

## О возможности стабилизации плазменного шнура с током обратными связями

В. В. АРСЕНИН, В. А. ЧУЯНОВ

УДК 533.951.8

Известно [1], что плазменный шнур с током, удерживаемый собственным магнитным полем, должен быть неустойчив относительно малых отклонений от положения равновесия. Если шнур имеет конечную длину (например, замкнут в тор), то наиболее «опасные» возмущения — перетяжки и извивания — могут быть подавлены наложением достаточно сильного внешнего продольного магнитного поля [2]. При этом условие устойчивости относительно извиваний (критерий Крускала — Шафранова) ограничивает ток в разряде. Предлагалось также [3] стабилизировать шнур путем создания дополнительного магнитного давления, пропорционального смещению границы плазмы. Существенно более простой представляется система, которая управляла бы возмущенными полями вне плазмы и реагировала бы не на смещение, а на одну из компонент переменного магнитного поля у поверхности шнура (это поле связано со смещением довольно сложной функцией, зависящей от волновых чисел). Ниже будет показано, что если использовать кроме внешнего продольного поля такую систему, то условие на ток может быть облегчено.

Рассмотрим простую модель: несжимаемый идеально проводящий шнур радиуса  $a$  с равномерно распределенным по сечению током  $J$  в постоянном (одинаковом внутри и вне плазмы) поле  $H_z$ , направленном по оси цилиндра  $z$ . Введем обозначение  $h = H_z/H_0$ , где  $H_0 = \frac{2J}{ca}$  — поле тока  $J$  на границе плазмы. Пусть  $h > 0,7$ ,

тогда шнур устойчив относительно возмущений, не зависящих от азимутального угла  $\theta$  (перетяжек) [4]. Частота же крупномасштабных ( $|k_z| a \ll 1$ ,  $A(r)$  не имеет внутри плазмы нулей, кроме, может быть, точки  $r=0$ ) возмущений вида  $A(r) \exp(im\theta + ik_z z - i\omega t)$ ,  $m = \pm 1$  определяется выражением [5, 6]

$$\omega^2 = \frac{H_0^2}{4\pi ca^2} \left[ \left(1 + \frac{1}{\varphi}\right) (m + k_z ah)^2 - 2m(m + k_z ah) \right]. \quad (1)$$

Здесь  $\rho$  — плотность плазмы;  $\varphi = -\frac{a}{\psi} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} \Big|_{r=a}$ ;

$\psi$  — потенциал возмущенного магнитного поля ( $\mathbf{H} \sim \nabla \psi$ ) вне плазмы. Он равен  $\psi = BK_1(|k_z|r) + CI_1 \times \times (|k_z|r)$ , где  $K_1$  — функция Макдональда;  $I_1$  — модифицированная функция Бесселя; отношение постоянных  $B$  и  $C$  определяется граничными условиями на наружной поверхности  $r = b$ . В случае свободного ( $b \rightarrow \infty$ )

шнура  $C = 0$ ,  $\psi \approx 1$  и возмущения неустойчивы ( $\omega^2 < 0$ ) при

$$|k_z| ah < 1. \quad (2)$$

Если длина шнура ограничена, то величина  $k_z$  квантована ( $|k_z| = k_{\min} n$ ,  $n = 1, 2, \dots$ ) и критерий устойчивости принимает вид

$$h > (k_{\min} a)^{-1}. \quad (3)$$

Рассмотрим теперь случай, когда с помощью радиотехнической системы из датчиков и усилителей осуществляется следующее «граничное» условие, связывающее радиальные компоненты  $\mathbf{H}$  при  $r = a$  и  $r = b$ :

$$\frac{\partial \psi}{\partial r} \Big|_{r=b} = \delta \frac{\partial \psi}{\partial r} \Big|_{r=a} \quad (4)$$

(коэффициент  $\delta$ , вообще говоря, может быть комплексным и зависеть от  $\omega$ ). Нетрудно убедиться, что при таком условии (с учетом  $|k_z| a \ll 1$ )

$$\varphi = (b^2 - a^2)(b^2 + a^2 - 2b^2\delta)^{-1}. \quad (5)$$

Предположим, что  $\delta < 0$ ,  $|\delta| \gg 1$ . Тогда из выражения (1) легко получить достаточный критерий устойчивости

$$|m + k_z ah| > |\delta|^{-1}. \quad (6)$$

Пусть максимальное значение  $|k_z|$ , к которому чувствительна система обратных связей\*, равно  $k_{\max} \equiv k_{\min} l$  и

$$(l+1)^{-1} < k_{\min} ah < l^{-1}. \quad (7)$$

Правое неравенство (7) обеспечивает выполнение условия (6) для  $|k_z| \leq k_{\max}$ , а левое, согласно выражению (2), означает устойчивость волн с  $|k_z| > k_{\max}$ . Таким образом, шнур оказывается устойчивым относительно извиваний при поле  $H_z$  в  $s$  ( $l < s < l+1$ ) раз меньше того, которое необходимо согласно условию Крускала — Шафранова (3).

Аналогичные результаты можно получить для вышних ( $|m| \geq 2$ ) мод. Заметим, однако, что характер частотного спектра этих мод в отличие от первой существенно зависит от распределения тока по сечению (чувствителен к выбору модели). Во всяком случае, система обратных связей не ухудшает устойчивости таких возмущений, поскольку, очевидно, при  $\delta < 0$ ,

\* Это «обрезание» по  $k_z$  достигается автоматически в системе с конечным числом элементов.

$|\delta| \gg 1$  она осуществляет граничные условия, эквивалентные присутствию идеально проводящего кожуха вблизи поверхности плазмы.

Благодарим В. Д. Шафранова за обсуждение.

Поступило в редакцию 11/III 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Арцимович. Управляемые термоядерные реакции. М., Физматгиз, 1961.

2. В. Д. Шафранов. «Атомная энергия», 5, 38 (1956).  
 3. А. И. Морозов, Л. С. Соловьев. ЖТФ, 34, 1566 (1964).  
 4. Т. Ф. Волков. В сб. «Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций». Т. 2. М., Атомиздат, 1958, стр. 144.  
 5. R. Taylor. Proc. Phys. Soc., B70, 1049 (1957).  
 6. В. Д. Шафранов. В сб. «Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций». Т. 4. М., Атомиздат, 1958, стр. 61.

## Электростатический ускоритель Физико-технического института АН УССР на 4,5 Мэв и его использование в ядерных экспериментах

А. А. Цыгикало, С. П. Цытко

Работы по конструированию и созданию электростатических ускорителей (ЭСУ) для ядерных исследований были начаты в Физико-техническом институте АН УССР (ФТИ АН УССР) еще в начале 30-х годов, когда под руководством К. Д. Синельникова и А. К. Вальтера был сооружен первый в Советском Союзе гигантский ЭСУ в воздушной среде на 4 Мэв. В середине 40-х годов в Институте были начаты работы по созданию новых, более совершенных ЭСУ, работающих в атмосфере сжатого газа. Было изготовлено несколько малых серий ЭСУ горизонтального типа, предназначенных как для инжекции частиц в более мощные линейные и циклические ускорители, так и для обычных ядерных исследований. В 1953—1954 гг. закончилось сооружение двух ЭСУ вертикального типа на энергию 4,0—4,5 Мэв [1], предназначенных для прецизионных ядерных исследований. Техническая документация была передана в Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры (Ленинград) для серийного промышленного изготовления [2].

Почти все изготовленные в институте ЭСУ были переданы другим институтам и учреждениям Советского Союза.

Цель данного сообщения — дать краткую информацию о вертикальном ЭСУ на 4,5 Мэв и об экспериментальных ядерных исследованиях, выполненных на нем за последние годы.

Вертикальный электростатический ускоритель ФТИ АН УССР рассчитан на энергию 4,5 Мэв, работает в сжатом газе и предназначен для прецизионных работ. Он отличается от всех других конструкций ЭСУ наличием специальной системы обратной связи для стабилизации энергии частиц с несколько необычным использованием двух ускорительных трубок, работающих одновременно. В одной из трубок (измерительной) ускоряется протонный пучок малой интенсивности (3—5 мкА), служащий для измерения и стабилизации энергии частиц. В другой — ускоряется «рабочий» пучок ионов, направляемый на мишень (рис. 1). На выходе измерительной трубки установлен электростатический анализатор с радиусом отклоняющих пластин  $R = 1500 \pm 0,01$  мм и с зазором между ними  $d = 5 \pm 0,002$  мм, служащий для измерения энергии частиц и стабилизации. Моноэнергетичность пучка ускоренных частиц  $\Delta E/E = \pm 0,05\%$ . Интенсивность пучка

УДК 621.384.653:539.17:53.087.4

Рис. 1. Схема прецизионного электростатического ускорителя на 4,5 Мэв ФТИ АН УССР:

1 — прокладка из бериллия; 2 — электронная пушка; 3 — магнит, отклоняющий пучок ( $2-3^\circ$ ); 4 — электростатический стабилизатор; 5 — к схеме стабилизации напряжения; 6 — мишень; 7 — полюса магнита (в действительности плоскость полюсов магнита составляет  $90^\circ$  с плоскостью электростатического анализатора).

