

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В ПЛАЗМЕ

Д. П. Захаров, А. С. Кимсен, А. Г. Плахов

Явление нелинейной стабилизации неустойчивости пучков в плазме впервые исследовалось теоретически в работе Шапиро и Цытовича [1]. Было показано, что нелинейная перекачка шумов по спектру может привести к их эффективному уходу из области фазового пространства, соответствующей черенковскому резонансу волн и частиц пучка. В результате квазилинейная релаксация пучка или вообще не имеет места, или происходит гораздо медленнее, чем можно было бы ожидать, исходя из оценок линейной теории; соответственно возрастает длина торможения пучка в плазме.

В условиях большинства плазменно-пучковых экспериментов главным нелинейным процессом является рассеяние ленгмюровских волн на ионах плазмы. Заметим, что индуцированное рассеяние в условиях слабой турбулентности до сих пор не наблюдалось экспериментально — имеется лишь ряд эффектов, которые можно объяснить с помощью такого процесса.

В наших экспериментах можно считать выполненным условие

$$\frac{\epsilon}{T_e} \ll \frac{M}{m} \frac{T_e}{T_i}, \quad (1)$$

где ϵ — энергия частиц пучка, прочие обозначения общепринятые. При условии (1) главный нелинейный эффект — рассеяние волн на ионах — приводит к отражению волны с незначительной потерей импульса [2]:

$$\vec{k}' = -\vec{k}(1 - \delta) \quad (2)$$

$$\delta \sim \sqrt{\frac{m T_i}{M T_e}} \frac{\epsilon}{T_e} \ll 1.$$

Порядок величины нелинейного инкремента в этих условиях:

$$\gamma_H \sim \omega_{oe} \frac{W}{n T} \quad (3)$$

где W — интегральная плотность энергии шумов. Если нелинейный инкремент (3) превышает характерный линейный инкремент $\gamma_1 \sim \omega_{oe} \frac{n'}{n} \frac{\epsilon}{\Delta\epsilon}$, где n' — плотность пучка, $\Delta\epsilon$ — его энергетическая ширина, возможна эффективная стабилизация неустойчивости. Для этого необходимо, чтобы волна \vec{k}' , определяемая условием (2), уже не была резонансной для частиц пучка. Наилучшим образом условия нелинейной стабилизации могут быть выполнены при следующей постановке опыта.

Пусть в плазму инжектируются навстречу друг другу два электронных пучка. Энергия каждого из них подчиняется условию (1), а разность энергий

$$\frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_1} \sim \delta,$$

где δ определяется условием (2). Тогда более энергичный пучок раскачивает в плазме шумы эффективно стабилизирующие второй пучок. Поскольку температура электронов (а тем более ионов) определяется в плазменно-пучковых экспериментах достаточно грубо, величина δ , соответствующая наилучшей стабилизации, должна подбираться экспериментально.

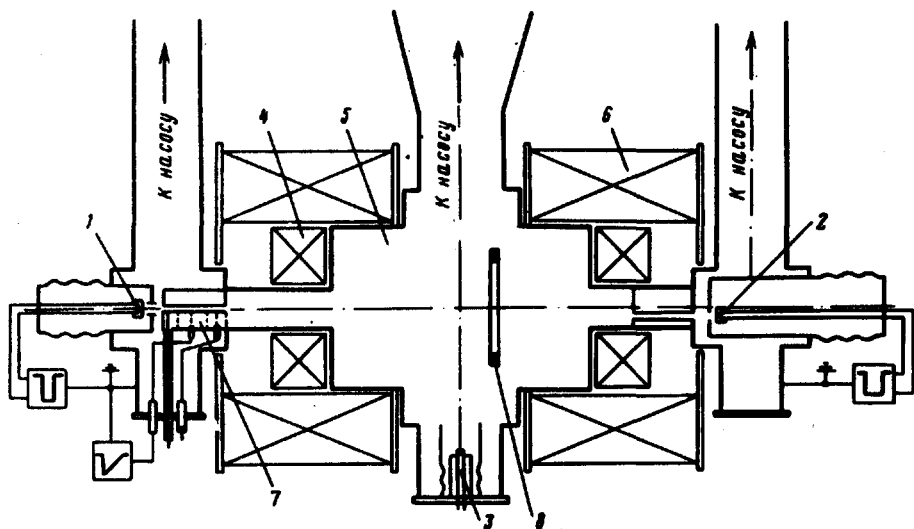


Рис. 1. Схема установки: 1 – электронная пушка ЭП-1; 2 – электронная пушка ЭП-2; 3 – плазменный инжектор; 4 – пробочные катушки; 5 – вакуумная камера; 6 – катушки основного магнитного поля; 7 – электростатический анализатор; 8 – диамагнитный зонд.

Экспериментальная установка.

Схематически установка представлена на рис. 1. Магнитное поле пробочной конфигурации создавалось двумя парами катушек с расстоянием между их центрами 85 см. Напряженность магнитного поля в пробках – 5 кэ, в средней части установки 1 кэ. Остаточный вакуум в камере составлял 10^{-6} мм. рт.ст. В средней части установки, перпендикулярно магнитному полю, устанавливался титановый плазменный инжектор для заполнения ловушки холодной водородной плазмой до концентраций $(2 + 5) \cdot 10^{12}$ см⁻³. Электронные пушки ЭП-1 и ЭП-2 размещались на противоположных концах установки за пробками. Токи пучков и их энергию можно было менять в широких пределах и подбирать оптимальные режимы работы. Длительности импульсов тока ЭП-1 и ЭП-2 составляли 250 и 130 мксек соответственно. Электронная пушка ЭП-1 и плазменный инжектор включались одновременно, а запуск ЭП-2

осуществлялся с задержкой 100 или 300 $\mu\text{сек}$. Это позволило в первом случае пучок ЭП-2 инжектировать в плазму с высоким уровнем колебаний, возбужденных пучком ЭП-1, а во втором случае с тепловым уровнем шумов. Для анализа по продольным энергиям электронного пучка ЭП-2 был применен многосеточный электростатический зонд, позволявший снять функции распределения за один импульс разряда [3]. Сведения о нагреве частиц плазмы получались из диамагнитных измерений. Концентрация плазмы контролировалась СВЧ интерферометрами на длинах волн 0,8 и 3 см.

Результаты измерений

Непосредственные наблюдения эффекта стабилизации пучка в плазме проводились с помощью измерения функций распределения частиц пучка по продольным энергиям. В наших экспериментах использовались два пучка, инжектируемые в плазму вдоль магнитного поля, навстречу друг другу в вышеуказанной временной последовательности. При равных фиксированных токах обоих пучков, было найдено оптимальное соотношение между энергиями стабилизирующего и пробных пучков.

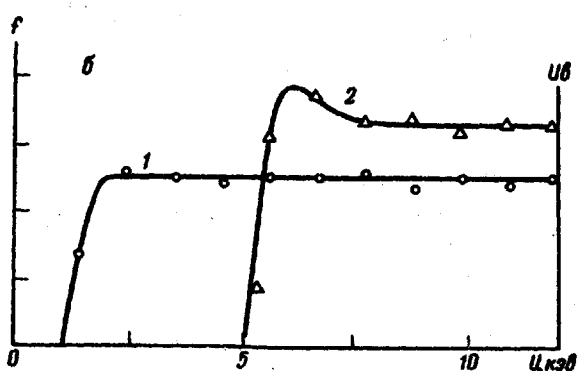
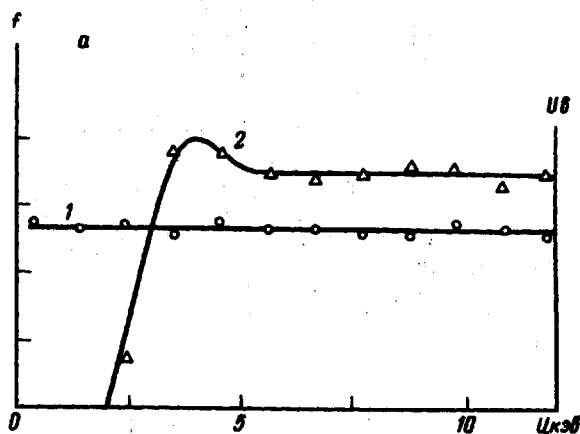


Рис. 2. Функции распределения электронов по продольным энергиям в пробном пучке на выходе из плазмы: а) кривая 1 - без стабилизирующего пучка; кривая 2 - со стабилизирующим пучком. Ток пробного пучка 8 а, энергия 12 кэВ , ток стабилизирующего пучка 8 а, энергия 13 кэВ ; б) то же, для тока пробного пучка 5 а.

Оказалось, что эффект стабилизации наиболее четко выражен, когда энергии пучков близки, а разность энергий не превышает $(1 + 2) \text{кэВ}$ при энергии стабилизирующего пучка 13 кэВ и токах 10 а. На рис. 2, а (кривая 1) показана функция распределения в пробном пучке ЭП-2 на

выходе из плазмы в отсутствие стабилизирующего пучка ЭП-1. Распределение имеет обычный вид "плато" вплоть до нулевых энергий. При совместном прохождении пучков функция распределения видоизменяется: пучок меньше "размазывается" по энергиям, т. е. стабилизируется (кривая 2). Уменьшение тока пробного пучка приводит к лучшей его стабилизации, что видно на рис. 2, б, где представлены функции распределения, аналогичные рис. 2, а. Неполная стабилизация неустойчивости может быть обусловлена тем, что области взаимодействия пучков перекрываются только внутри ловушки, — до входа в ловушку они релаксируют независимо друг от друга.

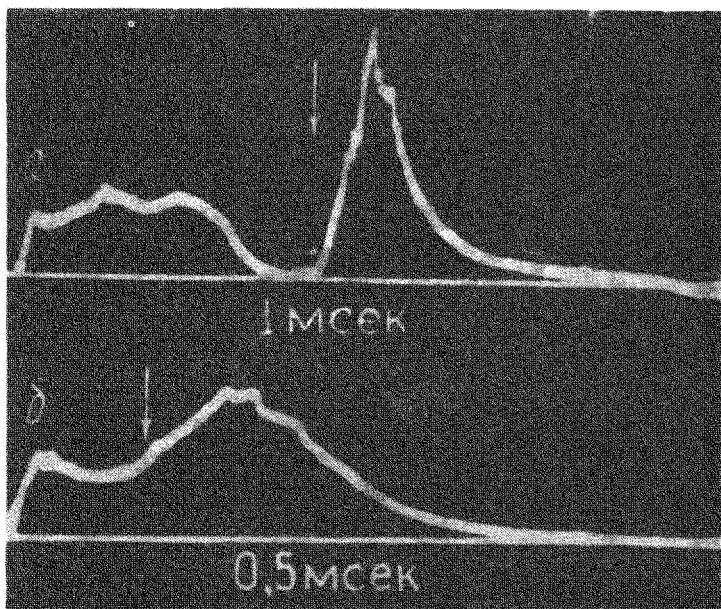


Рис. 3. Осциллограммы диамагнитных сигналов: а — раздельное включение пучков ЭП-1 и ЭП-2; б — совместное включение пучков ЭП-1 и ЭП-2. ЭП-1 — ток пучка 10 а, энергия 15 кэв; ЭП-2 — ток пучка 10 а, энергия 17 кэв. Стрелкой указан момент включения пучка ЭП-2

Измерения диамагнетизма плазмы показали существенное уменьшение эффективности нагрева от пробного пучка при наличии стабилизирующего пучка. На рис. 3, а показаны диамагнитные сигналы от каждого пучка в отдельности, а на рис. 3, б, при их совместном действии. Эффект стабилизации в большей степени заметен на диамагнитном сигнале, так как в этом случае измеряются средние величины по всему объему ловушки, и невыполнение условий стабилизации в отдельных локальных зонах, а также "размытие" пучка до входа в ловушку в этом случае несущественны.

Таким образом, в наших экспериментах удалось впервые однозначно выделить один из основных нелинейных эффектов, стабилизирующих неустойчивость пучка в плазме.

Авторы благодарят Л.И.Рудакова за ценные обсуждения.

Поступила в редакцию
25 декабря 1972 г.

Литература

- [1] В.Д.Шапиро, В.Н.Цытович. Ядерный синтез, 5, 228, 1965.
 - [2] А.С.Кингсен, Л.И.Рудаков. ЖЭТФ, 58, 582, 1970.
 - [3] Л. П.Закатов, А.Г.Плахов. ЖЭТФ, 60, 588, 1971.
-