

АДИАБАТИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ

ТОРОИДАЛЬНОГО ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

*В. К. Гусев, В. А. Ипатьев, М. Ф. Казанский, С. Ф. Калмыков,
Г. Т. Раздобарин, К. Ф. Шаповец, И. Д. Шприц*

В установке типа токамак в результате быстрого увеличения тороидального поля осуществлено адиабатическое сжатие плазмы. Энергетическое время жизни в сжатой плазме в четыре раза больше, чем в омическом нагреве. Сжатие сопровождается резким ослаблением колебаний в плазме.

1. Установка "Туман-2" [1] представляет собой токамак с большим радиусом $R = 40$ см и радиусом диафрагмы $a = 8$ см. Она предназначена для исследования сжатия плазмы при быстром увеличении тороидального магнитного поля.

Первые опыты, выполненные при низких параметрах плазмы, описаны в [2]. Задачей описываемых здесь экспериментов было получение адиабатического нагрева и изучение сжатого шнура при параметрах плазмы, характерных для токамаков.

2. Улучшение вакуумной технологии позволило получить мгд устойчивый режим омического нагрева. Наибольший для устойчивого режима ток в плазме составлял $I_p = 5$ кА при тороидальном магнитном поле $H_{\theta_0} = 4$ кэ. Это дает запас устойчивости на краю диафрагмы $q(a) = 6$. Профиль электронной температуры, построенный на основе спектральных и лазерных измерений, хорошо аппроксимируется параболой:

$$T_e(r) = T_0 [1 - (r^2/b^2)], \quad b = 5 \text{ см.} \quad (1)$$

Профиль заметно уже отверстия в диафрагме. Это, по-видимому, и объясняет, почему $I_p = 5$ кА является предельным для $H_{\theta_0} = 4$ кэ. Лазерные измерения проводились в центре разрядной камеры и дали для омического нагрева электронную температуру $T_0 = 100 + 150$ эв. Температура водородных ионов, измеренная по спектру атомов перезарядки, составляет $T_i = 30$ эв [3]. Концентрация электронов в центре камеры, измеренная СВЧ интерферометром ($\lambda = 4$ мм) и лазером, составляет $n_0 = (6 + 8) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Расчет энергетического времени жизни плазмы и отношения газодинамического давления к давлению полоидального магнитного поля дает, соответственно, $\tau_E = 150 - 200$ мксек, $\beta_1 = 0,6$.

3. Сжатие производилось в стационарной стадии разряда (рис. 1). За 125 мксек тороидальное поле увеличивалось от начальной величины $H_{\theta_0} = 4$ кэ до максимальной $H_{\theta c} = 12$ кэ (коэффициент сжатия $\alpha = H_{\theta c} / H_{\theta_0} = 3$). Затем система катушек тороидального поля закорачивалась (клямпинг), и поле спадало с постоянной времени около 2 мсек

(рис. 1 — H_θ). Ток плазмы при этом поддерживался постоянным (рис. 1 — I_p). Специальное программирование поперечного поля позволяло удерживать плазменный шнур вблизи центра камеры в ходе сжатия.

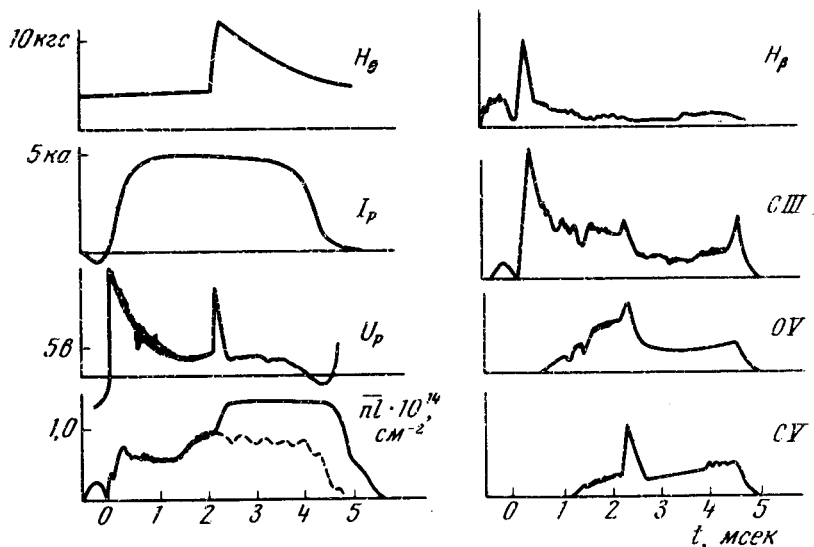


Рис. 1

На напряжении U_p возникает индуктивный выброс (рис. 1 — U_p), связанный с уменьшением радиуса a . Анализ поведения U_p при сжатии показывает, что сужение токонесущего канала соответствует условию "вмороженности" плазмы в магнитное поле: $a^2(t) \sim [H_\theta(t)]^{-1}$.

На рис. 2 — 2 показано отношение проводимости плазмы до (σ_0) и сразу после сжатия (σ_c) при разных a . Там же (рис. 2 — 1) приводится изменение σ_c / σ_0 , соответствующее адиабатическому закону ($\sigma_c : \sigma_0 = a$). Видно, что σ_c / σ_0 всегда больше a , что указывает на дополнительный нагрев плазмы сверх адиабатического. Так, для $a = 3$ увеличение температуры T_σ , рассчитанной по проводимости, составляет $T_{\sigma_c} / T_{\sigma_0} \approx 3$ (для адиабатического нагрева $T_c / T_0 = a^{2/3} = 2$). Другая оценка температуры при сжатии была сделана по времени "выгорания" спектральной линии иона C_V в центральной части сжатого шнура (рис. 1 — C_V). Оценка, в которой использованы данные работы [4], дает $T \gtrsim 300$ эв. Лазерные измерения электронной температуры проводились в момент максимального сжатия и 300 мксек спустя, в клямпинге, в центре камеры и в точке, смещенной от ее экваториальной плоскости на 2 см. Эти измерения показали, во-первых, что радиальный профиль T_e сужается. Во-вторых, оказывается, что центр сжатого плазменного шнура смещен от экваториальной плоскости камеры. Так, измерения в различных пространственных точках в омическом нагреве дают практически одинаковые величины T_e , в сжатии же температура в центре камеры $T_e = 110 \pm 20$ эв, а на расстоянии 2 см от него — 190 ± 30 эв. Наибольшее значение T_e было получено в клямпинге в смещенной точке $T_e = 280 \pm 45$ эв. Мы полагаем, что при этом измерении

центр плазменного шнура ближе всего к точке наблюдения рассеянного лазерного света. Измерения проводимости и спектральные измерения указывают на рост T_e после момента максимального сжатия. Температура ионов в сжатом шнуре составила $T_i = 55 \text{ эв}$ [3].

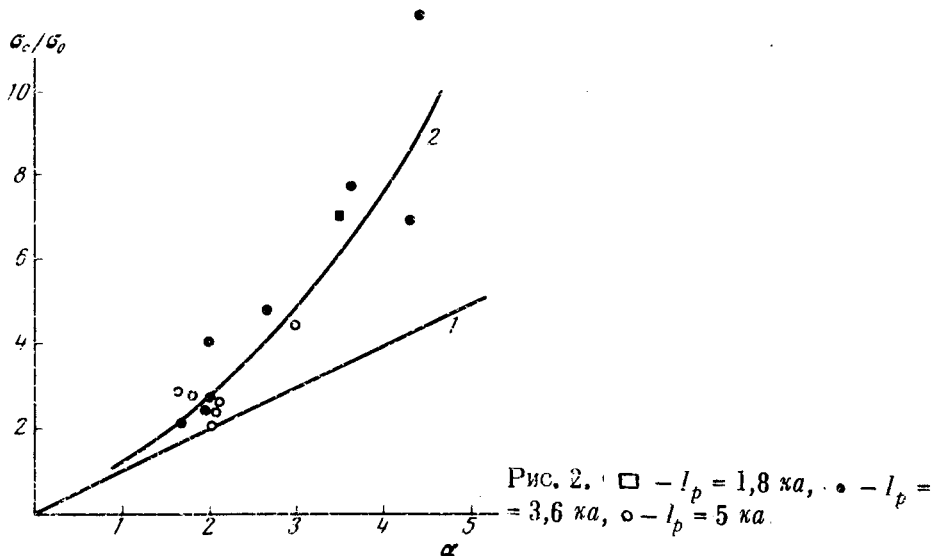


Рис. 2. $\square - I_p = 1,8 \text{ ка}$, $\bullet - I_p = 3,6 \text{ ка}$, $\circ - I_p = 5 \text{ ка}$.

На рис. 1 — $\bar{n}l$ приведена осциллограмма интерферометрического сигнала. Его изменение при сжатии близко к расчету по условию "вмороженности". Отсутствие заметного уменьшения $\bar{n}l$ при уменьшении H_θ в ходе клемпинга указывает на накопление частиц в сжатом шнуре и, следовательно, на увеличение их времени жизни.

Туман-2

	Омический нагрев	Сжатие
$H_\theta, \text{ мкс}$	4	12
$I_p, \text{ ка}$	5	5
$U_p, \text{ в}$	4	3
$\bar{T}_e, \text{ эв}$	50	150
$T_e, \text{ эв}$	110	300
$T_i, \text{ эв}$	30	55
$\bar{n}_e, 10^{13} \text{ см}^{-3}$	0,5	~1,5
β_I	0,6	1,6
$\tau_E, \text{ мксек}$	150	600
$\tau \sim a^2 N_\phi, \text{ мксек}$	180	100

Параметры плазмы, достигнутые в результате сжатия, длительное время (≈ 1 мсек) поддерживаются на стационарном уровне за счет протекающего по плазме тока. Расчет энергетического времени жизни по данным эксперимента дает $\tau_E = 600 + 800$ мсек. Величина $\beta_1 = 1,5$ для сжатого шнура.

4. В таблице сравниваются значения наиболее важных параметров в омическом нагреве и в сжатии. Ниже перечисляются основные результаты настоящей работы.

а) Режим омического нагрева является характерным для токамаков. В частности, τ_E в омическом нагреве соответствует хорошо известной для токамаков экспериментальной зависимости [5]

$$\tau_E = 3,6 \cdot 10^{-8} a^2 N \dot{\phi}. \quad (2)$$

б) Изменение концентрации плазмы при возрастании тороидального поля соответствует условию ее "вмороженности" в магнитное поле.

в) Нагрев при сжатии обусловлен, в основном, адиабатическим эффектом. Выделение джоулева тепла за счет протекания тока по плазме может объяснить дополнительный нагрев сверх адиабатического.

г) При сжатии резко ослабевают колебания в плазме.

д) Термоизоляция плазмы улучшается, τ_E возрастает в четыре раза по сравнению с омическим нагревом. Существенно, что величина τ_E для сжатого шнура намного больше значения, даваемого (2). Улучшение термоизоляции при сжатии, по-видимому, связано с "отрывом" плазмы от диафрагмы, что согласуется с результатами расчетов [7].

Авторы благодарны проф. В.Е.Голанту за постоянный интерес к работе и М.И.Вильджюнасу, Г.М.Воробьеву, А.А.Воронину, С.И.Лашкулу, С.В.Лебедеву, Б.М.Липину, В.Р.Машьяновой, В.Л.Паутову и И.П.Фоломкину за ценную помощь.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
14 июля 1975 г.

Литература

- [1] А.И.Анисимов и др. Proc. 4-th Int. Conf. Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fusion Research, Madison 1971, v. III L-5.
- [2] Е.Л.Березовский и др. ЖТФ, 45, 543, 1975.
- [3] Е.Л.Березовский и др. Письма в ЖТФ, в печати.
- [4] Ю.И.Галущкин и др. Proc. 4-th Int. Conf. Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fusion Research, Madison 1971, v. II, F-6.
- [5] Е.Р.Gorbunov et al. Nucl. Fusion, 10, 43, 1970.
- [6] Ю.Н.Днестровский, Д.П.Костомаров, Н.Л.Павлова. Письма в ЖЭТФ, 13, 697, 1971.
- [7] K.Vol et al. Phys. Rev. Lett., 29, 1495, 1972.