

О ВЛИЯНИИ ДРЕЙФОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ИОННУЮ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПЛАЗМЫ

*А.С.Бакай, В.С.Войцень, А.Ю.Волошко,
С.И.Солодовченко, А.Ф.Штань*

Показано, что дрейфовые колебания вызывают повышенный перенос быстрых ионов, который в случае немаксвелловской функции распределения может приводить к аномальной ионной теплопроводности.

1. В последнее время широко обсуждаются механизмы аномального переноса энергии плазмы в тороидальных ловушках, связанные с плазменными колебаниями. При этом основное внимание уделяется аномальному переносу по электронному каналу. В настоящем сообщении обращается внимание на то, что колебания плазмы дрейфового типа могут приводить к аномальному переносу быстрых ионов.

Как известно, (например, [1]) дрейфовые волны в тороидальных ловушках раскачиваются на градиенте давления в окрестности резонансных поверхностей. При этом ширина области локализации колебаний по радиусу, $\Delta \sim \rho_i / \theta$ (θ – шир, ρ_i – ларморовский ионный радиус), определяется тем, что на этом расстоянии от резонансной поверхности продольная (по магнитному полю) фазовая скорость дрейфовой волны становится порядка тепловой скорости ионов, и волна затухает. Если v_ϕ – средняя продольная фазовая скорость волны, а ϕ_0 – ее амплитуда, то ионы, для которых

$$|v_{\parallel i} - v_\phi| < \sqrt{\frac{Ze\phi_0}{M_i}} \quad (1)$$

($v_{\parallel i}$ – скорость иона, M_i – его масса, Z – заряд) резонансным образом взаимодействуют с волной, и двигаются вдоль магнитных силовых

линий со средней фазовой скоростью $\bar{v} \approx v_{\phi}$. При этом они совершают поперечный дрейф, $v_{\perp} \approx c \nabla_{\perp} \phi / B$, в поле волны, причем поперечные линии тока близки к эквипотенциалам. Таким образом, дрейфовая волна порождает подвижные конвективные ячейки для резонансных ионов.

Конвективный перенос этих ионов может происходить на характерные расстояния l_k гораздо большие, чем Δ — при наличии корреляции поля и пространственного упорядочения конвективных ячеек, возникающего на нелинейной стадии развития дрейфовой неустойчивости. В этом случае коэффициент переноса определяется выражением [2]: $D_{\perp} \approx l_k \frac{c \nabla \phi_0}{B}$.

Для максвелловского распределения количество ионов, находящихся в резонансе с дрейфовой волной, экспоненциально мало ($v_{\phi} \gg v_{Ti}$). Однако, при нейтральной инжекции или ВЧ нагреве доля быстрых ионов, подверженных влиянию дрейфовых волн, — увеличится, что приведет к дополнительным потерям энергии из плазмы.

2. Описанный механизм переноса быстрых ионов обнаруживается на стеллараторе "Сатурн" в аргонной плазме СВЧ разряда ($n_e \approx 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $n_0 < 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $T_e \approx 6 \text{ эВ}$, $T_i \approx 0,3 \text{ эВ}$). В этих условиях на градиенте плотности наблюдались дрейфовые колебания с частотой $\sim 4 \text{ кгц}$ и уровнем $\langle \tilde{n}^2 \rangle^{1/2} / \bar{n} \gtrsim 20\%$ [3].

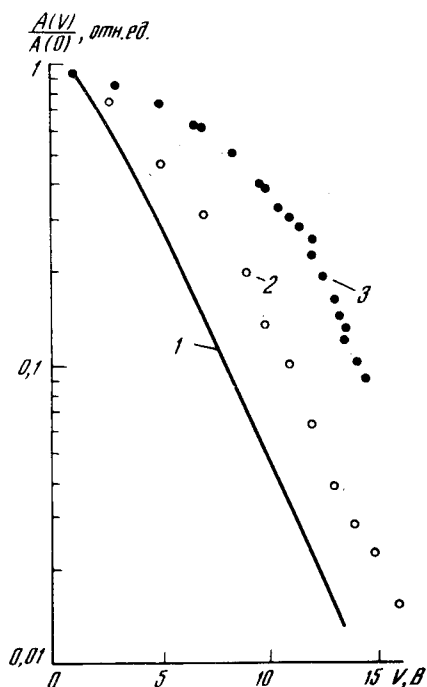


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики зонда

Распределения ионов по энергиям измерялись при помощи специального зонда [4]. На рис. 1 вместе с его вольт-амперной характеристикой (кривая 1), рассчитанной для максвелловского распределения, приведены характеристики, полученные на радиусах 3 и 6 см (кривые

2 и 3, соответственно). На рис. 2 представлена зависимость от радиуса относительной величины потока ионов, энергии которых $\gtrsim 8$ эВ (темные точки). Данные обоих рисунков свидетельствуют о непрерывном увеличении с радиусом доли быстрых ионов ($v_i \gg v_{Ti}$).

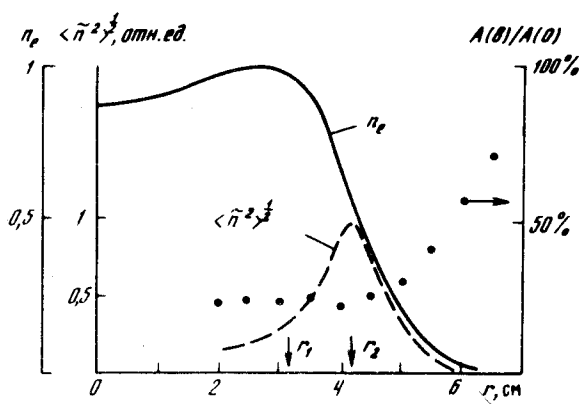


Рис. 2. Радиальные распределения: — плотности плазмы, --- флуктуаций плотности; ● — относительной величины потока ионов с энергией $\gtrsim 8$ эВ

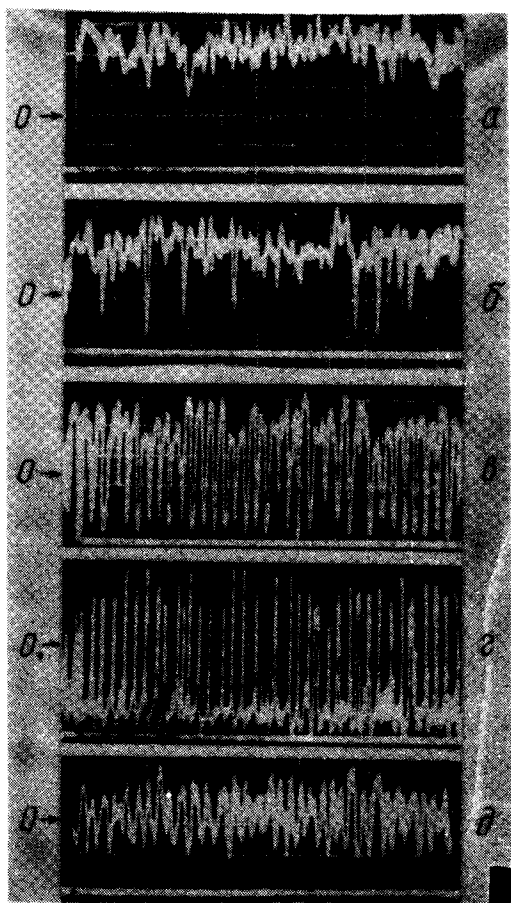


Рис. 3. Осциллограммы: а — i — ионного тока на коллектор, б — ионного тока насыщения ленгмюровского зонда

Было замечено также, что перемещение зонда через область с максимальным уровнем дрейфовых колебаний сопровождается существенным изменением временного поведения ионного тока на коллектор, рис. 3. Во внутренней области объема удержания, $r < r_1$ (см. рис. 2), наблюдаются незначительные флуктуации, рис. 3, а, отражающие низкий уровень колебаний плотности плазмы в этом месте. В области градиента плотности, $r > r_1$, модуляция ионного тока резко возрастает, достигая $\sim 100\%$, причем для $r_1 < r < r_2$ она соответствует "провалам", рис. 3, б, в ($r_0 < r_0$), а во внешних областях плазмы, $r > r_2$, — "всплескам", рис. 3, в. Во всех случаях частота модуляции определяется частотой дрейфовых колебаний, как показывает сравнение временного хода тока "горячих" ионов (рис. 3, а — в) и сигнала ионного тока насыщения ленгмюровского зонда (рис. 3, д).

3. Изложенные результаты экспериментов, по нашему мнению, соответствуют описанному в п. 1 механизму переноса ионов дрейфовой волной. Оценка величины радиального смещения иона в поле волны за период колебаний дает: $l_r \gtrsim 1$ см, что сравнимо с размером неоднородности плазмы, $l_n = \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dr} \right)^{-1} \approx 1,5$ см. Таким образом, в условиях настоящего эксперимента имеет место конвективный перенос резонансных ионов в дрейфовой волне.

Этот механизм потерь энергии по ионному каналу может стать существенным, когда в результате дополнительного нагрева плазмы образуются "хвосты" горячих ионов. Действительно, на токамаке TFR увеличение аномалии ионной теплопроводности при нейтральной инжекции сопровождалось усилением дрейфовых колебаний [5, 6]. К сожалению, эти и полученные на других установках [7, 8] данные не являются достаточно полными и не позволяют провести оценки вклада указанного механизма переноса в потери энергии по ионному каналу.

Физико-технический институт
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
25 октября 1978 г.

Литература

- [1] Б.Б.Кадомцев, О.П.Погуце. Кн. Вопросы теории плазмы, т. 5, М., 1976.
- [2] А.С.Бакай. IAEA, Innsbruck, 1978, paper CN-37-X-4-2.
- [3] V.S.Voitsenya et al. Nucl. Fusion, 17, 651, 1977.
- [4] R.W.Motley, T.Kawabe. Phys. Fluids, 14, 1019, 1971.
- [5] Equipe TFR. Nucl. Fusion, 18, 1271, 1978.
- [6] Equipe TFR. IAEA, Berchtesgaden, 1, 35, 1976.
- [7] E.Mazzuckato. Phys. Fluids, 21, 1063, 1978.
- [8] D.Grove et al. IAEA, Berchtesgaden, 1, 21, 1976.