

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
“Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера
Сибирского Отделения
Российской Академии Наук”**

На правах рукописи

ТАСКАЕВ Сергей Юрьевич

**ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ
АТОМАРНЫМИ ПУЧКАМИ В ПРОБКОТРОНАХ АМБАЛ**

01.04.08 — физика и химия плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 1996

Работа выполнена в ГНЦ РФ “Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН”.

НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ:

Давыденко — кандидат физико-математических наук, ГНЦ
Владимир РФ “Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера
Иванович СО РАН”, г.Новосибирск.

Кабанцев — кандидат физико-математических наук, ГНЦ
Андрей РФ “Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера
Анатольевич СО РАН”, г.Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Сковорода — доктор физико-математических наук,
Александр РНЦ “Курчатовский институт”,
Алексеевич г.Москва.

Князев — доктор физико-математических наук,
Борис профессор, Новосибирский государственный
Александрович университет, г.Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ — Санкт-Петербургский физико-технический
ОРГАНИЗАЦИЯ институт им. А.Ф.Иоффе,
г.Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится “___” _____ 1996 г.
в “___” часов на заседании диссертационного совета Д.002.24.02 при ГНЦ РФ
“Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера СО РАН”.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНЦ РФ “ИЯФ
им.Г.И.Будкера СО РАН”.

Автореферат разослан “___” _____ 1996 г.

Учёный секретарь
диссертационного
совета,

академик

Б.В.Чириков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важнейшей задачей физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза является получение и удержание плотной горячей плазмы и, в конечном итоге, создание термоядерного реактора. Одно из направлений решения этой задачи — амбиполярная адиабатическая ловушка, обладающая рядом важных преимуществ по сравнению с другими системами удержания. В РНЦ РФ “ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН” сооружается осесимметричная амбиполярная ловушка АМБАЛ-М, на которой предполагается получить плазму с высокими параметрами, МГД-устойчивую в осесимметричной геометрии, усовершенствовать формирование потенциальных барьеров и исследовать поперечный перенос. В настоящее время на концевом пробкотроне этой установки проводятся эксперименты по получению и изучению стартовой плазмы, пригодной для дальнейшего квазистационарного нагрева с помощью инъекции высокоэнергетичных атомарных пучков и путём ввода СВЧ-мощности. Ранее накопление горячей плазмы атомарной инъекцией исследовалось на квадрупольном пробкотроне АМБАЛ-Ю в ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН.

Исследование накопления горячей плазмы в пробкотронах атомарными пучками имеет важное значение для создания генератора термоядерных нейтронов на базе газодинамической ловушки.

Основные цели работы. Целью работы является изучение накопления горячей плазмы в пробкотроне импульсной инъекцией высокоэнергетичных атомарных пучков в предварительно созданную мишенную плазму и изучение возможности перехода к квазистационарному накоплению. В ходе экспериментов был обнаружен целый ряд неожиданных явлений, существенно влияющих на накопление горячей плазмы. Основной целью работы стало изучение этих явлений — уменьшения плотности мишенной плазмы при инъекции атомарных пучков, “газовой самоизоляции” плазменной струи сопутствующим потоком быстрых атомов, значительного нагрева плазмы в пробкотроне продольным электронным током.

Научная новизна и значимость работы. В концевом пробкотроне установки АМБАЛ-М получена мишенная плазма, позволяющая перейти к квазистационарному накоплению горячей плазмы. Импульсной инъекцией атомарных пучков экспериментально продемонстрировано начальное линейное накопление горячей плазмы.

Экспериментально обнаружены и впервые подробно исследованы такие явления, как уменьшение плотности мишенной плазмы при атомарной инъекции, “газовая самоизоляция” плазменной струи сопутствующим

поток быстрых атомов, значительный нагрев плазмы в пробкотроне продольным электронным током.

Практическая ценность работы. Реализация линейного накопления высокоэнергетичных ионов на мишенной плазме в концевом пробкотроне установки АМБАЛ-М с достаточно высоким темпом позволяет перейти к экспериментам по накоплению высокотемпературной плазмы с использованием квазистационарных атомарных пучков. Высокая электронная температура мишенной плазмы позволяет осуществить подогрев электронов на второй гармонике электронно-циклотронного резонанса введением СВЧ-мощности сооружаемого гиротронного комплекса.

В работе впервые даны объяснения таким эффектам, как уменьшение плотности мишенной плазмы при атомарной инжекции, “газовая самоизоляция” плазменной струи сопутствующим потоком быстрых атомов, значительный нагрев плазмы в пробкотроне продольным электронным током. Эти эффекты при соответствующих условиях могут быть обнаружены или специально получены и на других плазменных установках.

Апробация работы. Работы, положенные в основу диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах в Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, на Звенигородских конференциях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (г.Звенигород, 1987-1996), на V и VI Совещаниях по диагностике высокотемпературной плазмы (г.Минск, 1990; г.Санкт-Петербург, 1993), на Международной конференции по открытым системам удержания плазмы для термоядерного синтеза (г.Новосибирск, 1993), на VII Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы (Минск, 1991), на XIX и XXII Международных конференциях по явлениям в ионизированных газах (г.Белград, 1989; г.Хобокен, США, 1995), на XXI Европейской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (г.Монпелье, 1994), на XV Международной конференции по физике плазмы и исследованию физики управляемого термоядерного синтеза (г.Севилья, 1994).

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации изложен на 98 страницах, включая 48 рисунков. Список литературы содержит 95 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы и даётся обзор структуры диссертационной работы.

В первой главе приводится краткий обзор работ в области открытых ловушек, описывается основной сценарий накопления горячей плазмы, исследуемый в работе, формулируются задачи необходимых исследований и приводится список используемых обозначений.

Во второй главе даётся описание установок АМБАЛ-Ю и АМБАЛ-М, основных средств диагностики плазмы и обсуждается точность определений параметров плазмы.

В третью главу включены результаты экспериментов на квадрупольном пробкотроне АМБАЛ-Ю.

Сначала приводятся результаты экспериментов по накоплению горячей плазмы инъекцией атомарных пучков в мишенную плазму, создаваемую четырьмя “кольцевыми” газоразрядными пушками, расположенными в запробочной области. Мишенная плазма характеризовалась низкой плотностью и низкой электронной температурой. Вследствие этого, захват пучков был мал, и газовые условия были плохие. Время жизни захваченных горячих ионов определялось перезарядкой на газе. Вкладываемая мощность, в основном, выносилась из плазмы в виде перезарядных потерь, и плазма существенно не нагревалась.

Затем приводятся результаты экспериментов по накоплению горячей плазмы на плотной мишенной плазме, генерируемой специально созданной “целевой” газоразрядной пушкой. Выяснено, что мишенная плазма хорошо описывается как дозвуковое течение плазменной струи до выходной пробки и сверхзвуковое — после. Высокая плотность мишенной плазмы позволила захватить в пробкотрон значительную часть инжектируемых атомов и сделать перезарядные потери несущественными. Инъекция атомарных пучков приводила к накоплению горячей плазмы до достаточно высокой плотности ($1,1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$). Выяснено, что поведение горячих ионов хорошо описывается классическими механизмами. Время жизни горячих ионов определяется рассеянием в конус потерь; энергетическое время — торможением в результате столкновений с электронами. Изучена зависимость энергосодержания от мощности инъекции. Выяснено, что увеличение мощности инъекции ведёт к увеличению захваченной мощности, к нагреву электронов, к улучшению газовых условий и, в конечном итоге, к увеличению энергосодержания горячих ионов быстрее, чем линейно. Но при имеющейся максимальной мощности инъекции полученное время жизни горячих ионов оказалось недостаточным для возможности перехода к квазистационарному накоплению.

В этой же главе описывается обнаруженная “газовая самоизоляция” плазменной струи, позволившая существенно улучшить газовые условия. Вблизи плазменного источника формируется окружающий плазму поток быстрых атомов, распространяющийся в направлении течения струи и эффективно экранирующий плазму от поступления наружного газа. Приводится физическая модель её описания, подкреплённая оценками.

Четвёртая глава посвящена изучению обнаруженного “просветления” — уменьшения плотности плотной мишенной плазмы при инъекции атомарных пучков. Приводятся экспериментальные результаты. Рассматривается система уравнений двухжидкостной магнитной гидродинамики. Численно решается временная задача определения параметров плазменной струи на оси при появлении в пробкотроне локальной популяции горячих ионов. Приводится сравнение результатов численного счёта с экспериментально измеренными. Даётся объяснение данному эффекту. Определяются основные механизмы “просветления”.

В результате этого рассмотрения было выяснено следующее. Горячие захваченные ионы эффективно нагревают ионы мишенной плазмы, но не непосредственно, а через электроны. Нагрев приводит к увеличению потоковой скорости струи и, соответственно, к уменьшению плотности мишенной плазмы. Для удержания нагретых электронов в пробкотроне

увеличивается амбиполярный потенциал. Возросший градиент потенциала приводит к более сильному ускорению вытекающих из пробкотрона ионов. В начальный момент накопления увеличение амбиполярного потенциала приводит к торможению втекающих в пробкотрон ионов, к уменьшению потока и уменьшению плотности. В данных процессах оказывается важным вклад продольной электронной термосилы.

Пятая глава посвящена экспериментам на концевом пробкотроне установки АМБАЛ-М.

В первом параграфе приводятся экспериментальные результаты исследования мишенной плазмы, позволяющей перейти к квазистационарному накоплению горячей плазмы атомарной инжекцией. Наиболее важным параметром мишенной плазмы является её высокая электронная температура (50 эВ). Помимо того, что высокая электронная температура обеспечивает медленное торможение захваченных горячих ионов и, соответственно, большее время их жизни, такая температура — минимально необходимая для возможности ЭЦР нагрева. В пробкотроне формируется амбиполярный потенциал. На многих силовых линиях экспериментально зарегистрировано наличие термобарьера, термоизолирующего горячие электроны в пробкотроне от более холодных в транспортирующей области. На некоторых силовых линиях обнаружено отсутствие термобарьера. Выяснено, что его отсутствие связано с поперечной диффузией и значительным продольным электронным током. Приводятся результаты экспериментального исследования тока. С привлечением моделей и численных расчётов обсуждается влияние значительного продольного электронного тока на удержание и нагрев плазмы. Показывается, что поддержание высокой электронной температуры в пробкотроне, в значительной степени, обеспечивается продольным электронным током, причём, нагрев не является классическим джоулевым.

Во втором параграфе главы приводятся результаты накопления горячей плазмы в концевом пробкотроне установки АМБАЛ-М импульсной инжекцией атомарных пучков в “горячую” мишенную плазму. Экспериментально продемонстрировано начальное линейное накопление горячих ионов с темпом $2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

В Заключении перечислены основные результаты, представленные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ:

1. Исследовано накопление горячей плазмы в квадрупольном пробкотроне АМБАЛ-Ю импульсной инжекцией высокоэнергетичных атомарных пучков в плотную мишенную плазму.

2. Обнаружена газовая “самоизоляция” плазменной струи. Найдено физическое объяснение этого явления.

3. Экспериментально обнаружен, подробно исследован эффект “просветления” — уменьшения плотности мишенной плазмы при инжекции атомарных пучков. Проведено моделирование влияния горячей плазмы на течение плазменной струи. Выяснены основные механизмы эффекта “просветления”.

4. В концевом пробкотроне установки АМБАЛ-М исследована мишенная плазма, позволяющая перейти к квазистационарному накоплению горячей

плазмы. Изучено течение электронного тока и его влияние на удержание и нагрев плазмы.

5. Импульсной атомарной инъекцией получена популяция горячих ионов с большим временем жизни ($\tau_{dr} \approx 2 \text{ мс}$). Экспериментально продемонстрировано начальное линейное накопление горячей плазмы с темпом $2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, опубликованы в следующих работах:

1. *Кабанцев А.А., Соколов В.Г., Таскаев С.Ю.* Уменьшение плотности мишенной плазмы при инъекции в пробкотрон атомарных пучков. - *Физика плазмы*, **21** (1995) 775-783.
2. *Таскаев С.Ю.* Исследование влияния значительного электронного тока на получение мишенной плазмы в концевом пробкотроне установки АМБАЛ-М. - *Препринт ИЯФ 95-92*, Новосибирск, 1995.
3. *Gilev E.A., Dimov G.I., Kabantsev A.A., Sokolov V.G., Taskaev S.Yu.* The Main AMBAL-Yu Experimental Results. - *Proc. Int. Conf. on Open Plasma Confinement Systems for Fusion*. Novosibirsk, 1993, p. 485-491.
4. *Akhmetov T.D.,, Taskaev S.Yu et al.* First stage experiments at the end system of axisymmetric tandem mirror AMBAL-M. - *Proc. 21st Eur. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics*, Montpellier, 1994, v.1, p. 446-449.
5. *Bender E.D., Chupriyanov V.E., Dimov G.I., Kabantsev A.A., Shun'ko E.V., Sokolov V.V. and Taskaev S.Yu.* The AMBAL-U experiment. - *Proc. Int. School of Plasma Physics, Villa Monastero - Varena, Italy, October 15 - 24, 1990*, p. 157-170.
6. *Кабанцев А.А., Соколов В.Г., Таскаев С.Ю., Чуприянов В.Е.* Газовая самоизоляция водородной плазменной струи. - VII Всесоюзная конференция по физике низкотемпературной плазмы, Минск, 1991, часть 3, стр. 67.
7. *Belkin V.S., Bender E.D., Gilev E.A.,, Taskaev S.Yu et al.* First Phase of AMBAL-M Experiment. - *Proc. Int. Conf. on Open Plasma Confinement Systems for Fusion*. Novosibirsk, 1993, p. 37-50.
8. *Taskaev S.Yu.* Influence of magnetically trapped hot ions on warm plasma floating. - *XXII Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases*. Hoboken, USA, July 31 - August 4, 1995. *Contr. Papers*, 3, p.83-84.

ТАСКАЕВ Сергей Юрьевич

**Особенности накопления горячей плазмы
атомарными пучками в пробкотронах АМБАЛ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 29 апреля 1995 г.

Подписано к печати 29.04. 1995 г.

Формат 60×90 1/16 Объём 0,7 печ.л., 0,6 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 25

Обработано на IBM PC и отпечатано
на ротапинтере ГНЦ РФ “ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН”,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.