

## О ВОЗМОЖНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ЖЕЛОБКОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ УПРАВЛЯЕМЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

В.А.Чуянов

Как показали эксперименты [1,2], первый мод желобковой неустойчивости плазмы в ловушке с простым пробочным полем может быть подавлен с помощью внешних электродов, потенциалы которых задаются системой обратной связи в соответствии с флуктуациями на поверхности плазмы [3]. Однако данная система стабилизации в принципе не может воздействовать на внутренние моды, нечувствительные к граничным условиям. Для стабилизации таких колебаний необходимо найти метод введения сигнала обратной связи непосредственно в объем плазмы. Так как при желобковых колебаниях фаза возмущения постоянна на силовой линии магнитного поля, для этой цели можно использовать систему электронных пучков, инжектируемых в плазму из запробочного пространства. Интенсивность этих пучков должна изменяться в соответствии с флуктуациями потенциала на соответствующих силовых линиях. (Методы стабилизации дрейфовых колебаний с помощью контролируемых источников электронов, размещенных внутри плазмы, и пучков нейтральных атомов были рассмотрены в [4,5]).

Задача о желобковых колебаниях разреженной плазмы в сильном магнитном поле рассматривалась неоднократно. Наш случай отличается только тем способом, что в уравнении непрерывности для электронов необходимо учесть изменение плотности электронного пучка, т. е. ввести член вида  $(1/e v_b) (\partial j / \partial t)$ , где  $v_b$  – скорость электронов в пучке,  $e$  – заряд электрона,  $j$  – плотность электронного тока. Так как нас особо интересует стабилизация коротковолновых колебаний, рассмотрение удобно провести в квазиклассическом приближении. Пусть холодная плазма, однородная в направлениях  $y$  и  $z$ , помещена в сильное магнитное поле, параллельное оси  $z$ . Пусть плотность плазмы убывает в направлениях оси  $x$ . Для моделирования эффекта кривизны силовых линий введем силу тяжести, направленную вдоль оси  $x$  и приводящую к дрейфу ионов вдоль оси  $y$  со скоростью  $v^*$ . Тогда для малых потенциальных возмущений вида  $f_0 \exp i(k_x x + k_y y - \omega t)$  дисперсионное уравнение будет иметь вид (сравни, например, [6]):

$$-(k_x^2 + k_y^2) \left(1 + \frac{\omega_{oi}^2}{\omega_{Bi}^2}\right) - \frac{i 4 \pi}{\omega v_b} \left(\frac{\partial j / \partial t}{f}\right) = -\frac{\omega_{oi}^2}{\omega_{Bi}} \kappa k_y \left(\frac{1}{\omega} - \frac{1}{\omega + k_y v^*}\right), \quad (1)$$

где  $k_x$  и  $k_y$  – компоненты волнового вектора,  $\omega$  – частота,  $\omega_{oi}$  – ионная плазменная частота,  $\omega_{Bi}$  – ионная циклотронная частота,  $\kappa = \frac{1}{n_0} \left| \frac{dn_0}{dx} \right|$ ,

$n_0$  – плотность плазмы,  $f$  – возмущенный потенциал. Для решения (1) необходимо задать отношение  $(\partial j / \partial t) / f$ . В принципе система обратной связи может управлять величиной  $j(x, y, t)$  в соответствии с измерениями флуктуаций лю-

бой из характеристик плазмы: плотности ионов, плотности электронов, потенциала, электрических полей, так как возмущения всех величин однозначно связаны друг с другом и могут быть "вычислены" системой стабилизации на основании измерений одной из них. Практически, однако, такие преобразования сигналов могут быть связаны со значительными техническими трудностями. В данной работе мы рассмотрим простейший пример: пусть система стабилизации измеряет возмущения потенциала и задает ток электронов по закону:

$$i(x, y, t) = i_0 + \alpha f_0 \exp i(k_x x + k_y y - \omega t), \quad (2)$$

где  $\alpha$  — величина, имеющая размерность проводимости и зависящая от усиления в измерительной системе,  $i_0$  — константа. Если  $\alpha$  не зависит от частоты, то решение (1) — (квадратного уравнения относительно частоты) очевидно. Есть две области устойчивости: при отрицательной обратной связи ( $\alpha > 0$ ), если

$$\alpha > \left[ \frac{4 \omega_{oi}^2 \kappa}{\omega_{Bi}^2 v^*} - (k_x^2 + k_y^2) \left( 1 + \frac{\omega_{oi}^2}{\omega_{Bi}^2} \right) \right] \frac{v_b}{4 \pi} \quad (3)$$

и при положительной обратной связи ( $\alpha < 0$ ), если

$$|\alpha| > (k_x^2 + k_y^2) \left( 1 + \frac{\omega_{oi}^2}{\omega_{Bi}^2} \right) \frac{v_b}{4 \pi}. \quad (4)$$

Отметим, что стабилизирующий эффект отрицательной обратной связи аналогичен известному эффекту закорачивания потенциала возмущения через запробочную плазму вдоль силовых линий магнитного поля.

При наличии зависимости  $\alpha(\omega)$  порядок уравнения (1) повышается. Мы, однако, не будем рассматривать этот случай, так как уравнение (1) с условием (2) в точности совпадает с дисперсионным уравнением для системы стабилизации с внешними электродами и, следовательно, все теоретические и экспериментальные результаты [1–3], полученные для таких систем, в том числе и при  $\partial \alpha / \partial \omega \neq 0$ , применимы и в данном случае.

Величина тока, необходимого для стабилизации ( $i_0$ ), будет определяться уровнем шумов в системе. Для типичной экспериментальной установки (например, для установки Феникс-II [2, 7]) оценка по формуле (4) для первого мода при плотности плазмы  $3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$  и  $v_b \approx 4 \cdot 10^9 \text{ см/сек}$  дает следующее соотношение между полным электронным током через всю систему и амплитудой флуктуаций потенциала:

$$J \text{ (амперы)} = 10^{-1} f_0 \text{ (вольты)}. \quad (5)$$

Вопрос устойчивости самого электронного пучка в данной работе не рассматривается. Отметим, однако, что появление теплового разброса в скоростях электронов в результате неустойчивости, или введенного преднамеренно, не является в данном случае ограничивающим фактором.

Благодарю В.В.Арсенина и Д.А.Панова за обсуждения.

Поступила в редакцию  
4 мая 1970 г.

## Литература

- [1] В.В.Арсенин, В.А.Жильцов, В.А.Чуянов. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, 2, 515, IAEA, Vienna, 1969.
  - [2] M.J.Church, V.A.Chuyanov, E.G.Murphy, M.Petravic, D.R.Sweetman, E.Thompson. Доклад на III европейской конференции по физике плазмы и управляемому синтезу, (Утрехт, 1969).
  - [3] В.В.Арсенин, В.А.Чуянов. ДАН СССР, 180, 1078, 1968.
  - [4] T.C.Simonen, T.K.Chu, H.W.Hendel. Phys. Rev. Lett., 23, 568, 1969.
  - [5] F.F.Chen, H.P.Farth. Nucl. Fusion, 9, 364, 1969.
  - [6] Б.Б.Кадоццев. Турбулентность плазмы. Сб. Вопросы теории плазмы, Атомиздат, 1964, стр. 282.
  - [7] V.Bernstein et. al. Plasma Physics and Centrelled Nuclear Fusion Research, 2, 23, IAEA, Vienna, 1966.
-