

О ПРЕДЕЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ

А.А.Галеев, Р.З.Сагдеев

Несмотря на всеобщий энтузиазм по поводу длительного удержания плазмы в Токамаке [1] следует иметь в виду, что в проводившихся до сих пор экспериментах речь шла о плазме весьма малого давления ($nT < 0,01 \text{ В}^2/8\pi$) [2]. Каковы же ограничения на давление плазмы в Токамаке? Этот вопрос изучен лишь в рамках магнитной гидродинамики (МГД) (см., например, [1]). В области достаточно высоких температур, где становится существенным разделение частиц плазмы на "запертые" и "пролетные" (именно эта область представляет интерес), МГД не работает. Как известно из [3], минимум "неоклассической" диффузии [4] и турбулентной диффузии вследствие развития неустойчивости запертых частиц [5, 6] находится в следующем интервале частот соударений:

$$1 > \frac{\nu_{ii} a}{\sqrt{2} v_{Ti} \Theta \epsilon^{3/2}} > 0,2 \left(\frac{m_e}{m_i} \right)^{1/3} \frac{T_e}{T_i}, \quad (1)$$

где $\nu_{ii} = 16\sqrt{\pi} n e^4 \lambda / 3 m_i^2 v_{Ti}^3$ - частота соударений и $v_{Ti} = \sqrt{2T_i/m_i}$ - тепловая скорость ионов; $\Theta = B_i/B_0$, B_i - поле собственного тока I , B_0 - тороидальное магнитное поле, a - радиус плазменного шнура, $\epsilon = a/R$ - тороидальное отношение.

В такой разреженной плазме кроме известного тока Пфирша - Шлютера

$$I_{PS} = - \frac{2rc}{B_i R} \frac{dp}{dr} \cos \theta, \quad p = n(T_i + T_e) \quad (2)$$

появляется дополнительный ток, величина которого в конечном счете определяется балансом сил трения, действующих на пролетные электроны со стороны запертых электронов и со стороны ионов [7] (расчет численных коэффициентов см. в [8]):

$$I_{GS} = -0,9 \left(\frac{L}{R} \right)^{1/2} \frac{c}{B_i} \sum T_i \left(1 - 0,17 \frac{d \ln T_i}{d \ln n} - 0,18 \frac{T_e}{T_i} \delta_{ii} \frac{d \ln T_i}{d \ln n} \right) \frac{dn}{dr} \quad (3)$$

Таким образом, дополнительный ток оказывается постоянным вдоль каждой магнитной поверхности и, следовательно, сам дает вклад в магнитное поле тока B_i . По мере нагрева плазмы при $\beta_i = 4\pi r/B_i^2 \epsilon^{-1/2}$ [9] этот ток превосходит индукционный и величина β_i более не растет. При этом распределение плазмы и распределение тока (магнитного поля B_i) связаны уравнением Максвелла

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} r B_i - \frac{4\pi}{c} I_{GS}(r). \quad (4)$$

Здесь мы пренебрегли искажением магнитных поверхностей порядка $O(\epsilon^{1/2})$ из-за наличия тока I_{GS} .

Дальнейшее увеличение давления плазмы быстро приводит к нарушению критерия Крускала – Шафранова

$$q(r) = \frac{B_0}{B_i(r)} \frac{r}{R} > 1. \quad (5)$$

Численные коэффициенты зависят от деталей распределения давления плазмы по сечению шнура. Предельное значение величины $\beta = 4\pi r / B_0^2$, получающееся из подстановки в этот критерий, было подсчитано нами для двух различных распределений давления и тока в случае однородной температуры:

$$1) \rho = \rho_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right), \quad B_i^2 = 0,81 \left(\frac{r}{a}\right)^{5/2} 4\pi \rho_0 \epsilon^{1/2}, \quad q^2(a) = 1,23 \epsilon^{3/2} / \beta > 1,$$

$$2) B_i = B_i(a) \frac{r}{a}, \quad 4\pi \rho = 1,48 B_i^2(a) \left[1 - \left(\frac{r}{a}\right)^{3/2}\right], \quad q^2(a) = 1,48 \epsilon^{3/2} / \beta > 1.$$

В случае неизотермической плазмы ($T_e \gg T_i$) с одинаковым профилем плотности и температуры ($n(r) \sim T_e(r)$) предельное давление увеличивается в три раза.

Заметим, что предельные значения β_i оказываются ниже, чем в модели МГД равновесия (см. [1]).

Институт ядерной физики
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
24 ноября 1970 г.

Литература

- [1] Л.А.Арцимович. Замкнутые плазменные конфигурации, М.-М., Москва, 1969.
- [2] С.В.Мирнов. Письма в ЖЭТФ, 12, 92, 1970.
- [3] А.А.Галеев, Р.З.Сагдеев. ДАН СССР, 180, 839, 1968.
- [4] А.А.Галеев, Р.З.Сагдеев. ЖЭТФ, 53, 348, 1967.
- [5] Б.Б.Кадомцев, О.П.Погуце. ЖЭТФ, 51, 1734, 1966.
- [6] Б.Б.Кадомцев, О.П.Погуце. ДАН СССР, 186, 553, 1969.
- [7] А.А.Галеев, Р.З.Сагдеев. ДАН СССР, 189, 1204, 1969.
- [8] А.А.Галеев. ЖЭТФ, 59, 1378, 1970.
- [9] A.A. Ware. Phys. Rev. Lett., 25, 15, 1970.