

О СПЕКТРЕ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ,  
ВОЗБУЖДАЕМОЙ ПУЧКОМ В ОГРАНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ

В. А. Куценко, В. Д. Долале, А. А. Рухадзе

УДК 533.95

Рассмотрена неустойчивая поверхностная волна в незамкнутом плазменном цилиндре, помещенном в металлический волновод. Определена зависимость частоты колебаний от отношения радиуса волновода к радиусу плазмы.

В плазменном цилиндре со свободной поверхностью наряду с объемными электромагнитными волнами возможно существование также и поверхностных волн, если только плазма является достаточно плотной, так что ленгмювская частота электронов плазмы намного превосходит их ларморовскую частоту в удерживающем плазму магнитном поле ( $\omega_{Le} > \Omega_e$ ). Среди различных ветвей колебаний плазменного цилиндра особый интерес представляют аксиально симметричные моды поверхностных волн с фазовой скоростью меньше скорости света. Как показано в /1/, спектр таких колебаний сильно отличается от спектра частот объемных колебаний и несимметричных мод поверхностных волн, и поэтому можно указать условия, когда электронный пучок будет возбуждать только симметричную моду поверхностных волн в плазме (например, при обдуве плазменного цилиндра трубчатым электронным пучком /2/), осуществляя тем самым одномодовую генерацию в системе плазма-пучок. Кроме того, частота симметричной моды поверхностных волн может быть значительно меньше плазменной частоты, а поэтому при инъекции электронного пучка в ограниченную плазму в определенных условиях должны индуцироваться низкочастотные поля и токи, сопутствующие пучку и простирающиеся на большие расстояния от переднего фронта пучка /3/.

Поскольку поверхностные колебания отсутствуют в плазме, полностью заполняющей металлический волновод, то при стремлении ра-

диуса волновода к радиусу плазмы,  $R = r_0$ , спектр поверхностных волн должен исчезнуть. Поэтому при  $R = r_0$  невозможно существование и указанных выше эффектов, обусловленных симметричной модой поверхностных колебаний. В связи с этим мы попытались подробно проанализировать спектр симметричной моды поверхностных волн при конечных значениях  $R/r_0$  и при условии  $\omega = k_z u$ ; этому условию удовлетворяют как возбуждаемые электронным пучком колебания в плазме, так и индуцированные поля и токи, возникающие при инжекции электронного пучка в плазму.

Дисперсионное уравнение для аксиально симметричной моды поверхностной волны при конечном значении  $R/r_0$  имеет следующий вид:

$$\frac{1}{x_2} I_0(x_1 r_0) K_1(x_2 r_0) + \frac{\epsilon}{x_1} I_1(x_1 r_0) + \frac{K_0(x_2 R)}{I_0(x_2 R)} \left[ \frac{1}{x_2} I_0(x_1 r_0) I_1(x_2 r_0) - \frac{\epsilon}{x_1} I_0(x_2 r_0) I_1(x_1 r_0) \right] = 0, \quad (1)$$

где  $x_1^2 = k_z^2 - \omega^2 \epsilon / c^2$ ,  $x_2^2 = k_z^2 - \omega^2 / c^2$ ,  $\epsilon = 1 - \omega_{Le}^2 / \omega^2$  (все обозначения заимствованы с работы [1]). Полагая  $\omega = k_z u \ll u y / r_0$ , для плазменного цилиндра со свободной поверхностью ( $R/r_0 \rightarrow \infty$ ) находим

$$\omega = \frac{u y}{r_0} \exp \left\{ -\beta^2 \gamma^2 \frac{1}{x} \frac{I_0(x)}{I_1(x)} \right\}, \quad (2)$$

где  $\beta = u/c$ ,  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ , а  $x = \omega_{Le} r_0 / c$ . Спектр этот существует только при условии

$$\beta^2 \gamma^2 \gg \frac{x I_1(x)}{I_0(x)}, \quad (3)$$

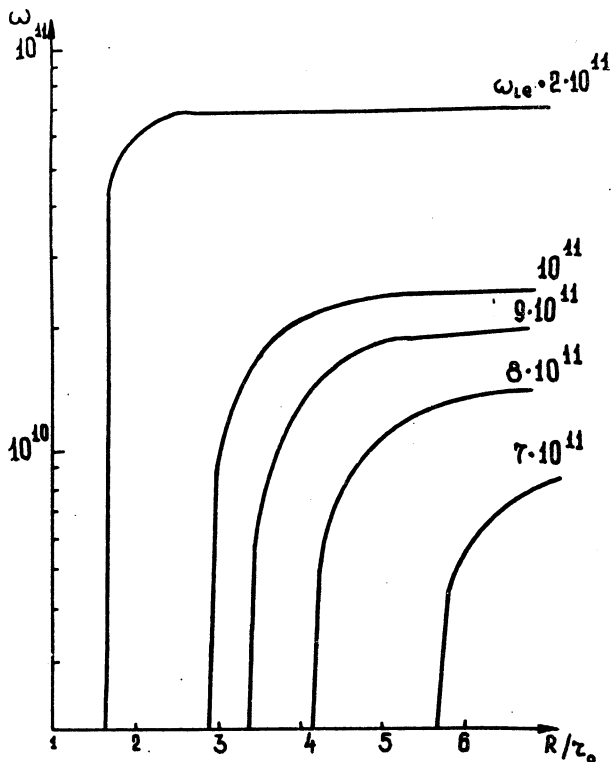
когда экспонента в формуле (2) является малой.

С уменьшением  $R/r_0$  частота колебаний, согласно дисперсионному уравнению (1), уменьшается и при

$$R = R_0 = r_0 \exp \left\{ \beta^2 \gamma^2 \frac{1}{x} \frac{I_0(x)}{I_1(x)} \right\} \quad (4)$$

обращается в нуль. При  $R < R_0$  дисперсионное уравнение решений не имеет.

Таким образом, аксиально симметричные поверхностные колебания возможны только при условии  $R > R_0$ . Это легко понять, ес-



Р и с. I. Графики функции  $\omega = \omega(R/r)$  при  $r_0 = 1$  см,  $\gamma = 2$  и различных значениях  $\omega_{Le}$ .

ли учесть, что поле волны вне плазменного цилиндра описывается функцией  $K_0(2_2 r_0) = K_0(\omega r / u \gamma)$ , и при  $r > \gamma u / \omega = R_0$  оно экспоненциально мало. Поэтому влияние металлических стенок волновода при  $R > R_0$  должно быть малосущественным, а спектр колебаний должен совпадать со спектром (2).

Наконец, отметим, что согласно соотношению

$$\omega = \gamma u / R_0 \quad (5)$$

чем больше радиус волновода, тем меньше может быть частота аксиально симметричных мод поверхностных колебаний. Поэтому появление низкочастотных индуцированных полей в плазме при инжекции электронного пучка следует ожидать только при достаточно больших радиусах волновода.

Для того, чтобы более точно определить влияние конечного радиуса волновода на спектр колебаний плазменного цилиндра при  $R \rightarrow R_0$ , уравнение (I) решалось на ЭВМ при различных значениях  $r_0$ ,  $\gamma$ ,  $\omega_{Le}$ . Результаты численного решения приведены на рис. I в виде графика функции  $\omega = \omega(R/r_0)$ . Видно, что при  $R > R_0$  частота колебаний практически не зависит от  $R$  и при  $R \rightarrow R_0$  резко обращается в нуль в полном соответствии с проведенным выше качественным анализом.

Поступила в редакцию

12 июля 1973 г.

#### Л и т е р а т у р а

1. Б. И. Аронов, Л. С. Богданкевич, А. А. Рухадзе. ЖЭТФ, **43**, 716 (1973).
2. О. В. Долженко, В. П. Зосимов, А. А. Рухадзе. ЖТФ (в печати).
3. С. Е. Росинский, Е. Д. Ростомян, А. А. Рухадзе, В. Г. Рухлин. ЖТФ (в печати).