaev, A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, V.I. Batkin, A.V. Burdakov, V.S. Burmasov, I.A. Ivanov, M.V. Ivantsivsky, K.N. Kuklin, S.A. Kuznetsov, M.A. Makarov, K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, S.S. Popov, A.F. Rovenskikh, A.A. Shoshin, S.L. Sinitsky, V.F. Sklyarov, N.V. Sorokina, A.V. Sudnikov, Yu.S. Sulyaev, L.N. Vyacheslavov. Experiments with "Thin"

Electron Beam at GOL-3. // Fusion Science and Technology, V.59, No 1T, 2011, p.144-149.

4. I.A. Ivanov, A.V. Burdakov, V.G. Ivanenko, M.A. Makarov, K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, A.V. Sudnikov, S.L. Sinitsky, A.A. Shoshin, I.M. Shchudlo. Stabilization of Relativistic Electron Beam by Dense Plasma Cloud in GOL-3 Expander. // Fusion Science and Technology, V.59, No 1T, 2011, p.196-198.
5. V.V. Postupaev, A.V. Arzhannikov, V.I. Batkin, A.V. Burdakov, V.S. Burmasov, I.A. Ivanov, M.V. Ivantsivsky, K.N. Kuklin, S.A. Kuznetsov, M.A. Makarov, K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, S.S. Popov, A.F. Rovenskikh, S.L. Sinitsky, V.F. Sklyarov, N.V. Sorokina, A.V. Sudnikov, Yu.S. Sulyaev, and L.N. Vyacheslavov. Experiments with Gradual-Energy-Growth Electron Beam at GOL-3. // Fusion Science and Technology, V.59, No 1T, 2011, p.307-309.
6. А.В. Судников, А.В. Бурдаков, И.А. Иванов, М.А. Макаров, К.И. Меклер, А.Ф. Ровенских, С.В. Полосаткин, В.В. Поступаев, С.Л. Синицкий, Н.В. Сорокина, Ю.С. Суляев. Исследование вращения плазмы в установке ГОЛ-3. // Физика плазмы, 2012, т. 38, №. 9, с. 779–791.
7. A.V. Burdakov, A. P. Avrorov, A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, V.I. Batkin, A.D. Beklemishev, V.S. Burmasov, P.V. Bykov, G.E. Derevyankin, V.G. Ivanenko, I.A. Ivanov, M.V. Ivantsivsky, I.V. Kandaurov, A.A. Kasatov, S.A. Kuznetsov, V.V. Kurkuchekov, K.N. Kuklin, K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, S.S. Popov, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, S.L. Sinitsky, V.D. Stepanov, A.V. Sudnikov, Yu.S. Sulyaev, I.V. Timofeev, Yu. A. Trunev, V.F. Sklyarov, N.V. Sorokina, A.A. Shoshin, and L.N. Vyacheslavov. Development of Extended Heating Pulse Operation Mode at GOL-3. // Fusion Science and Technology, Vol.63, No.1T, 2013, pp.29-34.
8. A.V. Sudnikov, A.V. Burdakov, D.E. Gavrilenko, I.V. Kandaurov, V.V. Kurkuchekov, K.I. Mekler, A.F. Rovenskikh, S.V. Polosatkin, V.V. Postupaev, and Yu.A. Trunev. MHD Activity in GOL-3 During Injection of Long-Pulse Electron Beam. // Fusion Science and Technology, Vol.63, No.1T, 2013, pp.250-252.
9. V.V. Postupaev, A.V. Burdakov, I.A. Ivanov, V.F. Sklyarov, A.V. Arzhannikov, D.Ye. Gavrilenko, I.V. Kandaurov, A.A. Kasatov, V.V. Kurkuchekov, K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, S.S. Popov, A.F. Rovenskikh, A.V. Sudnikov, Yu.S. Sulyaev, Yu.A. Trunev, and L.N. Vyacheslavov. Temporal structure of double plasma frequency emission of thin beam-heated plasma // Phys. Plasmas 20, 092304, 2013, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4821608>

Список литературы

- [1] Postupaev V.V., Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., et al. Role of q-profile for plasma confinement in the multimirror trap GOL-3. // Transactions of Fusion Science and Technology. 2005. Vol.47, No.1T. P.84-91.
- [2] А.В. Бурдаков, В.П. Жуков. Трехмерная модель тиринг неустойчивости в открытых ловушках с электронным пучком. // Вычислительные технологии, 2007, т. 12. № 2
- [3] A. Beklemishev, et al. Vortex Confinement of Plasmas in Symmetric Mirror Traps. // Fusion Science and Technology. 2010. Vol. 57, p. 351–360.

СУДНИКОВ Антон Вячеславович

**Пространственная структура плазмы
в многопробочной ловушке с продольным током**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 24.10.2013 г.

Подписано в печать 25.10.2013 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 0.8 усл. печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 26

Обработано на РС и отпечатано

на ротапинтере ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11