

ПОДЖАТИЕ ПЛАЗМЫ НАРАСТАЮЩИМ ПРОДОЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В ТОКАМАКЕ

Ю. Н. Днестровский, Д. П. Костомаров, Н. Л. Павлова

Одним из возможных способов нагрева плазмы в системах Токамак является поджатие плазмы с помощью увеличения основного продольного поля H . Простые соображения, основанные на идеальной магнитной гидродинамике, показывают, что плотность плазмы $n(r, t)$ в центре шнура должна возрасти линейно с полем, а температура ионов T_i и электронов T_e , как $H^{2/3}$. Однако, при поджатии плазмы возникает ряд новых эффектов, существенно изменяющих ее энергетический баланс. Во-первых, происходит "отрыв" плазмы от стенок камеры (или диафрагмы), в результате чего поток тепла на стенку резко уменьшается. Во-вторых, при сжатии тока выделение джоулева тепла в центральной части плазмы увеличивается по квадратичному закону, а в поверхностном слое плазмы появляется ток обратного направления (антиток). Указанные эффекты должны привести к дополнительному нагреву ионов и электронов.

Для проверки высказанных соображений проводилось численное интегрирование системы уравнений баланса частиц и энергии плазмы [1, 2]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D \frac{\partial n}{\partial r} \right) + \alpha n + \frac{\alpha}{2} r \frac{\partial n}{\partial r},$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{nr} \frac{\partial}{\partial r} \left(r n \chi_i \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) - \frac{Cn}{T_e^{3/2}} (T_i - T_e) + \frac{2}{3} \alpha T_i + \frac{\alpha}{2} r \frac{\partial T_i}{\partial r},$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_e}{\partial t} = & \frac{1}{nr} \frac{\partial}{\partial r} \left(r n \chi_e \gamma_1 \gamma \frac{\partial T_e}{\partial r} \right) + \frac{Cn}{T_e^{3/2}} (T_i - T_e) + \\ & + \frac{2}{3} \alpha T_e + \frac{\alpha}{2} r \frac{\partial T_e}{\partial r} + \frac{B\gamma}{n T_e^{3/2}} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \mu) \right]^2, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} = A \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\gamma}{T_e^{3/2}} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \mu) \right] + \frac{\alpha}{2} r \frac{\partial \mu}{\partial r}.$$

Здесь $\mu = RH_\theta / rH$, H_θ — поле продольного тока I , D , χ_i и χ_e —

"неоклассические" коэффициенты переноса [3], $A = 6 \cdot 10^3$, $B = 2 \cdot 10^7 H^2 / R^2$, $C = 470$, время t в мсек, T_e и T_i в эв, n в 10^{13} см^{-3} , R и a — большой и малый радиусы плазменного тора в см, $\alpha = (1/H)(dH/dt)$, γ — аномальность по сопротивлению по отношению к классическому. Через γ_1 обозначен феноменологический коэффициент "супераномальной" теплопроводности электронов. На установке Т-3 при $n \sim 2$ и $T_e \sim 10^3$ $\gamma_1 = 7$ [4].

На рис. 1 приведены распределения плотности плазмы по радиусу в различные моменты времени при $n(0, 0) = 3,5$, $I = 90 \text{ кА}$, $a = 15$, $R = 100$. Продольное магнитное поле за время $\Delta t = 5$ изменялось по линейному закону от $H_0 = 15 \text{ кэ}$ ($t = 0$) до $H = 40 \text{ кэ}$ и после этого оставалось постоянным. Хорошо видно, что начальное параболическое распределение плотности перестраивается в распределение, имеющее плато малой плотности на периферии (плазма "отрывается" от стенок). Величина антитока составляет 25 — 30% от полного тока. Температуры T_e и T_i и энергетическое время τ_E сильно возрастают от $T_{e0} = 600 \text{ эв}$ до $T_e = 2300 \text{ эв}$, от $T_{i0} = 350 \text{ эв}$ до $T_i = 1100 \text{ эв}$, τ_E от 4 до 100 мсек.

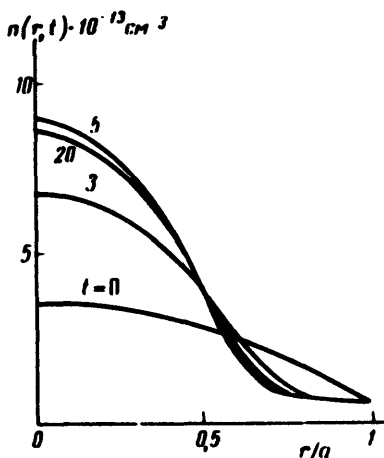


Рис. 1. Профили плотности плазмы при поджати в различные моменты времени при $n(0, 0) = 3,5$, $I = 90$ кА, $H_0 = 15$ кэ, $H = 40$ кэ

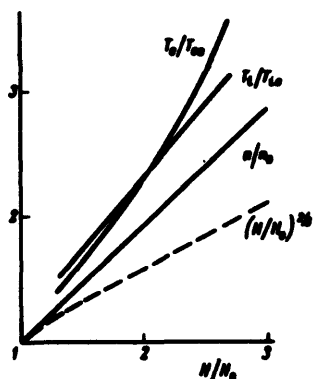


Рис. 2. Зависимости n/n_0 , T_e/T_{e0} и T_i/T_{i0} от отношения H/H_0 (пунктиром проведена кривая $(H/H_0)^{2/3}$)

На рис. 2 нанесены зависимости n/n_0 , T_e/T_{e0} и T_i/T_{i0} от отношения H/H_0 . Пунктиром приведена кривая $(H/H_0)^{2/3}$. Значительное превышение кривых T_e/T_{e0} и T_i/T_{i0} над пунктирной определяется "отрывом" плазмы от стенок, поджатием в распределении тока и появлением антитока. Представляет большой интерес экспериментальная проверка отмеченных эффектов.

Авторы выражают глубокую благодарность акад. Л.А.Арцимовичу, В.С.Стрелкову и Д.П.Иванову за постановку задачи и обсуждение результатов вычислений.

Физический факультет
Московского
государственного университета
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
13 мая 1971 г.

Литература

- [1] Б.Б.Кадамцев. Вопросы теории плазмы. Атомиздат, вып. 5, 1967.
- [2] Y.N.Dnestrovskii, D P Kostomarov, N.L.Pavlova. IV European Conf. on Thermonuclear Reaction and Plasma Physics, Roma, 1970, p.17.
- [3] А.А.Галеев, Р.З.Сагдеев. ЖЭТФ, 53, 348, 1967.
- [4] Л.А.Арцимович. Письма в ЖЭТФ, 13, 105, 1971.