

01;04

## ОБ УСЛОВИЯХ СТАБИЛИЗАЦИИ МИКРОНЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ЛОВУШКЕ ГАММА-10

© А.Н.Лятов, В.И.Хвесюк

Успешные эксперименты на открытых ловушках ГАММА-10 и НІЕІ [1] стимулировали интерес к теоретическому анализу свойств плазмы открытых систем. Представляется необходимым провести анализ кинетических микроустойчивостей, в частности Альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости (АИЦН) с частотой  $\omega \leq \Omega_{ci}$  (где  $\Omega_{ci}$  — циклотронная частота ионов) с учетом реальных размеров системы удержания. АИЦН наблюдалась во многих экспериментах (ТМХ, ТМХ-У, ГАММА-10) [2,3] и является характерной для амбиполярных ловушек. Источником неустойчивости служит, очевидно, неравновесность ионной функции распределения, вызванная либо инжекцией в барьерные ячейки (ТМХ), либо ИЦР нагревом плазмы в центральной секции (ГАММА-10). В эксперименте [3] действительно наблюдалась анизотропия ионной температуры: поперечная температура  $T_{\perp} = 3$  кэВ, продольная температура  $T_{\parallel} = 0.3$  кэВ и неустойчивость Альфвеновских колебаний.

### Математическая модель

Используемая математическая модель основана на кинетическом описании электромагнитных колебаний бесконечной цилиндрической замагниченной плазмы радиуса  $r_p$  и позволяет рассчитывать для произвольной отдельно взятой моды с заданными азимутальным ( $m$ ) и радиальным ( $n$ ) волновыми числами радиальную зависимость  $E(r)$  и инкремент нарастания колебаний. В расчетах учитываются конечные размеры области удержания: радиус плазмы — 10 см, радиус диафрагмы — 18 см. Все параметры плазмы соответствуют экспериментально наблюдавшимся в эксперименте [3]. Используемая модель является полностью численной модификацией метода [4]. Функция распределения ионов выбиралась двумаквелловской  $f(T_{\parallel}, T_{\perp})$ , а электронов — максвелловская с температурой  $T_e = 1$  кэВ [3]. Концентрация плазмы  $n_{e0} = 1.8 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>. После определения линейных инкрементов нарастания колебаний проводились

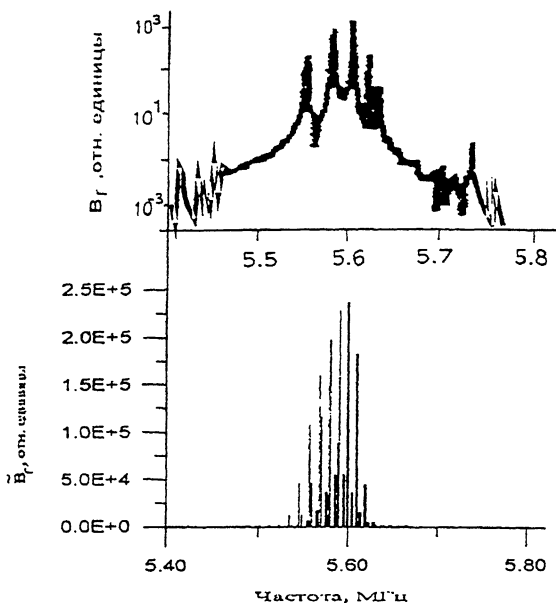


Рис. 1. Сравнение экспериментального (верхний) и расчетного спектров Альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости в установке GAMMA-10.

квазилинейные вычисления по модели Сагдеева [5]. Это позволяло рассчитать частотный спектр относительных амплитуд и, сравнивая его с экспериментальным, определить, какие именно моды детектировались в эксперименте. Такое сравнение проведено на рис. 1. На верхнем графике показан экспериментальный спектр относительных амплитуд колебаний АИЦН [3], на нижнем — расчетный спектр. Видно хорошее совпадение с экспериментом, включая частотный диапазон, дискретную структуру спектра и порядок величин амплитуд. Обнаружено, что наиболее неустойчива мода  $A_{-1,0}$  ( $m = -1$ ,  $n = 0$ ), что совпадает с экспериментальными данными [3]. Весь анализ границ устойчивости был проведен именно для этой моды.

### Влияние анизотропии температур

Обнаружено, что граница устойчивости отличается от значений, предсказываемых теорией для неограниченной плазмы [6]. Граница устойчивости в пространстве  $T_{\parallel}/T_{\perp} :: T_{\perp}$  показана на рис. 2 (нижняя кривая). Область под кривой соответствует неустойчивым режимам. Так как

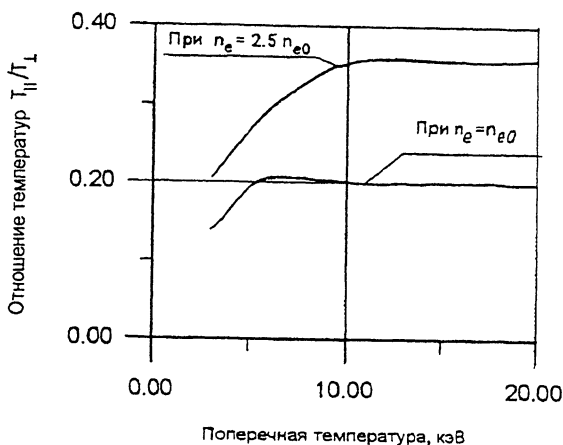


Рис. 2. Граница устойчивости плазмы в установке GAMMA-10 по отношению к раскачке Альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости.

$T_{\parallel}$  определяется удерживающим потенциалом в барьерной ячейке, полученный результат означает отсутствие необходимости повышения потенциальных барьеров до уровня, при котором ионы будут полностью максвеллизированы. Для параметров GAMMA-10 достаточно достичь уровня, при котором  $T_{\parallel} \approx 0.2T_{\perp}$ .

### Влияние плотности плазмы

Одна из основных проблем, стоящих в экспериментах на амбиполярных ловушках — это низкая плотность плазмы. Выяснено, что инкремент АИЦН резко возрастает с увеличением концентрации. Так, при увеличении  $n_{e0}$  в 2.5 раза, инкремент самой неустойчивой моды вырастает на порядок (с  $2.5 \cdot 10^{-3} \Omega_{ci}$  до  $1.5 \cdot 10^{-2} \Omega_{ci}$ ). Одновременно удваивается ширина частотного диапазона (от 5.3–5.6 МГц до 5.0–5.6 МГц), и пиковое значение амплитуды в спектре смещается в область меньших частот (с 5.53 до 5.35 МГц). Граница устойчивости смещается в область более высоких значений  $T_{\parallel}$  (рис. 2, верхняя кривая).

Полученные результаты позволяют предположить, что неразрушающая АИЦН частично ограничивает сверху плотность плазмы в эксперименте. Попытка повысить плотность плазмы приводит к резкому росту инкрементов АИЦН, как следствие увеличивается скорость квазилинейной релаксации (диффузии в пространстве скоростей), приводящей к снижению  $T_{\perp}$  до уровня, при котором рост ам-

плитуды колебаний прекращается. При этом из-за уменьшения поперечной компоненты скорости возрастает уход частиц в конус потерь и концентрация плазмы снижается. Таким образом, необходимым условием увеличения концентрации в эксперименте является повышение удерживающего потенциала барьера до уровня, обеспечивающего подавление АИЦН.

### Список литературы

- [1] *Tamano T.* // Transactions of Fusion Technology. 1995. V. 27. P. 111-117.
- [2] *Smith G.R., Casper T.A., Gerver M.J.* // Nuclear Fusion. 1983. V. 23. P. 1381-1394.
- [3] *Ichimura M.* et al. In Proc. of Intern. Conf. on Open Plasma Confinement Systems for Fusion, Novosibirsk, Russia, 14-18 June 1993. World Scientific, Singapore. 1993. P. 69-78.
- [4] *Ho S.K., Nevins W., Smith G., Miley G.* // Phys. Fluids. 1988. V. 31. P. 1656-1672.
- [5] *Сагдеев Р.З., Галеев А.А.* Нелинейная теория плазмы. В сб.: Вопросы теории плазмы / Под ред. М.А. Леонтовича. Вып. 7. М.: Атомиздат, 1973. С. 3-146.
- [6] *Сагдеев Р.З.* // ЖЭТФ. 1961. Т. 39. В. 1(7). С. 181-184.

Поступило в Редакцию  
30 мая 1996 г.

