

12

И Н С Т И Т У Т  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ И ЯФ 77-107

А.А.Бехтенов, В.И.Волосов

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ В  
АМБИПОЛЯРНОЙ ЛОВУШКЕ

Новосибирск

1977

## ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ В АМБИПОЛЯРНОЙ ЛОВУШКЕ

А.А.Бехтенов, В.И.Волосов

Рассматриваются особенности некоторых неустойчивостей в амбиполярной ловушке, связанные с большими значениями параметров  $T_e/T_i$  и  $L/a$  в этой системе.

Одной из наиболее интересных современных модификаций классической открытой ловушки [1] является амбиполярная ловушка (А.Л.) предложенная в работе [2], а также (несколько позже) в [3]. Ловушка состоит из трёх пробкотронов, причём крайние пробкотроны служат для создания по краям плазмы, заполняющей центральный пробкотрон, достаточно высоких амбиполярных электрических потенциалов. За счёт этих потенциалов время удержания плазмы в центральном пробкотроне существенно возрастает по сравнению с классическим  $\tau_{ii}$ . Энергия ионов в крайних пробкотронах порядка  $\sim 0,5-1,0$  МэВ, в центральном  $\sim 20-50$  КэВ; для электронов, заполняющих всю А.Л.  $T_e \approx 50$  КэВ. Длина центрального пробкотрона ( $L$ ) много больше <sup>длины</sup> крайних пробкотронов, таким образом термоядерная энергия выделяющаяся в нём, может компенсировать потери энергии в крайних ловушках. Некоторые параметры в А.Л. существенно отличаются от аналогичных величин в обычном пробкотроне (температура электронов выше ионной, длина ловушки много больше её радиуса и т.д.), поэтому возникает ряд специфических проблем при исследовании плазмы в А.Л. на устойчивость.

I. Как было показано в [4] электроны в А.Л. могут относительно быстро перемещаться в радиальном направлении (к подоб-

ному перемешиванию может приводить к неустойчивости рассматриваемая ниже). Тогда радиальный амбиполяриный потенциал и радиальное электрическое поле равны соответственно:  $e\varphi = T_e \ln n_0/n$   
 $E_z = T_e / e a_n$ , где  $a_n = (\partial \ln n / \partial z)^{-1}$ ;  
 $T_e$  — температура электронов. (Электрические поля того же порядка могут существовать в А.Л. за счёт изменения по радиусу величины продольного падения потенциала).

Пусть в ловушке имеется поперечная магнитная "яма" ( $\min B$ ) стабилизирующая желобковые колебания, эффективность этой стабилизации характеризуется эквивалентной отрицательной кривизной силовых линий  $\bar{R}$ . Величина  $\bar{R}$  (с учётом плазмы в краевых ловушках) приближенно равна (см. [5])

$(\bar{R})^{-1} = R_0^{-1} + R_k^{-1} (\tau_k \cdot p_k V_k / \tau_0 \cdot p_0 V_0)$   
 где  $R_0, R_k, p_0, p_k, V_0, V_k, \tau_0, \tau_k$  — средняя кривизна силовых линий, давление, объём и радиальный размер плазмы соответственно в центральной и краевой ловушках.

Условие стабилизации желобковых неустойчивостей для низших мод по  $\theta$  в этом случае имеет вид (см. [6,7]):

$$T_i / \bar{R} > M_i (c^2 E_z^2 / H^2) \cdot z^{-1}, \quad (1)$$

или подставляя  $E_z$

$$\left( \frac{\beta_i}{a_n} \right)^2 \left( \frac{T_e}{T_i} \right)^2 \frac{\bar{R}}{2} < 1 \quad (2)$$

где  $\beta_i$  и  $T_i$  — ионный ларморовский радиус и температура. Наиболее трудно выполнить это соотношение по краям плазмы, где на размере порядка нескольких  $\beta_i$  потенциал меняется на величину  $\sim T_e$  или  $a_n \approx A \beta_i$ ; где  $A \geq 1$ . Тогда условие имеет вид:

$$\frac{1}{A^2} \left( \frac{T_e}{T_i} \right)^2 \left( \frac{\bar{R}}{2} \right) < 1 \quad (3)$$

Для А.Л. обычно  $T_e / T_i > 1$  и  $|\bar{R}|/2 \gg 1$  поэтому при  $1 < A^2 < (T_e / T_i)^2 \cdot (|\bar{R}|/2)$  условие (3) не выполняется. Это означает, что существование в А.Л. поперечной магнитной "ямы" (т.е.  $\min B$ ) не достаточно для стабилизации плазмы в центральном пробкотроне (в работе [8] утверждается достаточность этого условия).

Для полного решения задачи о перестановочной неустойчивости следует рассмотреть уравнения учитывающие не только центробежные эффекты но и радиальную структуру плотности и электрических полей [7], численные решения аналогичных задач изучались, например, в работе [9].

Стабилизация колебаний связана в этой задаче в основном с эффектом "конечного ларморовского радиуса"; действие этого эффекта существенно падает при малой плотности ( $\omega_{pi} / \omega_{hi} \sim 1$ ). Дополнительная раскачка колебаний (помимо центробежной неустойчивости) определяется наличием градиентов плотности и электрического поля. Все эти факторы по порядку величины дадут одинаковый вклад в инкремент желобковой неустойчивости; поэтому вопрос о величине инкремента и его знаке существенно зависит от вида функций  $n(z)$  и  $E(z)$ .

2. Другой эффект, который может быть существенным для А.Л., это раскачка низкочастотных дрейфовых колебаний в бесстолкновительном режиме. Поскольку длина А.Л. много больше её поперечных размеров ( $L/a = 100$  для проектируемого реактора типа А.Л.), то нет ограничений для развития этого типа колебаний [6]. Как отмечалось в [10] при  $\beta > 0,1$  эти колебания подавляются и не опасны для А.Л.; однако в процессе накопления плазмы, т.е. при нарастании  $\beta$  от 0 до 0,1, они могут существенно ограничивать

время жизни плазмы и тем самым препятствовать её накоплению при малых токах инжекции. Если предположить, что здесь аналогично замкнутым ловушкам  $\tau_p \approx 10+100 \tau_B$ , где  $\tau_B = 16 a^2 e n / c T_e$ , то необходим ток инжекции ионов свыше  $\sim 10^6$  А для проектов [6,10] и  $\sim 10^3$  А для [II].

Для подавления этих неустойчивостей можно использовать в А.Д. дополнительные винтовые обмотки, создающие перекрещенность силовых линий - шир ( $\theta$ );  $\theta = r^2 \partial (N_r / z N_z) / \partial z$ . Однако это может приводить к усилению "неклассических" эффектов, усиливающих радиальное перемещение частиц.

В заключение авторы выражают благодарность Г.И. Димову, Д.Д. Рютову, М.Е. Кишиневскому за ценные обсуждения.

### Л и т е р а т у р а

1. Г.И. Будкер. "Физика плазмы и проблема УТР", изд. АН СССР, 3, 3, 1958.
2. Г.И. Димов, В.В. Закайдаков, М.Е. Кишиневский. Физика плазмы, 2, 597, 1976.
3. Т.К. Fowler B.G. Logan. Comments on Plasma Phys. and Cont. Fus. 11 (N 6) 167 (1977).
4. Д.Д. Рютов, Г.В. Ступаков. Письма ЖЭТФ, 26, 186, 1977.
5. M. Rosenbluth, S. Longmire. Ann. Phys. 1, 120 (1957).
6. А.Б. Михайловский. Теория плазменных неустойчивостей. М. Атомиздат (1977)
7. M. Rosenbluth, A. Simon. Phys. Fl. 8, 1300 (1965).
8. F.H. Coensgen препринт. LLL-Prop-148 (1977).
9. А.А. Бехтенов, В.И. Волосов, ЖТФ, 47(7), 1450 (1977).
10. Ю.В. Грибов, В.А. Чуянов, Г.Е. Шаталов. Доклад на Всесоюзном совещании по физике плазмы, Звенигород, 1977 г.
- II. Г.И. Димов. Так же (1977 г.)

Работа поступила - I ноября 1977 г.

---

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ

Подписано к печати 2.XI-1977 г. МН 03051

Усл. 0;3 печ.л.; 0;2 учетно-изд.л.

Тираж 150 экз. Бесплатно

Заказ № 107.

---

Отпечатано на ротапринте ИЯФ СО АН СССР