

## **ОБРАЗОВАНИЕ СЛОЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТЕРЬ В ПЛАЗМЕ ОТКРЫТЫХ ЛОВУШЕК ПРИ АНОМАЛЬНОЙ ДИФФУЗИИ ЭЛЕКТРОНОВ В РЕГУЛЯРНЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЯХ**

*В.А.Жильцов, А.А.Сковорода*

В работе приводятся результаты экспериментального изучения распределения потенциала плазмы поперек магнитного поля в зеркальной ловушке с минимумом В "Огра-ЗБ". Результаты интерпретируются на основании теории С.В.Путвинского и А.В.Тимофеева.

В последнее время интенсивно обсуждаются открытые ловушки с электростатическим барьером [1]. Плазма открытых ловушек должна принимать положительный потенциал относительно стенки, что связано с более быстрым уходом электронов. При классических процессах переноса

электронов главным образом вдоль оси значение  $\Phi \sim 2 - 5 T_e$ , где  $T_e$  — электронная температура в эВ,  $\Phi$  — потенциал в вольтах. Как правило, в эксперименте наблюдается аномально большой положительный потенциал  $\Phi \sim 10 T_e$ .

Аномальный потенциал обнаруживался и в экспериментах на установке "Огра-ЗБ" [2]. На опыте появление (исчезновение) аномальной величины потенциала связано с появлением (исчезновением) низкочастотных колебаний (НЧ — частота меньше ионной циклотронной частоты). Аномальный потенциал плазмы обнаруживается в "Огре-ЗБ" даже когда нет аномальных потерь ионов (желобковая и ионноциклотронная неустойчивости подавлены). Измерения показали, что НЧ колебания плазмы регулярны и поэтому аномальный потенциал связан с аномальной *поперечной* диффузией электронов в *регулярных* НЧ колебаниях.

Природа такой диффузии электронов подробно анализировалась в работе [3]. Основные выводы теории можно сформулировать следующим образом: 1) если в плазме возбуждены регулярные НЧ колебания, то редкие кулоновские соударения электронов вызывают заметную поперечную диффузию тем большую, чем больше амплитуда колебаний; 2) коэффициент аномальной диффузии  $D$  не зависит от величины потенциала  $\Phi$ ; 3) коэффициент диффузии  $D$  уменьшается с уменьшением величины  $\kappa = \frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi}{dx}$ , характеризующей градиент потенциала в поперечном направлении,  $D \rightarrow 0$  при  $\kappa \rightarrow 0$ ; 4) поперечная подвижность электронов остается пренебрежимо малой.

Низкочастотные колебания сами по себе не вызывают в эксперименте потерь ионов [2], поэтому время жизни плазмы  $\tau_0$  и поперечное распределение концентрации  $n(x)$  являются заданными и независимыми от аномального поведения электронов. Квазинейтральность плазмы требует выполнения равенства

$$\tau_0^{-1} = \tau_{||}^{-1} + \tau_{\perp}^{-1}, \quad (1)$$

где  $\tau_{||}$  — классическое продольное время жизни электронов,  $\tau_{\perp}$  — аномальное поперечное время жизни электронов, причем  $\tau_{\perp} \gg \tau_{||}$  в отсутствие НЧ колебаний. Величины  $\tau_{||}$  и  $\tau_{\perp}$  можно выразить следующим образом:

$$\tau_{||} = f(R) \tau_{ee} \frac{\Phi}{T_e} \exp\left(-\frac{\Phi}{T_e}\right), \quad \tau_{\perp} \sim \frac{a^2}{D}, \quad (2)$$

где  $\tau_{ee}$  — время электрон-электронных столкновений,  $a$  — характерный поперечный размер плазмы,  $f(R)$  — функция пробочного отношения  $R$  [4]. Очевидно, что увеличение  $D$  при постоянной левой части в равенстве (1) должно приводить к увеличению  $\tau_{||}$  и, следовательно, величины  $\Phi$ . При достаточно большом  $D$  (например, при большом уровне НЧ колебаний)  $\tau_{||} \gg \tau_{\perp}$ , что проявляется экспериментально в виде аномально большой величины  $\Phi$  и отсутствия выхода электронов вдоль оси ловушки. Электроны переносятся поперек в центре плазмы и покидают ловушку вдоль силовых линий в узкой периферийной области — слое (см. рис. 1). Аналогичное поведение электронов было обнаружено в установке "Огра-1" [5].

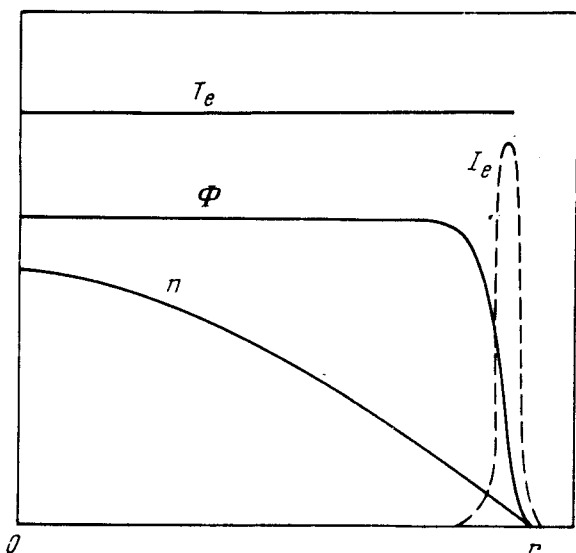


Рис.1. Поперечное распределение концентрации плазмы  $n$ , потока электронов, покидающих ловушку  $I_e$ , температуры электронов  $T_e$ , потенциала плазмы  $\Phi$

Когда  $\tau_{\parallel} \gg \tau_{\perp}$  дальнейший рост  $D$  ограничен, так как  $D \leq \frac{a^2}{\tau_0} = \text{const}$ .

Поэтому дальнейшее увеличение уровня НЧ шумов должно приводить к уменьшению величины  $\kappa$ , т. е. градиента потенциала  $\Phi$ . На рис. 2 и 3 показано измеренное поперечное распределение потенциала  $\Phi$  и плотности  $n$  в четырех режимах. *Режим 1*: в плазме отсутствуют какие-либо колебания, потенциал имеет классическое значение и поперечное распределение  $\sim n^{2/5}$  (рис. 2, б). *Режим 2*: в плазме обнаруживаются НЧ колебания, значение потенциала аномально большое<sup>1)</sup> (рис. 3, а). *Режим 3*: уровень НЧ колебаний более высокий, чем в режиме 2; обнаруживается широкое "плато" аномально большого потенциала, резко меняющегося на периферии в слое (рис. 3, б и рис. 1). *Режим 4*: в плазме развиваются интенсивные высокочастотные ионноциклотронные колебания, которые значительно меняют время жизни  $\tau_0$  и поперечное распределение концентрации  $n(x)$ . Это приводит к увеличению градиента потенциала (рис. 2, а).

Интенсивный поперечный перенос электронов в центре приводит к выравниванию электронной температуры по всему объему плазмы (рис. 1). Измерения показали, что в режимах 1 – 3 величина  $T_e$  и характер ее зависимости от  $n$ ,  $\tau_0$  и энергии инжекции нейтралов достаточно хорошо предсказываются классической теорией. Это понятно, так как электроны покидают ловушку на периферии в слое при классическом значении потенциала, когда  $\tau_0 = \tau_{\parallel}$  (рис. 1).

<sup>1)</sup>Температура электронов существенно разная во всех режимах.

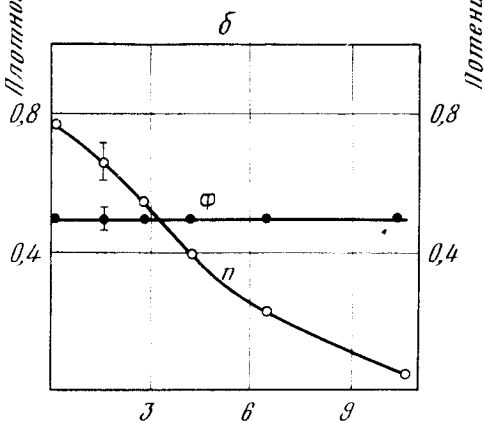
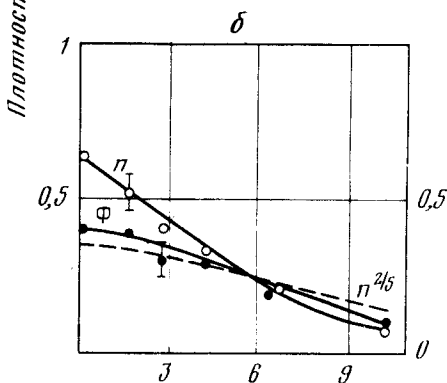
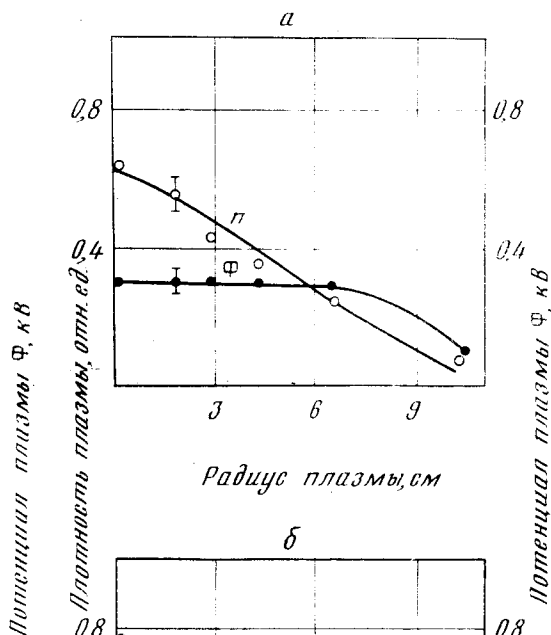
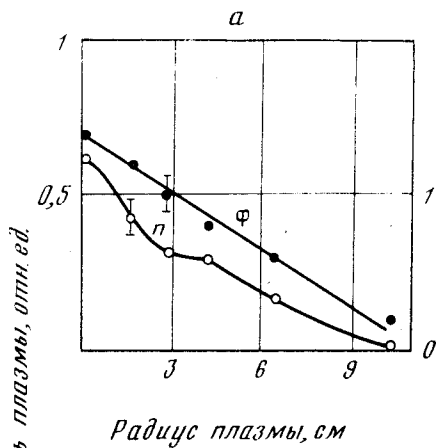


Рис.2 и 3. Распределение  $n$  и  $\Phi$  по радиусу плазмы. Пунктирная линия – классический потенциал, рассчитанный по  $n$

Таким образом, аномальная поперечная диффузия электронов в регулярных НЧ колебаниях не приводит к заметным изменениям плотности, температуры и времени жизни плазмы. Эта диффузия определяет величину и поперечное распределение потенциала плазмы и приводит к образованию на периферии слоя, в котором происходит заметное падение потенциала и где сосредоточен весь поток электронов, покидающих ловушку.

Проведенные измерения и их анализ могут служить примером, который показывает, что усиленная поперечная диффузия не приводит к установлению *больцмановского* распределения потенциала. Это объясняется тем фактом, что аномальная диффузия не всегда сопровождается аномальной подвижностью.

Рассмотренная аномальная диффузия не зависит от природы НЧ колебаний (колебаний желобкового типа, распространяющихся поперек магнитного поля). Причины их раскачки могут быть самыми разнообразными. В наших экспериментах, когда грубая желобковая неустойчивость подавлена магнитной ямой, обнаружены электронная и ионная ветви соб-

ственных слабозатухающих желобковых колебаний. Из-за большой добротности этих колебаний они раскачиваются внешними источниками, например, шумами инжестируемого пучка. Резкие всплески (удары) ионноциклотронной неустойчивости также приводят к "звону" высокочастотных НЧ колебаний. Понижение уровня шумов пучка и ионноциклотронной неустойчивости может существенно понизить аномальную диффузию электронов, что приведет к уменьшению потенциала плазмы.

За обсуждение работы авторы благодарны Д.А.Панову, А.В.Тимофееву.

Поступила в редакцию

2 июня 1979 г.

### Литература

- [1] Г.И.Димов, В.В.Закайданов, М.Е.Кишиневский. Физика плазмы, **2**, 597, 1976.
  - [2] V.A.Zhil'tsov, et al. VII Int. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fusion Res., Innsbruck, 1978. IAEA-CN-37. S-2.
  - [3] С.В.Путвинский, А.В.Тимофеев. ЖЭТФ, **69**, 221, 1975.
  - [4] V.P.Pastukhov. Nucl. Fusion. **14**, 3, 1974.
  - [5] Д.А.Панов. Препринт ИАЭ-635, М., 1964.
-