

## МАГНИТНЫЕ ЛОВУШКИ

УДК 533.9.08

### ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЯ АМБИПОЛЯРНОГО ПОТЕНЦИАЛА В РАСШИРИТЕЛЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКИ МЕТОДОМ ЛОКАЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ МИШЕНИ

© 1998 г. П. П. Дейчули, А. А. Иванов, Н. В. Ступишин

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

Поступила в редакцию 19.06.97 г.

Окончательный вариант получен 27.10.97 г.

Представлены результаты измерения профиля потенциала вдоль оси расширителя газодинамической ловушки. Потенциал в данной точке расширителя измерялся с помощью локальной газовой мишени. Мишень создавалась импульсным напуском газа через стеклянный капилляр, перемещавшийся от выстрела к выстрелу вдоль оси ловушки. Образовавшиеся в результате перезарядки и ионизации частиц газового облачка холодные ионы ускорялись амбиполярным электрическим полем. Их энергия, измеряемая на торцевой стенке электростатическим анализатором, соответствовала потенциалу пространства в месте перезарядки.

#### ВВЕДЕНИЕ

Необходимость проведения локальных измерений электрического потенциала в плазме часто возникает в исследованиях удержания плазмы в магнитных ловушках различных типов. Так, в открытых магнитных ловушках профиль потенциала вдоль силовых линий сильно влияет на удержание плазмы и ее устойчивость. В настоящей работе рассмотрена диагностика, развитая для изучения профиля потенциала в расширителе газодинамической ловушки, и обсуждаются полученные с ее помощью профили потенциала в сравнении с данными зондовых измерений.

Газодинамическая ловушка (ГДЛ) [1, 2] представляет собой осесимметричный пробкотрон с большим пробочным отношением и длиной, существенно превышающей длину свободного пробега ионов относительно рассеяния в конусе потерь. МГД-устойчивость плазмы в ловушке обеспечивается за счет вытекания плазмы через пробки в стабилизирующие торцевые ячейки с благоприятной кривизной силовых линий. В качестве стабилизаторов на ГДЛ используются либо расширители [3], в которых магнитное поле монотонно убывает от пробки к стенке, либо касп [4, 5]. Профиль плотности и энергии частиц в расширителе определяет величину его вклада в устойчивость плазмы в целом в ловушке. Для сравнения с теоретическими расчетами необходимо знать профиль амбиполярного потенциала вдоль силовых линий, который определяет направленные энергии ионов в расширителе. Кроме того, данные о полном перепаде и профиле амбиполярного потенциала позволяют получить информацию о механизмах продольных потерь энергии и частиц из ловушки.

Измерения профиля амбиполярного потенциала проводились на установке ГДЛ [3–5], схема которой показана на рис. 1.

В одном из расширителей (левом на рис. 1) размещалась плазменная пушка, которая служила для создания плазмы в ловушке. Ловушка заполнялась плазмой в течение 2.5–3 мс, после чего разрядный ток в пушке обрывался за время ~30 мкс и начиналось свободное вытекание плазмы через пробки. Начальная плотность плазмы  $(0.3–1) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , температура 3–5 эВ. На начальной стадии распада в плазму наклонно инжектировали шесть атомарных пучков с энергией 8–17 кэВ и полной мощностью 2–2.5 МВт в течение 1.2 мс. Инжекторы 5 размещались в центре системы двумя группами симметрично относительно оси. В результате захвата инжектируемых пучков в ловушке накапливались быстрые ионы, которые совершали колебания между точками остановки вблизи пробки. Накопление быстрых частиц приводило к существенному увеличению температуры основной плазмы.

Измерения профиля потенциала проводились в расширителе, противоположном тому, в котором размещалась плазменная пушка (рис. 2). На оси расширителя импульсным напуском через стеклянный капилляр  $\varnothing 1 \text{ мм}$  и длиной 270 мм создавалось облачко газообразного водорода. Напуск газа в капилляр осуществлялся с помощью импульсного электромагнитного клапана [6]. В результате перезарядки на облачке газа части ионы, покидающих ловушку, а также ионизации газа электронами образовывались медленные ионы, которые ускорялись амбиполярным электрическим полем и попадали на торцевую стенку. Согласно данным зондовых измерений, электронная

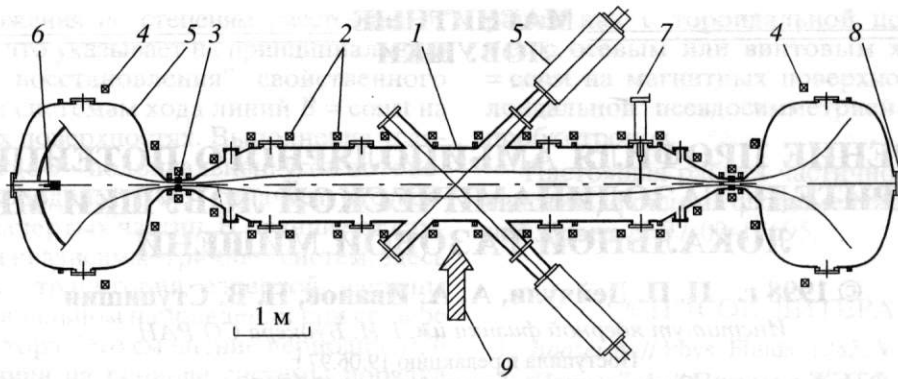


Рис. 1. Установка ГДЛ: 1 – вакуумная камера; 2 – катушки основной магнитной системы; 3 – пробочные катушки; 4 – катушки расширителя; 5 – инжекторы, плазменная пушка, подвижный эмиссионный зонд, торцевой энергоанализатор; 9 – томсоновское рассеяние.

температура в расширителе резко падает по направлению от пробки к торцевой стенке. Так, на расстоянии 30–35 см от пробки, где магнитное поле уменьшается по сравнению с пробочным в 6–7 раз, средняя энергия электронов  $\langle E \rangle_e$  падает до величины менее 5 эВ. Учитывая это обстоятельство, можно заключить, что на больших расстояниях от пробки генерация вторичных медленных ионов в облачке происходит в основном за счет перезарядки, поскольку при  $\langle E \rangle_e < 5$  эВ скорость ионизации электронами становится пренебрежимо малой.

Энергетический спектр ионов на стенке измерялся с помощью электростатического сеточного анализатора, схема которого показана на рис. 3. На сетку 3 подавалось пилообразное напряжение амплитудой до 150 В и длительностью 25 мкс для запираания ионов и анализа по энергиям. Для отсеки электронов на сетку 1 подавалось постоянное отрицательное напряжение –150 В. Ионный ток регистрировался коллектором 6. Сетки 4, 5 имели потен-

циал вакуумной камеры установки и служили для экранировки плазмы от потенциала анализирующей сетки 3. Сетка 2 также соединялась с камерой установки и служила для снижения емкостных наводок в коллекторную цепь, возникающих при изменении потенциала анализирующей сетки 3. Для уменьшения влияния пространственного заряда ионов в межэлектродных зазорах на коллектор подавалось отрицательное смещение –20 В. При подаче более высокого отрицательного напряжения полный ток коллектора не менялся при нулевом потенциале на анализирующей сетке. Сетки анализатора имели шаг 50 мкм и толщину 8 мкм. Расстояние между сетками 1 и 2 составляло 2 мм, между сетками 2 и 3 – 13 мм, между 4 и 5 – 11 мм. Расстояние от сетки 1 до коллектора – 2 мм. Входное отверстие анализатора имело  $\varnothing 1$  см.

Анализатор размещался в слабом магнитном поле ( $10^{-4}$ – $10^{-3}$  от поля в пробке). Вследствие этого ионы, вылетающие из ловушки или образовавшиеся в приосевой зоне в расширителе не слишком далеко от пробки, имели в анализаторе малую поперечную компоненту скорости. Это обстоятельство позволяло измерять с его помощью полную энергию частиц. Для отделения паразитных ионов с большими поперечными скоростями на входе была установлена коллимирующая трубка. Характерное значение плотности ионного тока в анализаторе в зависимости от параметров плазмы в центре и величины поля на торцевой стенке менялось в пределах 0.1–1 мА/см<sup>2</sup>. Были проведены калибровочные измерения энергетического разрешения анализатора, в которых использовался специальный ионный источник с изменяемой энергией частиц. Анализ полученных кривых задержки показал, что разрешение анализатора (по уровню 1/2) равно 5–10 эВ при энергии падающих ионов 100 эВ, т.е. составляет около 10%.

Рассматриваемый способ локального измерения потенциала по идеологии близок к использовавшемуся ранее на установке ТМХ-У [7]. Для

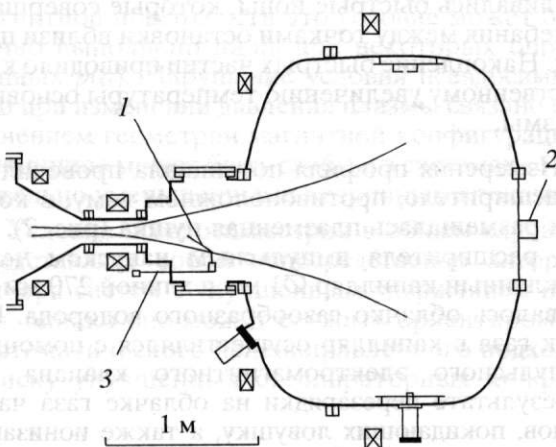


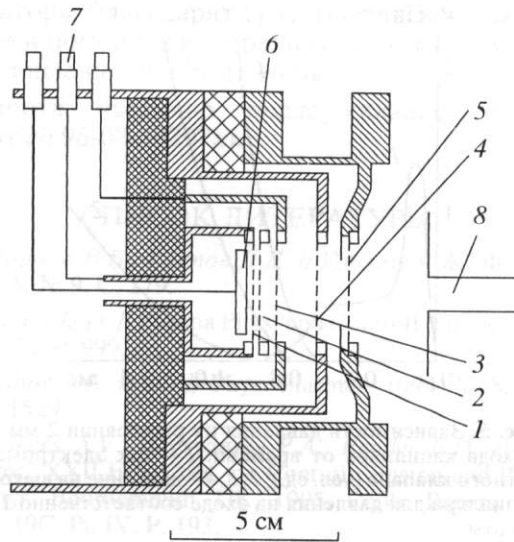
Рис. 2. Схема измерений профиля потенциала в расширителе: 1 – капилляр; 2 – торцевой анализатор; 3 – вакуумный ввод движения.

создания пробных ионов, движущихся вдоль оси ловушки, использовалась наклонная инжекция диагностического пучка атомов водорода с энергией 13.8 кэВ. Энергетический спектр ионов на торце измерялся с помощью анализатора с последовательным анализом по импульсам и энергиям частиц [8], что позволяло выделять пробные ионы на фоне ионов основной дейтериевой плазмы. По изменению энергии пробных ионов можно было судить о потенциале в месте инжекции диагностического пучка.

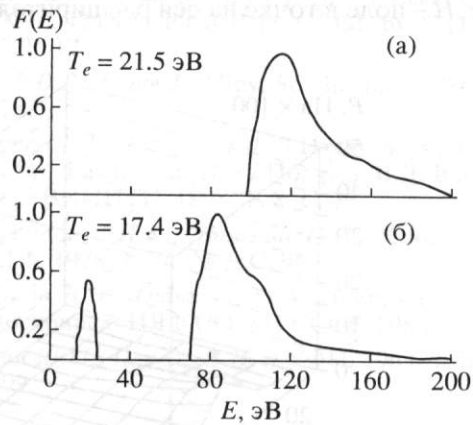
**КАЛИБРОВКА ИМПУЛЬСНОЙ МИШЕНИ**

Вторичные ионы, образовавшиеся в импульсной мишени, регистрировались анализатором. При этом давление газа на входе в капилляр и временная задержка между напуском газа и пилообразным импульсом анализирующего напряжения подбирались таким образом, чтобы на момент измерений их доля составляла несколько процентов от полного потока в анализатор. Таким образом, можно было считать, что вносимые мишенью возмущения течения плазмы в расширителе оказывались малыми. Для отделения сигнала ускорившихся холодных ионов от основного потока применялось двойное дифференцирование кривой задержки анализатора. Это позволяло отделить холодные ионы, которые имели практически моноэнергетическое распределение. Характерные функции распределения, измеренные торцевым анализатором, показаны на рис. 4. Электронная температура в центре ловушки на момент измерений равнялась соответственно 21.5 и 17.4 эВ. Без импульсной мишени спектр ионов на торцевой стенке имел вид, представленный на рис. 4а. Особенностью измеренных спектров является наличие некоторой минимальной энергии ионов. Эта минимальная энергия определяется потенциалом в области перехода течения плазмы из столкновительного режима к бесстолкновительному. При подаче газа в капилляр на функции распределения возникал характерный пик, соответствующий холодным ионам, образовавшимся в локальной мишени (рис. 4б).

Существенной проблемой в данном подходе является локальность измерений, которая определяется размером облака. В оценках этого размера существует значительная неопределенность, связанная с задержкой распространения газа в капилляре, неоднородностью струи на выходе и т.д. Для уточнения этих величин были проведены измерения динамики выхода газа из капилляра и расширения облачка с помощью подвижной ионизационной лампы. Результаты измерений давления представлены на рис. 5, 6. Измерения проводились с помощью открытой стандартной лампы ПМИ-10-2. Приведенные на рис. 5 зависимости давления на выходе капилляра от времени при различных давлениях на входе показывают, что характерное время задержки газа



**Рис. 3.** Торцевой анализатор энергий ионов: 1-5 – сетки анализатора; 6 – коллектор; 7 – разъемы; 8 – коллиматор.



**Рис. 4.** Функции распределения ионов на торце: а – без подачи газа в капилляр; б – с подачей газа.

составляет ~1 мс. Пространственный профиль плотности (рис. 6) измерялся в узлах сетки с шагом 5 мм. Согласно этим измерениям, ширина профиля составляет 3-4 см. Эта величина определяла степень локальности измерений, которую можно признать удовлетворительной, поскольку характерная длина расширителя ~1 м (масштаб, на котором магнитное поле падает на порядок).

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОФИЛЯ ПОТЕНЦИАЛА**

Капилляр перемещался вдоль оси на расстояние ~40 см. Это дало возможность измерить профиль потенциала в расширителе в достаточно большом диапазоне изменения магнитного поля

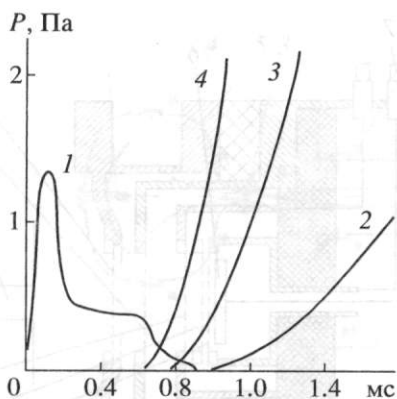


Рис. 5. Зависимость давления на расстоянии 2 мм от выхода капилляра от времени: 1 – ток электромагнитного клапана (усл. ед.); 2, 3, 4 – давление на выходе капилляра для давления на входе соответственно 1, 3 и 5 атм.

(от 1/4.5 до 1/16 поля в пробке). На рис. 7 представлен измеренный профиль потенциала как функция отношения  $H_{\max}/H$ , где  $H_{\max}$  – поле в пробке,  $H$  – поле в точке на оси расширителя. По-

тенциал нормировался на электронную температуру в центре, которая измерялась тройным зондом. Показания зонда сравнивались с данными, полученными с помощью томсоновского рассеяния, установленного в центральной плоскости ловушки. Оба метода давали близкие результаты. Поскольку зондовые измерения проводились более оперативно, нормировка потенциала велась с использованием электронной температуры, измеряемой непосредственно зондом.

Как видно из рис. 7, основное падение потенциала происходит в области, где магнитное поле падает в  $\sim 10$  раз, т.е. сравнительно близко к пробке. Далее, в основном объеме расширителя потенциал меняется слабо, что качественно указывает на присутствие здесь популяции запертых электронов [9, 10]. Полученный профиль потенциала и его величина достаточно хорошо согласуются с расчетными в модели бесстолкновительного течения [11].

Полученные результаты сравнивались с измерениями профиля потенциала плазмы в расширителе по положению точки перегиба вольт-амперной

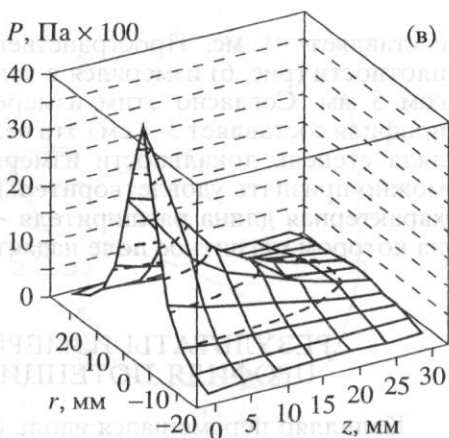
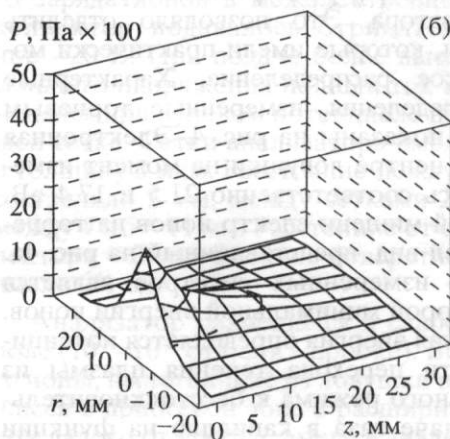
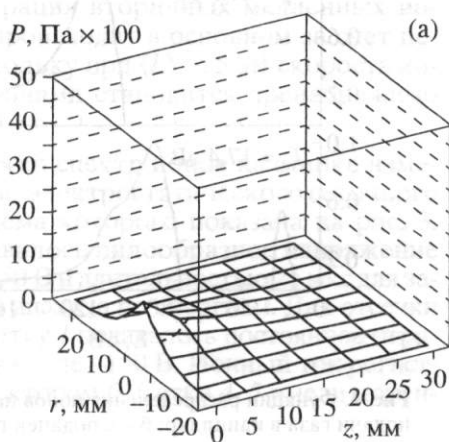


Рис. 6. Профиль плотности на выходе капилляра в различные моменты времени. Задержка: а – 750 мкс; б – 820 мкс; в – 890 мкс.

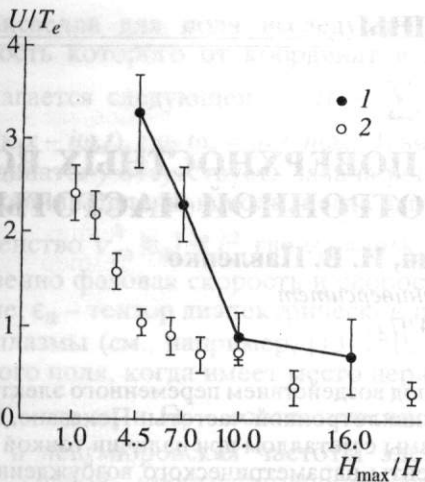


Рис. 7. Профиль амбиполярного потенциала в расширителе: 1 – зондовые измерения, 2 – газовая мишень.

характеристики подвижного одиночного зонда [12]. Качественно ход потенциала в расширителе по данным зондовых измерений был таким же: вблизи пробки он резко падал и затем менялся слабо. Вместе с тем величина его была систематически меньше на 1–2  $T_e$ , чем измеренного с помощью данной диагностики (рис. 7). По-видимому, этот результат объясняется возмущениями плазмы зондом. Эти возмущения должны быть особенно велики вблизи пробки, где поперечный размер плазмы мал. Косвенно наличие этого возмущения подтверждается тем, что при прочих одинаковых условиях максимальная температура плазмы в ловушке при нагреве была заметно меньше в случае, когда зонд вводился в плазму вблизи пробки.

Авторы благодарят П.А. Багрянского за внимание и помощь в измерениях, а также за многочисленные ценные замечания.

Работа частично поддерживалась РФФИ (грант № 96-02-19297а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирнов В.В., Рюттов Д.Д. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. № 9. С. 279.
2. Ruytov D.D. // Plasma Phys. and Controll. Fusion. 1990. V. 32. P. 999.
3. Ivanov A.A. et al. // Phys. Plasmas. 1994. V. 8. № 5. P. 1529.
4. Anikeev A.V., Bagryansky P.A., Bender E.D. et al. // Proc. XXII EPS Conf. on Controll. Fusion and Plasma Phys. Bournemouth, UK, 1995. Contr. Papers. ECA. V. 19C. Pt. IV. P. 193.
5. Anikeev A.V., Bagryansky P.A., Deichuli P.P. et al. // Phys. Plasmas. 1997. V. 4. № 1. P. 183.
6. Деревянкин Г.Е., Дудников В.Г., Журавлев П.А. // ПТЭ. 1975. № 5. С. 168.
7. Porter G.D. Axial potential profile measurements in TMX-U, TMX-U Final Report / Ed. by G.D. Porter, 1987. P. 17.
8. Grubb D.P., Foote J. // Rev. Sci. Instrum. 1986. V. 57. P. 1783.
9. Мирнов В.В., Рюттов Д.Д. // Итоги науки и техники. Сер. Физика плазмы / Под ред. В.Д. Шафранова. М.: ВИНТИ, 1998. Т. 8. С. 77.
10. Конкашбаев И.К., Ландман И.С., Улинич Ф.Р. // ЖЭТФ. 1978. Т. 74. № 3. С. 956.
11. Мирнов В.В., Ткаченко О.А. Препринт № 86-28. Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1986.
12. Каган Ю.М., Перель В.И. // УФН. 1963. Т. 81. № 3. С. 409.