



## Адиабатическая ловушка с комбинированным магнитным полем

Ю. Т. Байбородов, М. С. Иоффе, В. М. Петров, Р. И. Соболев

В работе изложены результаты первых экспериментов, проведенных на установке ПР-5 — адиабатической ловушке с магнитным полем, возрастающим как в продольном, так и в радиальном направлениях. Показано, что в такой ловушке отсутствует магнито-гидродинамическая неустойчивость плазмы; время жизни плазмы ограничивается перезарядкой быстрых ионов на нейтральном газе. Максимальные времена распада плазмы, наблюдавшиеся в этих экспериментах, достигают 10—15 мсек.

На Международной конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Зальцбург, 1961) были изложены результаты предварительных экспериментов по удержанию плазмы в адиабатической ловушке с пробками, в которой магнитное поле возрастает не только в продольном, но и в радиальном направлениях [1].

Идея такой ловушки основана на том, что возрастание поля в радиальном направлении должно препятствовать развитию в плазме конвективной неустойчивости, вызывающей в обычной ловушке с пробками утечку плазмы поперек магнитного поля [2—5]. Для создания поля, возрастающего по радиусу, катушки продольного поля были дополнены так называемой стабилизирующей обмоткой. Последняя представляет собой систему линейных проводников, параллельных оси ловушки и расположенных симметрично по азимуту вблизи боковой стенки вакуумной камеры; через соседние проводники ток пропускается во взаимно противоположных направлениях.

Основной вывод, который можно было сделать из упомянутых выше экспериментов, сводился к тому, что при достаточно большой напряженности поля стабилизирующей обмотки время жизни плазмы в ловушке заметно увеличивается (приблизительно в пять раз: со 100 до 450—500 мсек). Были также основания полагать, что в стабилизированном режиме время жизни определяется в основном потерями быстрых ионов плазмы в результате перезарядки, а не какими-либо неустойчивостями. Однако

из-за несовершенства вакуумных условий в установке (минимальное давление водорода при наличии плазмы составляло  $1 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.) такое заключение нельзя было сделать с достаточной уверенностью.

В 1962 г. была сооружена новая установка ПР-5 — адиабатическая ловушка с комбинированным магнитным полем указанного выше типа и с более совершенными вакуумными условиями. В настоящей работе приводятся результаты первых экспериментов, проведенных на этой установке.

Схема установки показана на рис. 1. Продольное магнитное поле напряженностью до 5000 э в центральной части ловушки и с побочным отношением 1,7 создается катушками, которые питаются от генератора постоянного тока. Стабилизирующая обмотка размещается в зазоре между вакуумной камерой и катушками продольного поля; напряженность поля стабилизирующей обмотки у стенки вакуумной камеры до 4500 э. Обмотка питается от конденсаторной батареи; длительность полупериода тока 55 мсек. Вакуумная камера диаметром 40 см и длиной 400 см изготовлена из нержавеющей стали; камера откачивается предварительно до давления  $1 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. двумя паромасляными насосами, снабженными азотными ловушками. Диафрагмы разделяют камеру на ряд отсеков, в каждом из которых помещены титановые испарители; титан распыляется непосредственно на внутреннюю поверхность камеры. Дифференциальная система откачки титаном обеспечивает поддержание давления в цен-



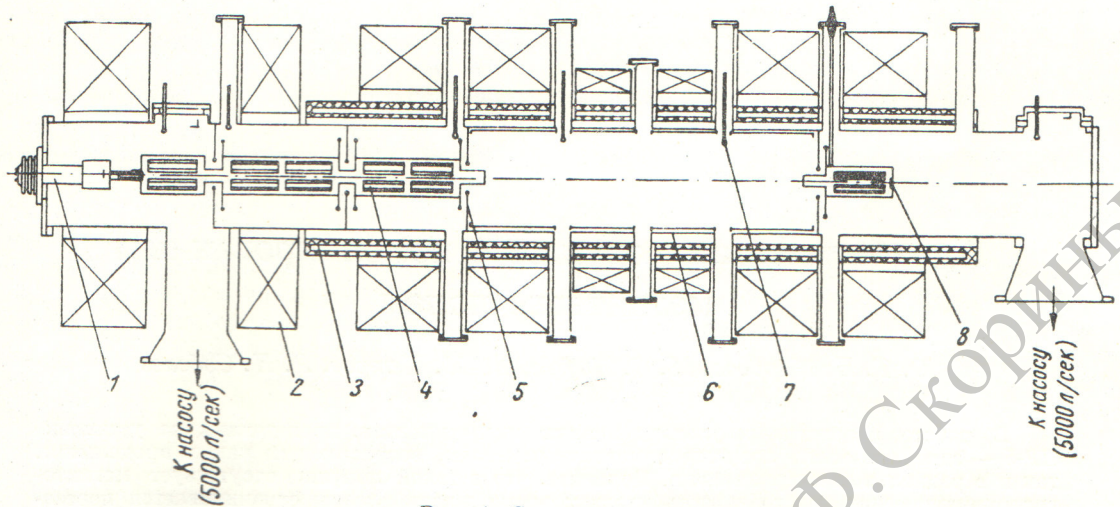


Рис. 1. Схема установки:

1—плазменный источник; 2—катушки продольного поля; 3—стабилизирующая обмотка; 4—охранные цилиндры; 5—диафрагмы; 6—вакуумная камера; 7—титановые испарители; 8—приемный электрод.

тальной части камеры  $5 \cdot 10^{-8}$  мм рт. ст. при стационарном впуске водорода в плазменный источник  $500 \text{ см}^3/\text{ч}$ .

Для заполнения ловушки плазмой использовалась «магнетронная» инжекция, подробно описанная в работе [6]. В описываемых экспериментах  $n \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$ ;  $T_i \approx 5 \text{ кэВ}$ ;  $T_e \approx 20 \text{ эВ}$ .

Влияние поля стабилизирующей обмотки  $H_{\perp}$  на удерживающие свойства ловушки определялось по изменению времени распада плазмы  $\tau$  в зависимости от величины  $H_{\perp}$ . Значение  $\tau$  измерялось тем же методом, что и в работе [6], основанным на регистрации потока быстрых нейтральных атомов перезарядки.

На рис. 2 приведена зависимость  $\tau$  от  $H_{\perp}$ , полученная при продольном поле в центре ловушки  $H_{0||}$ , равном  $3300 \text{ э}$ , и давлении водорода  $1,5 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст. По оси абсцисс, кроме  $H_{\perp}$ , отложена также величина  $\alpha_{\perp}$ , равная  $\frac{\sqrt{H_{0||}^2 + H_{\perp}^2}}{H_{0||}}$  и характеризующая так называемое стеночное пробочное отношение, т. е. отношение напряженности суммарного магнитного поля у стенки вакуумной камеры к напряженности поля в центре ловушки. Кривая рис. 2

показывает, что поле стабилизирующей обмотки весьма эффективно воздействует на плазму: при  $H_{\perp} = 1500 \text{ э}$  ( $\alpha_{\perp} = 1,1$ ) плазма распадается в 35 раз медленнее, чем при  $H_{\perp} = 0$ . Абсолютное значение времени распада в стабилизированном режиме ( $\alpha_{\perp} \geq 1,1$ ) составило в данном эксперименте  $3,5 \text{ мсек}$  вместо  $0,5 \text{ мсек}$  в работе [1]. Такое различие связано с разным давлением

нейтрального газа в камере ( $1,5 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст. на новой установке и  $1,2 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. ранее). Это свидетельствует о том, что распад определяется перезарядкой.

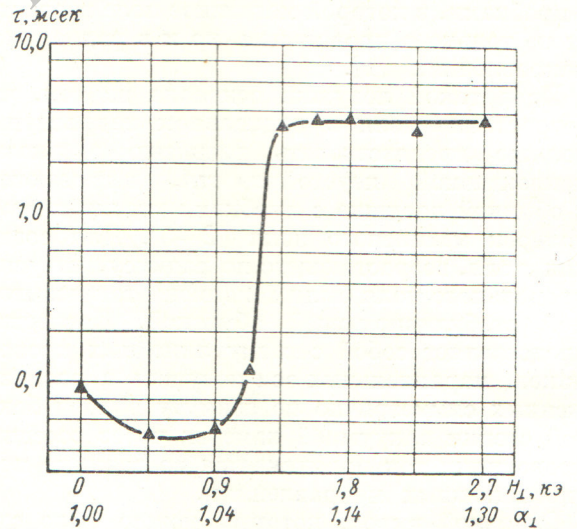


Рис. 2. Зависимость времени распада плазмы  $\tau$  от напряженности поля стабилизирующей обмотки  $H_{\perp}$  ( $H_{0||} = 3,3 \text{ кэ}$ ;  $p = 1,5 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст.).

Максимальные времена распада, наблюдавшиеся на новой установке при еще более низких давлениях, достигают  $10\text{--}15 \text{ мсек}$ .

Иллюстрацией эффективности стабилизирующего поля в подавлении неустойчивости плаз-





Рис. 3. Осциллограммы тока на зонд при разных значениях стабилизирующего поля ( $H_{0||} = 3300$  э;  $p = 1,5 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст.):

1— $H_{\perp} = 0$ ,  $\alpha_{\perp} = 1,00$ ; 2— $H_{\perp} = 500$  э;  $\alpha_{\perp} = 1,04$ ;  
3— $H_{\perp} = 1400$  э,  $\alpha_{\perp} = 1,09$ ; 4— $H_{\perp} = 2400$  э,  $\alpha_{\perp} = 1,21$ .

мы могут служить осциллограммы тока на ленточный зонд, помещенный внутри ловушки. На рис. 3 показаны такие осциллограммы для сферического зонда диаметром 4 мм, установленного на расстоянии 50 мм от боковой стенки в центральном сечении камеры. Зонд находился при потенциале  $-40$  в относительно стенок и измерял ионный ток насыщения, т. е. величину, пропорциональную плотности плазмы в окрестности зонда. Видно, что глубокие пульсации плотности, обусловленные неустойчивостью плазмы в «бочкообразном» поле обычной ловушки, полностью исчезают по мере увеличения стабилизирующего поля. Интересно отметить, что зонд даже таких относительно малых размеров существенно сокращает время жизни плазмы в стабилизированном режиме. Этот факт в свою очередь также указывает на длительное существование плазмы в ловушке при наличии стабилизирующего поля.

Таким образом, новые данные, полученные на установке ПР-5, полностью подтверждают результаты предварительных экспериментов, описанных в работе [1]. Они с достаточной определенностью показывают, что по крайней мере для плазмы малой плотности ( $\beta = \frac{n(T_i + T_e)}{H^2/8\pi} \approx 10^{-5}$ )

адиабатическая ловушка с комбинированным магнитным полем обеспечивает стабильное удержание плазмы, не нарушаемое магнитогидродинамическими неустойчивостями.

Авторы выражают благодарность Л. А. Арцимовичу за постоянный интерес к работе, содействие в ее проведении и весьма ценные обсуждения результатов.

Поступила в Редакцию 11/IV 1963 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. В. Готт, М. С. Иоффе, В. Г. Тельковский. Доклад CN 10/262, представленный на Международную конференцию по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Зальцбург, МАРАТЭ, 1961.
2. M. Rosenbluth, C. Longmire. Ann. Phys., **1**, 120 (1957).
3. Б. Б. Кадомцев. «Ж. эксперим. и теор. физ.», **40**, 328 (1961).
4. М. С. Иоффе, Р. И. Соболев, В. Г. Тельковский, Е. Е. Юшманов. Там же, стр. 40.
5. М. С. Иоффе, Е. Е. Юшманов. Nucl. Fusion, Suppl., part 1, 177 (1962).
6. М. С. Иоффе, Р. И. Соболев, В. Г. Тельковский, Е. Е. Юшманов. «Ж. эксперим. и теор. физ.», **39**, 1602 (1960).

