

На правах рукописи

СУЛЯЕВ Юлий Сергеевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА И УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ
В МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКЕ ГОЛ-3
ПО НЕЙТРОННОЙ ЭМИССИИ**

01.04.08 – физика плазмы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

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

НОВОСИБИРСК – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

БУРДАКОВ Александр Владимирович – доктор физико-математических наук,
Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН,
г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ДАВЫДЕНКО Владимир Иванович – доктор физико-математических наук,
Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
СО РАН, г. Новосибирск.

АРХИПОВ Николай Иванович – кандидат физико-математических наук,
ГНЦ РФ «Троицкий Институт
инновационных и термоядерных
исследований», г. Троицк.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Учреждение Российской академии наук
Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится « 4 » июня 2010 г.
в «17:30» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03
Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения
Российской академии наук Института ядерной физики имени Г.И. Будкера
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан « 29 » апреля 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Исследование нагрева и удержания горячей плазмы в линейных ловушках ведется во многих лабораториях во всем мире. В данной работе речь пойдет об одной из таких открытых систем – длинной осесимметричной многопробочной ловушке с гофрированным магнитным полем ГОЛ-3, (ИЯФ СО РАН) [1]. Особенностью многопробочной ловушки является более высокая плотность плазмы, чем в других схемах с магнитным удержанием, а улучшение продольного удержания плазмы по сравнению с классическим пробкотроном достигается за счет эффективной силы трения, возникающей при течении плотной плазмы в гофрированном магнитном поле. Установка состоит из многопробочной ловушки с плотной дейтериевой плазмой и генератора сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП) У-2 [2], используемого для нагрева плазмы. При инжекции пучка в плазму в результате коллективного пучково-плазменного взаимодействия происходит возбуждение ленгмюровской турбулентности [3]. В результате энергия релятивистского электронного пучка передается через ленгмюровские колебания, главным образом, к электронной компоненте плазмы.

Одним из важных открытий последних лет в физике открытых ловушек стало обнаружение подавления продольной электронной теплопроводности на торцы в процессе инжекции РЭП, который возбуждает высокий уровень турбулентности и многократно увеличивает скорость рассеяния электронов [4, 5]. Это позволяет достичь электронной температуры 2 – 3 кэВ к моменту окончания инжекции пучка [6]. Второе достижение состоит в том, что при переходе к многопробочной конфигурации было экспериментально обнаружено существенное увеличение энергетического времени жизни плазмы, а также рост темпа нагрева ионов на несколько порядков. Такой быстрый нагрев не может быть объяснен в рамках классической теории парных кулоновских столкновений частиц плазмы. Была предложена модель быстрого нагрева ионов, в которой учтено увеличение эффективности пучково-плазменного взаимодействия с ростом отношения концентрации электронов пучка к концентрации плазмы n_b/n_p . При этом, вследствие подавления электронной теплопроводности при прохождении пучка, в плазме возникают сильные градиенты электронной температуры [7], приводящие к ускорению ионных потоков, движущихся навстречу друг другу в каждой ячейке многопробочной ловушки. Далее эти потоки должны перемешаться из-за парных ион-ионных столкновений и/или из-за развития турбулентности, таким образом кинетическая энергия направленного движения ионов переходит в тепловую.

Обнаруженный эффект быстрого нагрева ионов выявил необходимость создания специализированных диагностик для ионной компоненты плазмы, ранее отсутствовавших на установке ГОЛ-3. Физическая задача этих диагностик состоит в том, чтобы экспериментально подтвердить положения

модели быстрого нагрева ионов в многопробочной ловушке, а также наблюдать за динамикой температуры ионной компоненты плазмы.

В горячей дейтериевой плазме, удерживаемой гофрированным магнитным полем, достаточно интенсивно идут реакции синтеза. Регистрация продуктов термоядерных реакций может давать информацию о наиболее горячей части плазмы, получение которой может быть затруднено для оптических и корпускулярных диагностик из-за высокой плотности плазмы. Основной задачей создаваемого комплекса нейтронных детекторов является изучение механизма быстрого нагрева ионов в многопробочной ловушке на стадии нагрева электронным пучком.

Перспективы многопробочного термоядерного реактора, рассмотренные в [8], на сегодняшний момент с учетом экспериментально обнаруженных новых явлений должны быть пересмотрены в сторону большего оптимизма. С другой стороны, открытые эффекты требуют более тщательного изучения с точки зрения оптимизации параметров установки для эффективного нагрева и длительного удержания плазмы.

Цель диссертации

Целью диссертации является исследование процессов быстрого нагрева и длительного удержания ионной компоненты горячей дейтериевой плазмы в длинной многопробочной ловушке ГОЛ-3 с помощью изучения параметров нейтронной эмиссии. Для этого на установке был создан и эксплуатируется комплекс нейтронных диагностик, включающий в себя сцинтилляционные детекторы на основе кристалла стибена, оборудованные системой цифровой дискриминации гамма-квантов по форме импульса, активационный серебряный детектор, миниатюрные пузырьковые камеры, набор помехозащищенных сцинтилляционных локальных детекторов. Благодаря высокой чувствительности нейтронного выхода к изменениям ионной температуры появляется возможность исследования и оптимизации эффективности нагрева и времени удержания от параметров плазмы в установке ГОЛ-3.

Научная новизна

Впервые в классе открытых ловушек обнаружен эффект быстрого нагрева ионов в течение инжекции РЭП, с помощью нейтронных диагностик найдены экспериментальные подтверждения передачи энергии от электронов к ионам с помощью коллективного механизма ускорения.

Обнаружен эффект длительного удержания плазмы с горячими ионами при меньшей, чем предсказывалось теорией, её плотности. Высокая ионная температура (1-2 кэВ) в течение 0,5 – 1 мс подтверждена несколькими независимыми диагностиками.

Разработан метод цифровой дискриминации гамма-квантов по форме импульса для сцинтилляционного спектрометра нейтронов на основе

кристалла стибьбена, проведено исследование параметров нейтронного излучения, доказана его термоядерная природа.

Впервые наблюдалась баунс-неустойчивость пролетных частиц, возбуждаемая потоком горячей плазмы, текущим вдоль многопробочной ловушки от области максимального энерговыделения. Неустойчивость проявляет себя в виде периодических всплесков нейтронной эмиссии, локализованных в отдельных ячейках многопробочной ловушки. Результаты экспериментов с сильной гофрировкой магнитного поля соответствуют теоретическим представлениям о баунс-неустойчивости горячих пролетных ионов.

Вклад автора

Представленные в диссертации экспериментальные результаты, касающиеся измерений с помощью комплекса нейтронных диагностик, получены непосредственно автором. Им были сделаны теоретические оценки нейтронного потока, разработан и создан комплекс нейтронных детекторов на установке ГОЛ-3, ведется его текущая эксплуатация.

Научная и практическая значимость диссертационной работы

Обнаружен эффект быстрого нагрева ионов плазмы в процессе инжекции мощного релятивистского электронного пучка в многопробочную ловушку. Найдены экспериментальные факты, свидетельствующие в пользу коллективного механизма ускорения ионов амбиполярным потенциалом, возникающем из-за неравномерного нагрева электронов пучком в центре и на краях отдельной ячейки многопробочной ловушки.

Создан сцинтилляционный нейтронный детектор с цифровой дискриминацией по форме импульса на основе кристалла стибьбена, преимуществом которого является высокая скорость счета импульсов. Использование этого метода позволило исследовать эволюцию нейтронной эмиссии во времени, измерить энергетический спектр протонов отдачи в сцинтилляторе и доказать термоядерное происхождение нейтронной эмиссии.

Разработан комплекс локальных нейтронных детекторов для измерения параметров нейтронной эмиссии во время инжекции электронного пучка. Наблюдаемые особенности нейтронной эмиссии существенно улучшили понимание физических процессов, происходящих в многопробочной ловушке. Также была обнаружена баунс-неустойчивость горячих пролетных ионов при макроскопическом течении плазмы вдоль ловушки. Неустойчивость приводит к дополнительному рассеянию пролетных ионов, термализации их энергии направленного движения, и препятствует быстрому вытеканию плазмы вдоль ловушки. Предполагается, что в будущих термоядерных реакторах на основе многопробочной ловушки она будет играть значительную роль в продольном удержании плазмы.

Положения, выносимые на защиту

- Обнаружен факт быстрого нагрева ионов плазмы в течение инъекции РЭП, найдены экспериментальные подтверждения передачи энергии от электронов к ионам с помощью коллективного механизма ускорения.
- Проведено исследование параметров нейтронного излучения, доказана его термоядерная природа, зарегистрирован поток термоядерных нейтронов из многопробочной ловушки в течение ~ 1 мс, определена температура дейтериевой плазмы $\sim 1 - 2$ кэВ.
- На установке ГОЛ-3 создан комплекс детекторов нейтронного излучения для диагностики параметров ионной компоненты плазмы, включающий в себя сцинтилляционный детектор на основе кристалла стибьбена, активационный серебряный детектор, миниатюрные пузырьковые камеры, набор помехозащищенных сцинтилляционных локальных детекторов.
- Разработан метод цифровой дискриминации гамма-квантов по форме импульса, и применен для однокристалльного сцинтилляционного спектрометра нейтронов на основе кристалла стибьбена.
- С помощью набора локальных нейтронных детекторов был изучен процесс нагрева ионной компоненты плазмы в отдельных ячейках многопробочной ловушки в процессе инъекции РЭП, обнаружена сильная неравномерность энерговыделения пучка вдоль установки.
- Обнаружены периодические осцилляции нейтронного потока, которые могут возбуждаться в отдельных ячейках многопробочной ловушки. Показано, что эти колебания обусловлены сильными градиентами температуры и давления плазмы вдоль гофрированной ловушки, при этом возбуждается неустойчивость баунс-колебаний независимо в отдельных ячейках гофрированного поля.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы неоднократно докладывались на семинарах и конкурсах молодых ученых в ИЯФ СО РАН, Всероссийских и международных конференциях по физике плазмы и УТС: Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС 2004-2006, Диагностика высокотемпературной плазмы 2003-2005, Open Magnetic Systems for Plasma Confinement 2004-2006, EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics 2003-2006, были опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах, список которых приведен в перечне опубликованных автором работ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Текст диссертации содержит 112 страниц, 46 рисунков и 3 таблицы. Список литературы состоит из 73 работ.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении приведен краткий обзор прогресса в физике многопробочного удержания и технологиях нагрева плазмы с помощью РЭП.

В первой главе рассматривается принцип работы и сценарий эксперимента на установке ГОЛ-3, изображенной на рис. 1.

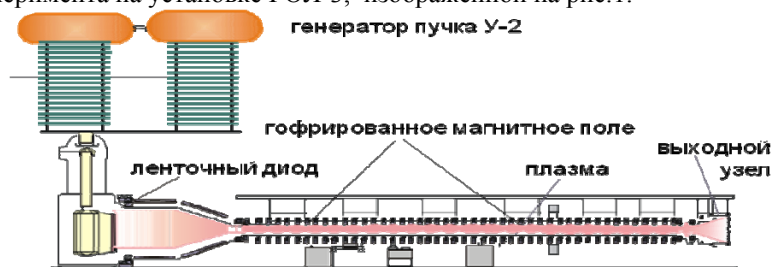


Рис. 1. Общая схема установки ГОЛ-3.

Быстрый нагрев плазмы осуществляется релятивистским пучком электронов с энергией до 1 МэВ, током до 30 кА, длительностью до 8 мкс и энергосодержанием 120 – 150 кДж [1]. Столб дейтериевой плазмы с плотностью от $4 \cdot 10^{14}$ – $5 \cdot 10^{15}$ см⁻³, длиной 12 м и диаметром 6 см формируется в гофрированном магнитном поле, состоящем из 55 ячеек длиной 22 см каждая с пробочным отношением $B_{\max}/B_{\min} = 5.2/3.2$ Т. В настоящее время плазма с плотностью $\sim 10^{15}$ см⁻³ и ионной температурой 1 – 2 кэВ удерживается в ловушке более 1 мс.

С помощью различных диагностик для ионной компоненты плазмы было подтверждено, что ионная температура возрастает до величины 1 – 2 кэВ сразу после окончания инжекции пучка и удерживается в течение 0,5 мс. Экспериментальное исследование такой плазмы с субтермоядерными параметрами представляет особый интерес с точки зрения эмиссии нейтронов, как продуктов D – D-реакций. Цель настоящей диссертации состоит в том, чтобы экспериментально исследовать характеристики нейтронного потока из плазмы установки ГОЛ-3, найти явления, приводящие к аномально быстрому росту ионной температуры.

Далее обсуждается постановка задачи и методы исследований. Основной задачей является выяснение физической природы эффекта быстрого нагрева ионов. Необходимая информация о динамике ионной компоненты в процессе нагрева может быть получена с помощью исследований параметров нейтронной эмиссии с высоким временным разрешением. Приводится описание предварительной работы, необходимой для создания комплекса нейтронных детекторов на установке ГОЛ-3: теоретическая оценка параметров нейтронной эмиссии, обоснование выбора типа детекторов применительно к экспериментальным условиям. В результате на установке ГОЛ-3 был создан комплекс нейтронных

детекторов, включающий в себя:

- 1) сцинтиляционный детектор на основе кристалла стильбена, оборудованный системой цифровой дискриминации гамма-квантов по форме импульса, позволяющий регистрировать динамику нейтронной эмиссии по форме импульса;
- 2) активационный серебряный детектор и миниатюрные пузырьковые камеры для подсчета полного количества нейтронов за выстрел;
- 3) набор локальных помехозащищенных сцинтиляционных детекторов нейтронов для исследования динамики нейтронной эмиссии в отдельных ячейках многопробочной ловушки с хорошим пространственным и временным разрешением.

В процессе выстрела генерация нейтронов сопровождается интенсивным потоком гамма-излучения, рождающегося в процессе торможения электронов пучка в диафрагмах и плазмоприемнике, а также при поглощении нейтронов в конструктивных элементах установки. Для надежного выделения нейтронной компоненты сигнала сцинтиляционный детектор на основе кристалла стильбена был оборудован цифровой системой дискриминации гамма-квантов по форме импульса. Преимущество цифрового метода дискриминации перед аналоговыми заключается в высоком быстродействии за счет отсутствия мертвого времени, а также в возможности обработки наложенных импульсов. С помощью детектора, оборудованного системой цифровой дискриминации гамма-квантов впервые в открытой ловушке была зарегистрирована длительная нейтронная эмиссия в отсутствие прямого нагрева ионов (рис.2).

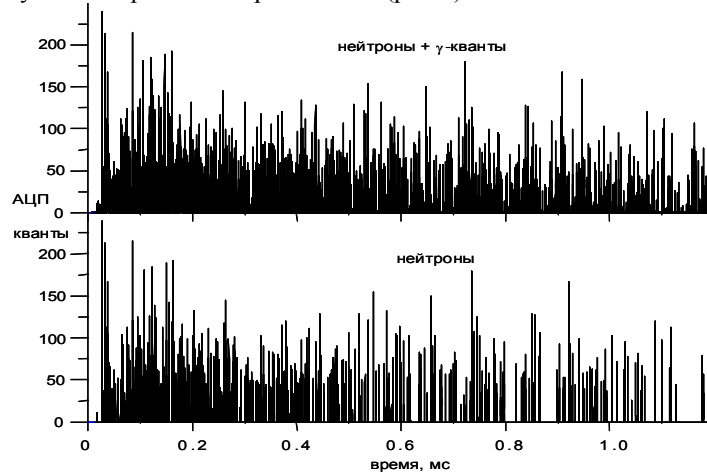


Рис. 2. Сцинтиляционные импульсы детектора NEUTRON_1. Вверху: необработанный сигнал, содержит нейтроны и гамма-кванты. Внизу: сигнал, обработанный системой цифровой дискриминации по форме импульса, содержит только нейтроны.

Для доказательства термоядерной природы нейтронного излучения проводилось исследование энергетического спектра протонов отдачи в кристалле стильбена. Амплитудный спектр импульсов от протонов отдачи, зарегистрированных в эксперименте, имеет ступенчатый вид, а максимальная энергия составляет 2,5 МэВ. Оценка ионной температуры с помощью комплекса нейтронных диагностик, на достаточных для максвеллизации ионной компоненты плазмы временах, находится в согласии с измерениями диамагнетизма плазмы, доплеровского уширения линии D_{α} и спектром нейтралов перезарядки, покидающих плазму.

Во второй главе приводится описание и результаты экспериментов с участками пониженного магнитного поля, целью которых является демонстрация подавления продольной электронной теплопроводности и экспериментальное подтверждение основных положений модели быстрого нагрева ионов. Основная идея эксперимента состоит в том, что в области пониженного магнитного поля плотность электронов релятивистского пучка падает и, тем самым, ухудшается отношение n_b/n_p до такой степени, что прямой нагрев плазмы пучком в этой области не происходит. Диамагнитные измерения показывают, что на стадии нагрева в области магнитной ямы давление плазмы в несколько раз меньше, чем в прилегающих областях однородной плазмы. Затем, после прекращения инъекции пучка и восстановления классической электронной теплопроводности, давление плазмы в области магнитной ямы быстро растёт за счёт выравнивания температур. Таким образом, продемонстрировано существование сильных (до 2,5 кэВ/м) продольных градиентов температуры на стадии нагрева.

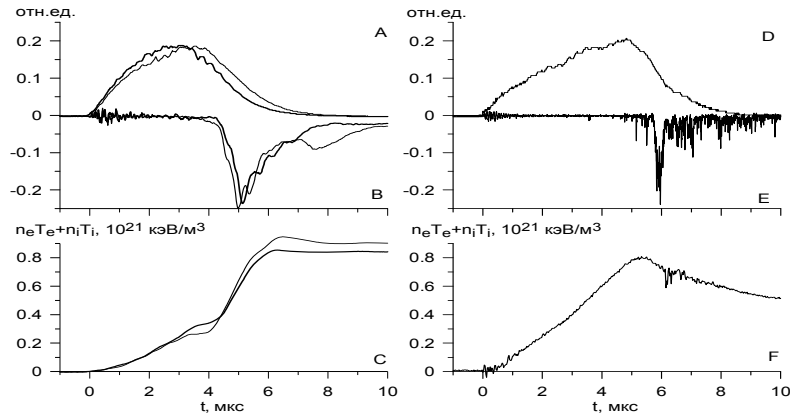


Рис. 3. Задержка появления нейтронного сигнала в системе с неоднородным магнитным полем. Слева – измерения с центральной магнитной ямой (приведены два последовательных импульса), справа – измерения в регулярной многопробочной системе. Буквами обозначены: А и D – мощность тормозного излучения пучка, В и Е – сигналы нейтронных детекторов, С и F – сигналы диамагнитных датчиков в центре ямы.

Формирование высоких градиентов температуры на краях магнитной ямы должно приводить к ускорению встречных потоков плазмы от её краев к центру, где происходит перемешивание и термализация направленной энергии ионов. Сцинтилляционные детекторы нейтронов с хорошим временным разрешением были установлены вблизи магнитной ямы и зафиксировали интенсивный всплеск нейтронной эмиссии в тот момент, когда встречные потоки плазмы сталкивались в её центре (рис.3).

Полученные результаты качественно соответствуют теоретическим предсказаниям модели быстрого нагрева ионов. Похожие явления показывают другие диагностики, например измерения плотности плазмы с помощью томсоновского рассеяния в режиме с одинаковыми начальными параметрами плазмы фиксируют значительные (до 40%) флуктуации плотности от выстрела к выстрелу в момент времени, совпадающий с началом нейтронных вспышек.

В третьей главе проводится детальное исследование динамики ионной компоненты плазмы в процессе инжекции электронного пучка, а также эффектов, связанных с неоднородностью энерговыделения пучка вдоль соленоида. Для визуализации этих эффектов была разработана отдельная помехозащищенная нейтронная диагностика, обеспечивающая хорошее временное и достаточное пространственное разрешение – локальные детекторы. Каждый локальный детектор представлял собой небольшой пластмассовый сцинтиллятор, соединенный с помощью световода с фотоумножителем, расположенным за пределами биологической защиты в удаленной пультовой. Благодаря своим малым размерам локальные детекторы могут быть размещены вплотную к стенке вакуумной камеры между катушками соленоида, которые работают как коллиматор для жестких излучений. В непосредственной близости от плазмы поток жесткого излучения достаточно велик, и детекторы работают в токовом режиме. Таким образом, локальные детекторы регистрируют излучение только в пределах одной ячейки многопробочной ловушки.

Изучение зависимости нейтронного выхода вдоль соленоида показало, что существует область с максимальной нейтронной эмиссией, и она имеет малую протяженность. Эти измерения коррелируют с распределением диамагнетизма плазмы вдоль соленоида на стадии $T_e < T_i$. Обнаруженные с помощью локальных детекторов физические явления вызваны неоднородным нагревом, который приводит к макроскопическому движению плазмы вдоль соленоида. Структура флуктуаций нейтронного сигнала, изображенная на рис.4, указывает на два разных процесса, обусловленных неравномерным нагревом плазмы. Нейтронная эмиссия на всех локальных детекторах начинается в определенное время, которое совпадает с временем встречи двух расширяющихся сгустков плазмы в центре отдельной ячейки многопробочной ловушки. Нерегулярные вспышки нейтронного потока

указывают на хаотическое перемешивание столкнувшихся сгустков плазмы и термализацию энергии направленного движения частиц плазмы. Наблюдаемые после нерегулярных флуктуаций периодические колебания нейтронной эмиссии, локализованные в пределах одной ячейки многопробочной ловушки, вызваны глобальным градиентом температуры вдоль соленоида, стремящимся выровнять давление плазмы по всей установке. Такой поток является сгустком «пролетных» частиц для каждого отдельного пробкотрона многопробочной ловушки. Часть этого потока может стать запертыми частицами в результате их рассеяния из конуса потерь на ионах плазмы. Запертый в пробкотроне сгусток плазмы совершает колебания в пределах одной ячейки со скоростями порядка тепловой. Поток «пролетных» частиц распространяется из области максимума нагрева плазмы вдоль всей ловушки, и в каждой отдельной ячейке гофрированного соленоида одновременно может возбуждать вышеописанные колебания. Как только поток горячей плазмы прекращается, колебания немедленно затухают.

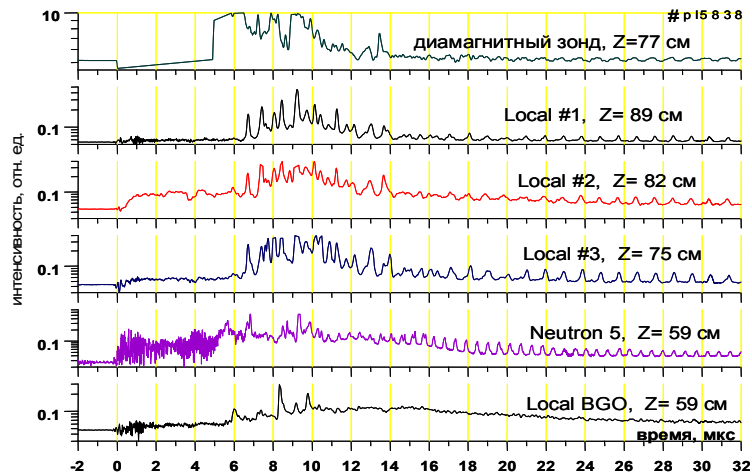


Рис. 4. Форма сигналов локальных детекторов в различных ячейках многопробочной ловушки.

Параметры плазмы, влияющие на частоту модуляции нейтронной эмиссии, и условия, необходимые для поддержания колебаний могут сильно отличаться в соседних ячейках. Например, период модуляции в более «горячей» ячейке (сигнал Neutron_5) существенно меньше, чем в соседней (сигнал Local_#3). Модуляция в некоторых ячейках может наблюдаться достаточно продолжительное время (до 100 мкс), в то время как в других ячейках она уже прекратилась.

Для объяснения наблюдаемых эффектов была развита теория [14], объясняющая механизм периодической модуляции нейтронной эмиссии с

помощью колебаний электростатического потенциала, возбуждаемого пролетными частицами в каждой отдельной ячейке многопробочной ловушки. Баунс-неустойчивость, развивающаяся в процессе взаимодействия данного потенциала с пролетными и запертыми частицами, препятствует движению плазмы как целого вдоль гофрированной ловушки, способствует более эффективному обмену энергиями между ионами, набравшими значительную продольную скорость в процессе коллективного ускорения, с остальными частицами плазмы. Видно, что данная баунс-неустойчивость и связанные с ней процессы имеют очень важное значение как для повышения параметров существующей гофрированной ловушки ГОЛ-3, так и для будущих термоядерных реакторов на ее основе.

Локальные детекторы также позволяют наблюдать за эволюцией плазмы на больших временах. На рис. 5 приведена осциллограмма с локального детектора, установленного на расстоянии 1 м от входной пробки. По характеру нейтронной эмиссии можно судить о процессах, вызывающих изменения ионной температуры плазмы. Условно можно разделить эволюцию плазмы на 3 стадии: На стадии флуктуаций часть ионной компоненты плазмы набирает энергию, в основном продольную, за счет эффекта быстрого нагрева ионов в многопробочной ловушке. За ней идет стадия установления: происходит интенсивный обмен энергией между горячими и холодными ионами, температура разравнивается по длине установки, ионная температура подрастает за счет термализации продольной энергии быстрых ионов. Третья стадия это удержание остывающей плазмы в многопробочной ловушке.

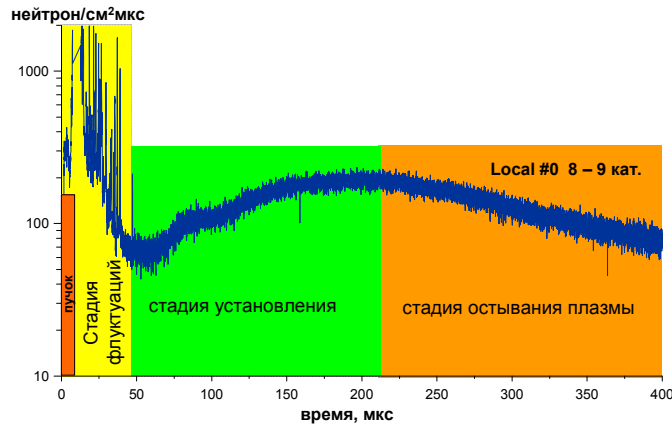


Рис. 5. Стадии эволюции нейтронной эмиссии.

Для того, чтобы с помощью комплекса локальных детекторов можно было делать оценки локальной ионной температуры по интенсивности нейтронного излучения, с помощью импульсного источника нейтронов ИНГ-101Т была проведена абсолютная калибровка локальных детекторов в

условиях реальной геометрии установки ГОЛ-3. Источник находился внутри вакуумной камеры на оси соленоида. Локальные детекторы располагались в тех же местах, в которых они находятся в реальном эксперименте. В результате проведенных измерений было определено соотношение между количеством нейтронов, проходящих через телесный угол детектора, и амплитудой сигнала для каждого детектора с учетом влияния конструкционных материалов соленоида установки. Оценка ионной температуры на временах, больших времени затухания колебаний нейтронной эмиссии, согласуется с остальными диагностиками.

Теория многопробочного удержания утверждает, что пробочное отношение является наиболее важным параметром, влияющим на физические процессы, происходящие как при быстром коллективном нагреве ионов, так и при возбуждении баунс-неустойчивости пролетных ионов в отдельной ячейке многопробочной ловушки. Для проверки указанных положений теории были проведены эксперименты с пробочным отношением, отличным от стандартного.

Изменение периода нейтронной модуляции происходит в соответствии с предположением о том, что запертые в ячейке горячие ионы совершают баунс-осцилляции, и каждая нейтронная вспышка вызвана быстрым увеличением концентрации ионов в области их останова.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты

На установке ГОЛ-3 в режиме с многопробочным удержанием плазмы обнаружен и объяснен эффект быстрого коллективного нагрева ионов плазмы. Суть эффекта состоит в том, что ионная компонента плазмы во время инжекции мощного электронного пучка в гофрированное магнитное поле нагревается значительно быстрее, чем это возможно при классической (кулоновской) передаче энергии от электронов к ионам.

1. Обнаружен факт быстрого нагрева ионов плазмы в течение инжекции РЭП, найдены экспериментальные подтверждения передачи энергии от электронов к ионам с помощью коллективного механизма ускорения.

2. Проведено исследование параметров нейтронного излучения, доказана его термоядерная природа, зарегистрирован поток термоядерных нейтронов из многопробочной ловушки в течение ~ 1 мс, определена температура дейтериевой плазмы $\sim 1 - 2$ кэВ.

4. Разработана новый, ранее нигде не применявшийся метод цифровой дискриминации гамма-квантов по форме импульса, и применен для однокристалльного сцинтилляционного спектрометра нейтронов на основе кристалла стибьена.

5. С помощью набора локальных нейтронных детекторов был изучен

процесс нагрева ионной компоненты плазмы в отдельных ячейках многопробочной ловушки в процессе инжекции РЭП, обнаружена сильная неравномерность энерговыделения пучка вдоль установки.

6. Обнаружены периодические осцилляции нейтронного потока, которые могут возбуждаться в отдельных ячейках многопробочной ловушки. Показано, что эти колебания обусловлены сильными градиентами температуры и давления плазмы вдоль гофрированной ловушки, при этом возбуждается неустойчивость баунс-колебаний независимо в отдельных ячейках гофрированного поля.

Основные результаты **опубликованы** в следующих работах:

1. *V.S. Koidan и группа ГОЛ-3.* Нагрев и удержание плотной плазмы в многопробочной ловушке ГОЛ-3. // Тез. докл. XXIX Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2002, стр.7.
2. *A.V. Burdakov, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, Yu.S. Sulyaev.* Диагностика нейтронного и гамма-излучения на многопробочной ловушке ГОЛ-3. // X Всероссийская конференция "Диагностика высокотемпературной плазмы", Тез. докл., Троицк, 2003 г., с. 42.
3. *A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, A.V. Burdakov, Yu.S. Sulyaev, et. al.* Heating of Ions at the Multiple Mirror Trap GOL-3. // 30th European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, St.Petersburg, Russia, July 2003; Contributed Papers, Published by EPS, Vol.27A, 2003, P-2.193.
4. *Alan England, Aleksandr Burdakov, ChangShuk Kim, Vasili Koidan, Myeun Kwon, Vladimir Postupaev, Andrei Rovenskikh, Yuli Sulyaev.* Detection of DD Neutrons on the Multi-mirror trap GOL-3.// 45th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics. October 27-31, 2003 Albuquerque, New Mexico Meeting ID: DPP03
5. *A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, A.V. Burdakov, Yu.S. Sulyaev, et.al.* Multimirror Open Trap GOL-3: recent results // Transactions of Fusion Technology Vol.43, No 1T, 2003, p.30-36.
6. *V.S. Koidan, A.V. Arzhannikov, A.V. Burdakov, Yu.S. Sulyaev, et.al.* Progress in multimirror trap GOL-3. // Transactions of fusion science and technology, Vol.47, No.1T, 2005, p.35-42.
7. *A.V. Burdakov, A. England, C.S. Kim, V.S.Koidan, M. Kwon, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, and Yu.S. Sulyaev.* Detection of fusion neutrons on the multimirror trap GOL-3. // Transactions of fusion science and technology, Vol.47, No.1T, 2005, p.333-335.
8. *A.V. Аржанников, В.Т. Астрелин, А.В. Бурдаков, И.А. Иванов, В.С. Койдан, С.А. Кузнецов, К.И. Меклер, С.В. Полосаткин, В.В. Поступаев, А.Ф. Ровенских, С.Л. Синицкий, Ю.С. Суляев, А.А. Шошин.* Исследование механизма быстрого нагрева ионов в многопробочной ловушке ГОЛ-3. // Физика плазмы, том 31, № 6, 2005, с.506-520.

9. *А.В. Аржанников, А.М. Батраков, А.В. Бурдаков, И.А. Иванов, К.И. Меклер, В.В. Поступаев, А.Ф. Ровенских, С.В. Полосаткин, В.Я. Сазанский, С.Л. Сеницкий, Ю.С. Суляев.* Экспериментальное исследование динамики нейтронной эмиссии в многопроходной ловушке ГОЛ-3. // Физика плазмы, том 32, №2, 2006, с. 113–121.
10. *A.Azhannikov, A.Burdakov, V.Postupaev, Yu.Sulyaev, et.al.* Studies of plasma confinement in GOL-3 multimirror trap. // Problems of Atomic Science and Technology, 2006, No. 6. Series: Plasma Physics (12), p.47-49.
11. *A.Burdakov, A.Azhannikov, A.Beklemishev, I.Kotelnikov, Yu.Sulyaev, et.al.* Plasma heating and confinement in GOL-3 multimirror trap. // Fusion Science and Technology, Vol.51, No.2T, 2007, p.106-111.
12. *A.V. Burdakov, A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, Yu.S. Sulyaev, et. al.* Anomalous fast heating of ions in GOL-3 facility. // Fusion Science and Technology, Vol.51, No.2T, 2007, p.352-354.
13. *A.V.Burdakov, V.T.Astrelin, I.A.Ivanov, V.G.Kapralov, K.N.Kuklin, K.I.Mekler, S.V.Polosatkin, V.V.Postupaev, A.F.Rovenskih, S.V.Sergeev, A.A.Shoshin, Yu.S.Sulyaev, E.R.Zubairov.* Use of pellet injection technology at GOL-3 for plasma fueling and plasma-surface interaction research. // Fusion Science and Technology, Vol.51, No.2T, 2007, p.355-357.
14. *С.В. Полосаткин, А.В. Аржанников, В.Т. Астрелин, А.В. Бурдаков, Ю.С. Суляев, и др.* Спектроскопические исследования на установке ГОЛ-3 взаимодействия мощного плазменного потока с твердым телом. // Приборы и техника эксперимента, 2008, № 2, с. 100-107.
15. *A. Burdakov, A. Arzhannikov, K. Lotov, I. Timofeev, Yu.Sulyaev, et.al* Status and Prospects of GOL-3 Multiple Mirror Trap // Fusion Science and Technology, 2008, Vol.55, No.2T, p. 63-70.
16. *A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, V.V. Belykh, A.V. Burdakov, V.S. Burmasov, I.A. Ivanov, M.V. Ivantsivskiy, M.V. Kolosov, A.S. Krygina, K.N. Kuklin, K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, S.S. Popov, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskih, A.A. Shoshin, N.V. Sorokina, S.L. Sinitsky, Yu.S. Sulyaev, Yu.A. Trunov, Ed.R. Zubairov L.N. Vyacheslavov,* Dynamics of Electron Distribution Function in Multiple Mirror Trap GOL-3 // Fusion Science and Technology, 2008, Vol.55, No.2T, p. 144-146.
17. *A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, A.D. Beklemishev, A.V. Burdakov, V.S. Burmasov, I.A. Ivanov, M.V. Ivantsivskiy, K.N. Kuklin, K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, S.S. Popov, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskih, A.A. Shoshin, S.L. Sinitsky, Yu.S. Sulyaev, L.N. Vyacheslavov, Ed.R. Zubairov* Experiment with Large-Mirror-Ratio Corrugation at Multiple Mirror Trap GOL-3 // Fusion Science and Technology, 2008, Vol.55, No.2T, p. 147-152.
18. *A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, A.D. Beklemishev, A.V. Burdakov, Yu.S. Sulyaev, et. al.* First Experiments on Neutral Injection in Multimirror Trap GOL-3 // Fusion Science and Technology, 2008, Vol.55, No.2T, p. 153-156.

Список литературы

- [1] A. Burdakov, A. Azhannikov, V. Astrelin, et.al. Plasma heating and confinement in GOL-3 multimirror trap // Fusion Science and Technology. 2007, vol. 51, №2Т, p.106-111.
- [2] A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, A.V. Burdakov, et.al. E-beam Transportation Features in GOL-3 Facility. // Abstracts of 15th Intern. Conf. on High-Power Particle BEAMS, Saint Petersburg, Russia, 2004, p.40.
- [3] Брейзман Б. Н. Коллективное взаимодействие релятивистских электронных пучков с плазмой // Вопросы теории плазмы, вып.15.- М, Энергоатомиздат, 1987 - с.55-145.
- [4] A.V. Burdakov, V.I. Erofeev, and I.A. Kotelnikov. Explanation of turbulent suppression of electron conductivity in the GOL-3 facility at the stage of relativistic electron beam injection. // Fusion science and technology, vol.47, №1Т, 2005, p.74-77.
- [5] A.V. Аржанников, В.Т. Астрелин, А.В. Бурдаков, И.А. Иванов, В.С. Койдан, К.И. Меклер, В.В. Поступаев, А.Ф. Ровенских, С.В. Полосаткин, С.Л. Сеницкий Прямое наблюдение аномально низкой продольной электронной теплопроводности во время коллективной релаксации сильнооточного релятивистского электронного пучка в плазме //препринт ИЯФ 2002-66.
- [6] Бурдаков А.В., Поступаев В.В., Семенов Е.П. Система измерения температуры плазмы по 90° томсоновскому рассеянию на установке ГОЛ-3. - Новосибирск, 1991. - 21 с. - (Препринт Ин-т ядерной физики СО АН СССР; ИЯФ 91-33).
- [7] A.V. Аржанников, В.Т. Астрелин, А.В. Бурдаков, И.А. Иванов, В.С. Койдан, С.А. Кузнецов, К.И. Меклер, С.В. Полосаткин, В.В. Поступаев, А.Ф. Ровенских, С.Л. Сеницкий, Ю.С. Суляев, А.А. Шошин. Исследование механизма быстрого нагрева ионов в многопробочной ловушке ГОЛ-3 // Физика плазмы, 2005, том 31, №6.
- [8] Lichtenberg A. J., Mirnov V. V. Multiple Mirror Plasma Confinement // Reviews of Plasma Physics, 1996, v.19, ed. B.V. Kadomtsev, New York: Consultant Bureau/Plenum Press.
- [9] A.D. Beklemishev, "Bounce Instability in a Multi-Mirror Trap", Fusion Science and Technology. Vol.51, (2007).

СУЛЯЕВ Юлий Сергеевич

Экспериментальное
исследование нагрева и удержания плазмы
в многопробочной ловушке ГОЛ-3
по нейтронной эмиссии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор .1.03. 2010 г.
Подписано в печать 2.03. 2010 г.
Формат 60x90 1/16 Объем 1.2 печ.л., 1.0 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 3

Обработано на РС и отпечатано
на ротапинтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11