

## ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЫСТРЫХ ИОНОВ НА УСТАНОВКЕ ГДЛ-МЕТОДОМ ИСКУССТВЕННОЙ МИШЕНИ

© 1997 г. В. И. Давыденко, А. А. Иванов, А. Н. Карпушов, А. И. Рогозин,  
Н. В. Ступишин, И. В. Шиховцев

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН*

Поступила в редакцию 19.08.96 г.

Окончательный вариант получен 13.11.96 г.

Для измерения параметров быстрых ионов на установке газодинамическая ловушка широко используются корпускулярные методы диагностики. В данной работе описывается диагностический комплекс, позволяющий измерять локальную функцию распределения ионов по энергии и питч-углу. В плазму инжектировался импульсный атомарный пучок с высокой эквивалентной плотностью тока, создававший локальную мишень для перезарядки быстрых ионов. Параметры возникающего потока вторичных атомов перезарядки измерялись с помощью сканирующего электростатического анализатора. Плотность потока атомов в искусственной мишени составляла до 0.8 экв. А/см<sup>2</sup>, что обеспечило проведение измерений при инжекции нагретых атомарных пучков с энергией 14–16 кэВ и суммарной мощностью до 4 МВт.

### ВВЕДЕНИЕ

Измерение параметров быстрых ионов в установке газодинамическая ловушка (ГДЛ) представляет собой важнейшую экспериментальную задачу. Важность этой задачи определяется тем обстоятельством, что скорость углового рассеяния и потеря энергии быстрых ионов при взаимодействии с относительно холодной мишенью плазмы существенно влияет на характеристики нейтронного источника на основе газодинамической ловушки [1–3]. А именно, если релаксация быстрых инжектированных ионов определяется парными кулоновскими столкновениями, то плотность их в областях вблизи точек останова может быть сделана существенно больше, чем в центре ловушки. При этом плотность в этих областях, где продольные скорости ионов малы, вырастает в  $\sim 1/\sqrt{\sin(\theta_0)\Delta\theta}$  раз, где  $\theta_0$  – угол, под которым ведется инжекция,  $\Delta\theta$  – угловой разброс быстрых частиц.

Расчеты, основанные на использовании уравнения Фоккера–Планка, показывают, что при наклонной инжекции в ловушку пучков дейтерия и трития с энергией  $\sim 100$  кэВ можно получить вблизи точки останова, где плотность захваченных быстрых тритонов и дейтронов максимальна, поток термоядерных нейтронов с плотностью 1–2 МВт/м<sup>2</sup>. Для технологических применений существенно, что полная мощность, потребляемая источником, относительно невелика – 50–60 МВт [4, 5].

Вместе с тем, если по той или иной причине (например, при развитии плазменных неустойчи-

востей) скорость рассеяния и потеря энергии увеличивается, нейтронный поток будет уменьшаться.

Для измерения локальной функции распределения быстрых ионов нами использовался метод искусственной мишени [6]. Измеренная функция распределения сравнивалась с результатами модельных расчетов для выявления возможных аномалий в поведении быстрых ионов.

### 1. СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1 приведена схема установки ГДЛ. В центральной плоскости ловушки на расстоянии 1.2 м от оси был установлен диагностический инжектор атомов водорода 11, пучок которого служил перезарядной мишенью для быстрых ионов. Проведение измерений существенно затруднялось тем, что в этом месте ведется инжекция шести нагретых пучков атомов водорода с энергией 14–16 кэВ и суммарной мощностью до 4 МВт [7]. Вместе с тем измерение угловой ширины функции распределения именно в месте инжекции имеет определенное преимущество, поскольку здесь эта величина минимальна.

Плотность атомов нагретых пучков в плазме с учетом их ослабления оценивалась как  $\sim 5 \times 10^9$  см<sup>-3</sup>. Предварительные оценки с учетом геометрических факторов (отношения поперечных размеров диагностического и нагретых пучков) показали, что для того, чтобы наблюдать поток атомов, возникающих при создании искусственной мишени, необходимо, чтобы диагностический пучок имел эквивалентную плотность тока  $\sim 1$  А/см<sup>2</sup>.

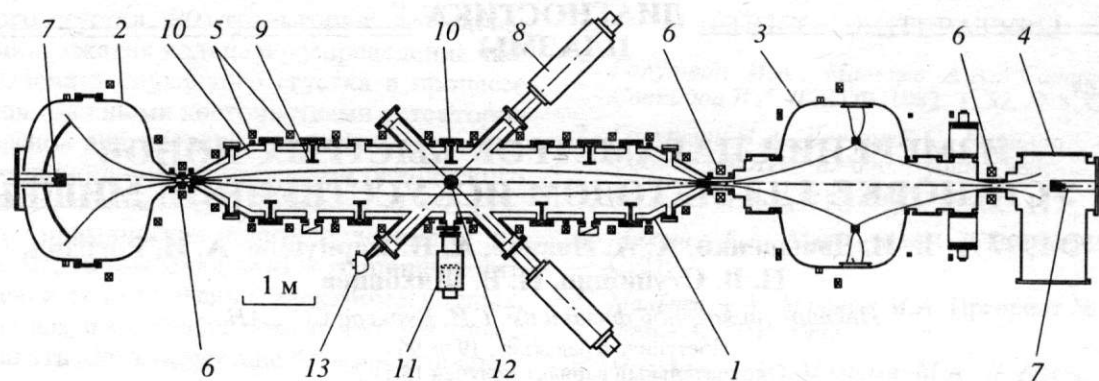


Рис. 1. Схема установки ГДЛ: 1 – центральная вакуумная камера; 2 – вакуумная камера расширителя; 3 – антипробкотрон (касп); 4 – торцевой бак; 5 – катушки основной магнитной системы; 6 – катушки пробок; 7 – плазменные пушки; 8 – атомарные инжекторы; 9 – лайнер; 10 – электродуговые испарители титана; 11 – диагностический инжектор; 12 – область регистрации атомов перезарядки на активной мишени; 13 – анализатор атомов перезарядки (условно повернут на 90°).

Полный поток атомов в анализатор  $\Delta j$  из области объемом  $V$  может быть оценен по формуле

$$\Delta j = \frac{n_b n_i \langle \sigma v \rangle \Delta \Omega}{4\pi \Delta \theta \sin \theta_0} V, \quad (1)$$

где  $n_b$  – плотность атомов в мишени,  $n_i$  – плотность быстрых ионов,  $\langle \sigma v \rangle$  – скорость перезарядки,  $\Delta \Omega$  – телесный угол наблюдения. Для типичных условий экспериментов на ГДЛ отсюда получается, что величина потока атомов в анализатор должна быть  $\sim 15$  мкА для плотности быстрых частиц  $10^{12}$  см $^{-3}$ , плотности тока пучка 1 А/см $^2$ , телесном угле анализатора  $2 \times 10^{-2}$ . Оценку токов в каналах анализатора необходимо делать с учетом

эффективности преобразования атомов в ионы в газовой мишени анализатора. Кроме того, необходимо принимать во внимание, что распределение частиц по спектру сильно неоднородно (частицы в основном сосредоточены в области низких энергий). При этом в каждом из восьми энергетических каналов величина тока оценивается в 0.1–1 мкА.

Диагностический инжектор (рис. 2) представляет собой модернизированный источник ДИНА-4А [8] с увеличенным на порядок током пучка. Для достижения повышенной плотности потока атомов в ионном источнике инжектора использовалась ионно-оптическая система с геометрической фокусировкой пучка, эмиссионный диаметр которой был увеличен с 4 до 14 см [9]. В использованной четырехэлектродной ионно-оптической системе со сферически изогнутыми электродами пучок формировался 5127 апертурой  $\varnothing 1.5$  мм, образующими гексагональную структуру с шагом 2 мм. За счет сферического изгиба электродов ионный пучок фокусировался на расстоянии 1.2 м от выходной сетки. Радиусы кривизны электродов, изготовленных из ниобия толщиной 0.3 мм, были различными. Для плазменной сетки, ближней к генератору плазмы, радиус кривизны составлял 1430 мм. Радиус кривизны следующей (вытягивающей) сетки равнялся 1020 мм. Выходная заземленная и промежуточная ускоряющая сетки имели одинаковый радиус кривизны 790 мм. Вследствие этого межсеточные зазоры возрастали с радиусом по закону  $\sim 1 + r^2/R^2$ , где  $R$  – эмиссионный радиус пучка. Это обеспечивало оптимальное формирование пучка из плазменной струи дугового генератора, плотность которой спадала по радиусу  $\sim 1/(1 + r^2/z^2)^2$ , где  $z$  – эффективное расстояние до анодного отверстия дугового генератора плазмы [10].

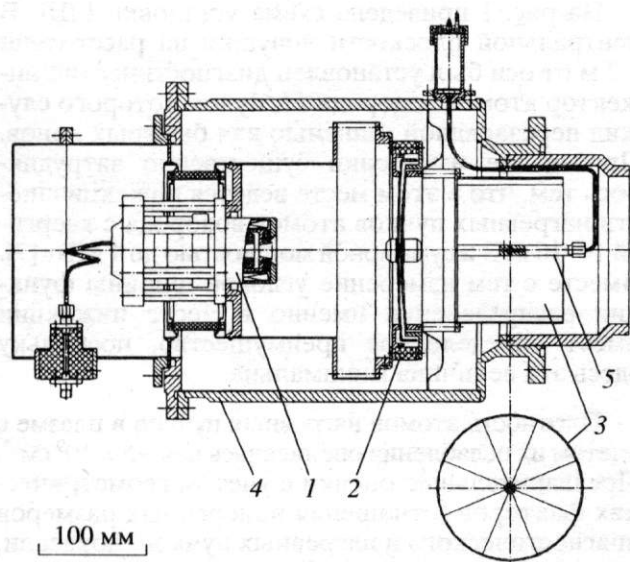


Рис. 2. Диагностический инжектор: 1 – генератор плазмы; 2 – сеточная система; 3 – перезарядная мишень; 4 – корпус; 5 – трубка для подачи газа.



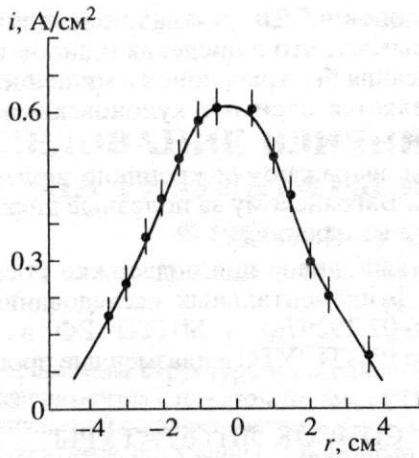


Рис. 3. Профиль плотности тока пучка в фокусе.



Рис. 4. Полный ток атомов перезарядки.

Для исключения некоторого уширения сформированного пучка ионов вследствие наличия в нем поперечного электрического поля величиной до 3 В/см [9] сразу же за стеклами он перезарядился в атомы в импульсной водородной мишени 3. Камера перезарядки была разделена по азимуту на секции с помощью радиальных перегородок. Напуск газа осуществлялся в каждую секцию через соответствующие отверстия в трубке 5. Секции играли роль газовых линий задержки, что существенно ограничивало поступление газа в ионный источник при работе мишени.

Инжектор работал в режиме одиночных импульсов с длительностью 120 мкс при токе пучка до 16 экв. А и энергии 15 кэВ. Измеренный с помощью подвижного термопарного датчика профиль плотности потока атомов водорода в фокусе на расстоянии 1.2 м от ионно-оптической системы представлен на рис. 3. В режиме, в котором проводились измерения профиля, плотность потока атомов на оси составила  $\sim 0.6$  А/см<sup>2</sup>. Максимальная достигнутая плотность потока на оси  $\sim 0.8$  А/см<sup>2</sup>.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Полученная плотность тока диагностического пучка позволила провести измерения в условиях, когда в плазму инжектировались пучки основных инжекторов с полным током  $\sim 250$  экв. А. Пучки инжектировались под углом 45° к оси установки и имели длительность 1.2 мс. Параметры атомов перезарядки измерялись с помощью сканирующего электростатического анализатора [11].

Область, из которой регистрировались частицы, имела размер  $\sim 4 \times 4 \times 4$  см<sup>3</sup>. Потоки атомов в восьми энергетических каналах измерялись с временным разрешением 12.8 мкс в каждом цикле работы установки ("выстреле"). Измерение угло-

вого спектра возможно путем изменения угла наклона анализатора к оси установки от выстрела к выстрелу.

Характерные осциллограммы полного потока атомов в анализатор и потоков, измеренных в различных энергетических каналах, представлены на рис. 4 и 5.

Наблюдаемый фон связан в основном с перезарядкой быстрых ионов на атомах нагревных пучков. Поскольку потоки атомов в каждом из каналов были малы, существенную роль играли шумы регистрирующего ФЭУ и выходных усилителей. Вследствие этого необходимая точность измерения функции распределения ( $\pm 15\%$ ) получалась усреднением данных за несколько выстрелов.

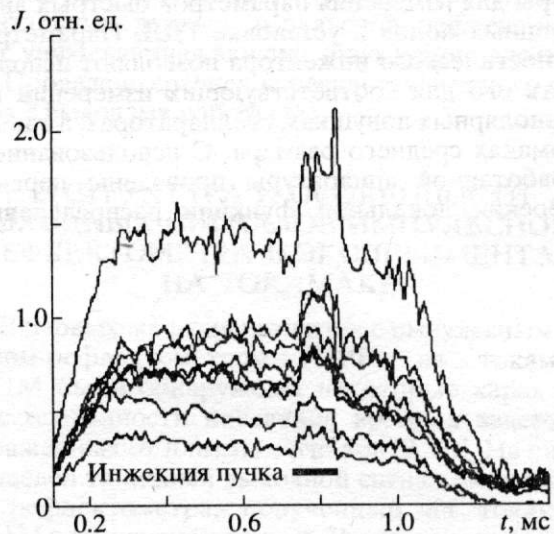


Рис. 5. Токи в различных энергетических каналах.

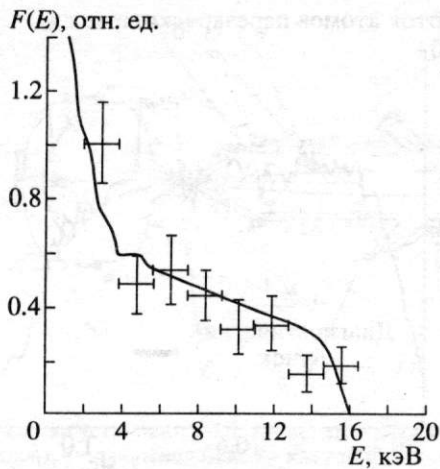


Рис. 6. Функция распределения быстрых ионов в центре установки для питч-угла  $45^\circ$ .

Функция распределения быстрых ионов по энергиям, измеренная для питч-угла  $45^\circ$ , показана на рис. 6. Измерения проводились при следующих параметрах мишенной плазмы в центральной части ловушки:  $T_e = 25$  эВ,  $n = 1.5 \times 10^{13}$  см $^{-3}$ . Величина магнитного поля в центре составляла 2 кГс. Для сравнения на том же рисунке представлена расчетная функция распределения, полученная с использованием нестационарного уравнения Фоккера–Планка с учетом изменения во времени параметров мишенной плазмы и тока инжекции. Следует отметить удовлетворительное согласие экспериментальных данных с расчетными.

### ВЫВОДЫ

Разработан комплекс диагностической аппаратуры для измерения параметров быстрых анизотропных ионов в установке ГДЛ. Параметры диагностического инжектора позволяют использовать его для соответствующих измерений на амбиоплярных ловушках, стеллараторах, а также токамаках среднего размера. С использованием разработанной аппаратуры проведены первые измерения локальной функции распределения

быстрых ионов в ГДЛ. Анализ полученных данных показывает, что в пределах ошибок измерений релаксация быстрых ионов в мишенной плазме определяется парными кулоновскими столкновениями.

Авторы выражают искреннюю признательность П.А. Багрянскому за полезные дискуссии и помощь в измерениях.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 96-02-19297а) и МНТП РФ в рамках НИОКР по РНТП “УТС и плазменные процессы”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирнов В.В., Рюттов Д.Д. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. № 9. С. 279.
2. Мирнов В.В., Рюттов Д.Д. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. термояд. синтез. 1980. Вып. 1(5). С. 57.
3. Rytov D.D. // Plasma Phys. and Contr. Fusion. 1990. V. 32. P. 999.
4. Kotelnikov I.A., Mirnov V.V., Nagornij V.P., Rytov D.D. // Proc. X Intern. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion. Res. London, 1984. Nucl. Fusion Suppl. 1985. V. 2. P. 309.
5. Котельников И.А., Рюттов Д.Д., Цицулко Ю.А. и др. Препринт № 90-105. Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1990.
6. Афросимов В.В., Кисляков А.И. // Диагностика плазмы. Вып. 6 / Под ред. М.И. Пергамента. М.: Энергоатомиздат, 1988. С. 157.
7. Ivanov A.A., Anikeev A.V., Bagryansky P.A. et al. // Proc. XXII EPS Conf. of Contr. Fusion and Plasma Phys. Bournemouth, UK, 1995. Contr. Papers. ECA. V. 19C. Pt. IV. P. 193.
8. Давыденко В.И., Иванов А.А., Кабанцев А.А. и др. // Диагностика плазмы. Вып. 5 / Под ред. М.И. Пергамента. М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 147.
9. Давыденко В.И., Димов Г.И., Морозов И.И., Савкин В.Я. // Тр. Всесоюз. совещания по открытым ловушкам. М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 24.
10. Давыденко В.И., Димов Г.И., Морозов И.И., Росляков Г.В. // ЖТФ. 1983. Т. 53. С. 258.
11. Rogozin A.I., Shihovtsev I.V. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. С. 204.