

НЕУСТОЙЧИВЫЕ СОСТОЯНИЯ ПЛАЗМЫ В ЛОВУШКЕ
С КОМБИНИРОВАННЫМ ПОЛЕМ

К.Т.Байбородов, К.В.Готт, М.С.Иоффе,
Е.Е.Климанов

На Калэмской конференции в докладе об экспериментах по накоплению плазмы с горячими ионами на установке ПР-5 [1] сообщалось, что при определенных условиях инжекции в ловушке с комбинированным полем (типа "минимум В") наблюдаются отчетливо неустойчивые состояния плазмы. Характерной чертой таких состояний является то, что они возникают спонтанно, спустя длительное время после прекращения инжекции, в период свободного распада плазмы с перезарядкой. Неустойчивость обнаруживается по быстрому уменьшению плотности, имеюще-

му вид резкого скачка или сброса (рис.1); в более редких случаях в одном цикле распада появляются несколько сбросов, следующих друг за другом.

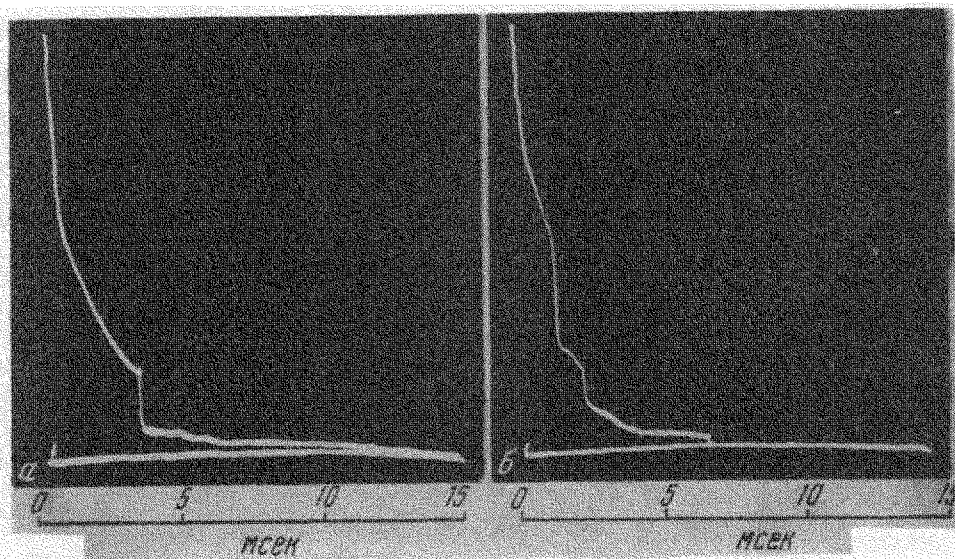


Рис. 1. Осциллограммы потока нейтральных частиц, обусловленных перезарядкой, иллюстрирующие сбросы плотности во время распада плазмы: а - одиночный сброс, б - случай трех последовательных сбросов

Параметры плазмы и экспериментальные условия, в которых наблюдается такая неустойчивость, изложены в [1]. В настоящей заметке приводятся сведения, полученные при более детальном исследовании этого явления, и указывается возможное истолкование физической природы неустойчивости.

1. Установлено, что каждый сброс плотности (рис.2,а) (см. вклейку) сопровождается появлением высокочастотных полей в плазме. Петлевая антенна, установленная вблизи стенки ловушки, регистрирует вспышку электромагнитного излучения, спектр которого состоит из ионно-циклотронной частоты и ее гармоник (рис.2,г); частота отвечает величине магнитного поля в центральной области ловушки. Длительность вспышки, так же как и длительность самого сброса, составляет 15-20 мксек.

2. Другой факт, тесно связанный с рассматриваемой неустойчивостью, состоит в изменении энергетического состава ионов в плазме. За время сброса часть ионов ускоряется в поперечном направ-

лении до больших энергий, измеряемых десятками кэв. На рис. 2, в приводится в качестве иллюстрации осциллограмма потока нейтральных атомов, возникших от перезарядки и обладающих энергией 36 кэв. Видно, что в начале распада плазмы ионы такой энергии отсутствуют, и их появление точно совпадает с моментом скачка. (Энергии 40 кэв отвечают ларморовские орбиты протонов с диаметром, равным радиусу вакуумной камеры. По условиям коллимации потока продуктов перезарядки, попадающих в спектрометр, протоны больших энергий в этих экспериментах не могли регистрироваться.

3. Для непосредственного обнаружения потерь плазмы во время сбросов и выяснения локализации этих потерь проводились измерения потока частиц из плазмы на стенки камеры. На внутренней поверхности камеры было установлено 26 пластинчатых электродов, с помощью которых можно было регистрировать ток ионов на различные элементы стенок, окружающих плазму. Измерения показали, что синхронно со скачками плотности наблюдаются кратковременные выбросы частиц как в торцы ловушки, так и на боковую стенку (рис. 2, б). Из сравнения величины сигналов на различных электродах следует, что потери происходят в основном вдоль силовых линий суммарного магнитного поля через торцевые и радиальные пробки.

Совокупность приведенных данных показывает, что скачки плотности вызываются кратковременной вспышкой неустойчивости ионно-циклотронного типа. Об этом свидетельствует как частотный спектр возникающих переменных полей, так и появление группы ионов, ускоренных до больших энергий в поперечном направлении. Ускорение ионов происходит, очевидно, резонансным образом в полях циклотронной частоты, возникающих в плазме, и в этом отношении оно вполне аналогично тому, которое наблюдается в ловушках с внешней инжекцией при возбуждении анизотропной циклотронной неустойчивости Харриса [2, 3].

Михайловский [4] указал на возможность интерпретации описываемого явления, как циклотронной неустойчивости, обусловленной неравновесностью функции распределения ионов по энергиям поперечного движения $f(\mathcal{E}_\perp)$. Показано, что при плотностях плазмы в интервале

$(m_e/m_i)^{2/3} < c^2/c_A^2 < (\alpha/\rho_i)^{3/2}$ (c_A - альфвеновская скорость, α - размер градиента плотности, ρ_i - ларморовский радиус ионов) неустойчивость колебаний с частотой $\omega \approx \omega_{Hi}$ вызывается не анизотропией скоростей ионов и не дрейфовыми потоками, а отклонением $f(\mathcal{E}_i)$ от максвелловского распределения (наличием в функции распределения участка с $\partial f/\partial \mathcal{E}_i > 0$).

Это обстоятельство отмечается также в работе [5]. Наличие скачка объясняется с этой точки зрения тем, что при заданной длине плазмы L наиболее неустойчивые волны с $\lambda_i \sim \rho_i$ могут возбуждаться лишь начиная с достаточно малой плотности плазмы, определяемой соотношением:

$$\frac{4\pi n T_i}{H^2} \leq 4 \frac{m_e}{m_i} \frac{\omega^2}{c^2} L^2.$$

Когда плазма в процессе распада уменьшает свою плотность до такой величины, возникает неустойчивость.

Параметры плазмы в наших экспериментах удовлетворяют указанному соотношению ($L = 75$ см, $T_i \approx 1$ кэВ, $H = 3000$ э, $n \approx (0,5 \pm 1,0) \cdot 10^{10}$ см⁻³).

В заключение отметим, что скачки плотности в распадающейся плазме, внешне похожие на описанные в настоящей работе, наблюдаются также и в плазме с горячими электронами [6, 7]. В этом случае неустойчивость развивается на электронно-циклотронных частотах.

Поступило в редакцию

2 декабря 1965 г.

Литература

- [1] Ю.В.Готт, М.С.Иоффе, Е.Е.Климанов, Докл. на Калэмской конф., CN -21/143, 1965.
- [2] W. Bernstein, E.G. Murthy, M. Petavic, D.R. Sweetman. Nature, 206, 812, 1965.
- [3] Л.И.Артеменков и др., Докл. на Калэмской конф., CN -21/238, 1965.
- [4] А.Б.Михайловский. Ядерный синтез, 5, 125, 1965.

- [5] M.N. Rosenbluth, R.P. Post. *Phys. Fluids*, 8, 547, 1965.
- [6] W.A. Perkins, W.L. Barr. Докл. на Калэмской конф., CN -21/93,
1965.
- [7] В.В.Аликаев, В.М.Глаголев, С.А.Морозов, Докл. на Калэмской конф.,
CN -21/140, 1965.