

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКА АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ
ИЗ ПЛАЗМЫ ПО СЕЧЕНИЮ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА
НА УСТАНОВКЕ ТОКАМАК-4**

М. П. Петров

Энергетический анализ потока атомов перезарядки из плазмы широко используется в настоящее время для измерения ионной температуры на установках токамак. В работе [1] было показано, что, если анализ потока атомов производится в экваториальной плоскости тороида в направлении большого радиуса R , то это позволяет по максвелловским "хвостам" энергетических распределений атомов определять максимальные значения ионной температуры в центральной области плазменного шнура. На установке Токамак-4 была предпринята попытка измерить распределение ионной температуры по сечению плазменного шнура путем наклона оси атомного анализатора вниз и вверх относительно экваториальной плоскости тороидальной камеры. В этих экспериментах применялся пятиканальный анализатор атомных частиц, дающий возможность одновременно получать значения потока атомов при пяти различных энергиях. Полученные таким образом распределения потока атомов дейтерия с различными энергиями E по сечению плазменного шнура приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что в диапазоне ± 5 см по малому радиусу тороида r распределения имеют осесимметричный характер, причем потоки атомов больших энергий спадают к перифе-

рии плазменного шнура тем круче, чем выше их энергия. Симметрия нарушается тем, что при отклонении оси анализатора от экваториальной плоскости вверх на 10 см поток атомов с энергией $E > 1,3$ кэв вновь заметно нарастает. Аналогичная асимметрия в более ярко выраженном виде наблюдалась ранее на установках Токамак Т-3 и ТМ-3 [2, 3].

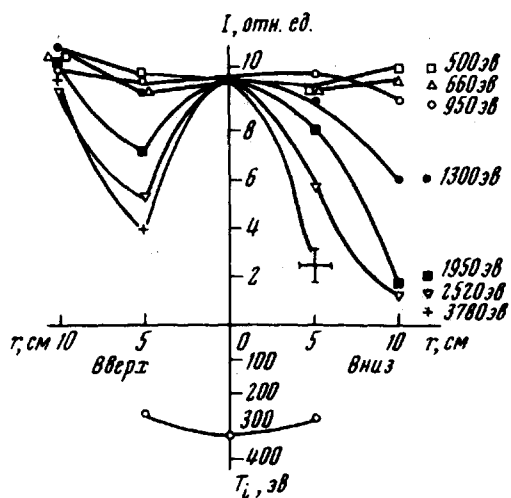


Рис. 1. Распределение потока атомов перезарядки разных энергии и ионной температуры по сечению плазменного шнура. По горизонтальной оси отложены отклонения оси анализатора от экваториальной плоскости в центре разряда. Распределения потока нормированы в центральной точке. Режим разряда: $H_z = 27,5$ кэ, ток разряда 137 ка, средняя концентрация электронов $1,75 \cdot 10^{13}$ см⁻³

Напомним, что анализаторы атомных частиц регистрируют атомы, векторы скоростей которых составляют малые углы в $20 - 30^\circ$ с плоскостью поперечного сечения плазменного витка, т.е. атомы, появившиеся при перезарядке запертых ионов.

Запертыми ионами считаются, во-первых, тороидально запертые ионы, дрейфующие по "банановым" траекториям, и, во-вторых, локально запертые ионы, захваченные в локальные пробочные ловушки между катушками продольного магнитного поля токамаков и совершающие там тороидальный дрейф. Существование обеих групп запертых ионов в плазме Токамака-4 может, как будет показано ниже, быть причиной обнаруженной в данных экспериментах асимметрии распределения потока атомов перезарядки. Сначала рассмотрим с этой точки зрения тороидально запертые ионы. На рис. 2 показана проекция типичной траектории таких ионов с энергией ~ 1 кэв на плоскость поперечного сечения плазменного шнура. Здесь же приведено относительное распределение концентрации атомов водорода по сечению плазменного шнура, измеренное спектроскопическим методом [4] на установке Токамак-3А, весьма близкой по геометрическим и физическим параметрам к Токамаку-4. Максимальное отклонение запертых ионов от магнитной поверхности имеет порядок величины $\Delta r \sim \rho_i q \sqrt{R/r}$ [5], где ρ_i — ларморовский радиус ионов, q — коэффициент запаса устойчивости плазменного шнура. Для рассматриваемых условий (напряженность продольного магнитного поля 27 кэ, $r = 10$ см, $R = 100$ см, $q = 2/\Delta r$ равно нескольким сантиметрам. Из рис. 2 видно, что основной перепад концентрации атомов в плазме лежит между наружной и внутренней частями "банановой" траекто-

рии ионов. Период колебаний запертых ионов определяется выражением:

$$[5]: t_1 = \frac{10Rq}{v} \sqrt{\frac{R}{r}}, \text{ где } v - \text{ скорость иона. Расчет показывает, что}$$

за время дрейфа по наружной части траектории в области с концентрацией атомов $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ поток ионов должен ослабиться в несколько раз за счет резонансной перезарядки прежде, чем ионы достигнут точки поворота. Это может явиться причиной того, что поток атомов перезарядки из верхней области плазменного шнура в несколько раз превосходит поток снизу. Факт появления асимметрии только при энергии атомов $E \geq 1,3 \text{ кэв}$ можно объяснить тем, что частоты столкновений для ионов меньших энергий превышают частоты обращения по банановым траекториям. Это приводит к перемешиванию запертых ионов с пролетными. Действительно, для того, чтобы дейтрон перешел из запертого состояния в пролетное, нужно, чтобы вектор его скорости повернулся на угол $\sim \sqrt{r/R}$ [5]. Требующийся для этого интервал времени равен $t_2 = \tau (2/\pi(\sqrt{r/R}))^2$. Здесь $\tau = m^2 v^3 / 4\pi n e^4 L_K$ — время поворота вектора скорости дейтона ион-ионных столкновений в чистой дейтериевой плазме на угол 90° (где m — масса дейтона, n — концентрация плазмы, e — заряд электрона, L_K — кулоновский логарифм). Приравняв величины t_1 и t_2 , мы можем следующим образом определить критическую скорость дейтронов v_K , при которой выравниваются частоты

ион-ионных столкновений и "банановых" колебаний $v_K = \left(\frac{10\pi^3 R^{2,5} q n e^4 L_K}{m^2 r^{1,5}} \right)^{1/4}$

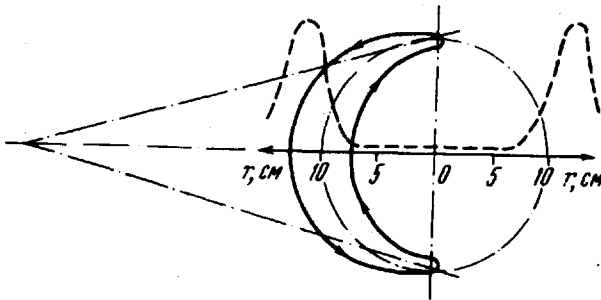


Рис. 2. Распределение концентрации атомов по сечению плазменного шнура (пунктирная линия) и проекция траектории запертых ионов с $E = 1 \text{ кэв}$ на плоскость поперечного сечения плазменного шнура. Штрихпунктирными линиями показаны крайние положения оси анализатора

При $n = 1,75 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и $L_K = 10$ получаем $v_K = 3,8 \cdot 10^7 \text{ см/сек}$, что соответствует энергии дейтронов $1,5 \text{ кэв}$. Именно при такой энергии начинает проявляться асимметрия в экспериментально измеренном распределении потока атомов перезарядки.

Рассмотрим возможный вклад дрейфа локально запертых ионов в обнаруженный эффект асимметрии распределения потока атомов перезарядки. Поведение этой группы ионов в плазме токамаков было под-

робно проанализировано Андерсоном и Фюргом в работе [6]. Дрейфовое смещение таких ионов за время между ион-ионными столкновениями, выводящими ионы из пробочной ловушки, имеет порядок величины $\Delta r \sim v_g r (2\sqrt{\epsilon/\pi})^2$, где v_g — дрейфовая скорость иона, ϵ — относительное ослабление напряженности поля между катушками токамака. В Токамаке-4 на периферии плазменного шнура $\epsilon = 3 \div 4\%$. В этих условиях дрейфовое смещение локально запертых дейтронов с энергией $E \geq 1,5 \text{ кэВ}$ может достигать нескольких сантиметров. Дрейфовый поток дейтронов таких энергий может проникать в периферийные области плазмы с повышенной концентрацией атомов, что приводит к увеличению потока атомов перезарядки из этих областей. Заметим, что полярность обнаруженной асимметрии совпадает с направлением дрейфа тороидально и локально запертых ионов.

Итак, обнаруженное отклонение от осевой симметрии распределения потока атомов в верхней части плазменного шнура связано, очевидно, с выходом дрейфовых потоков запертых ионов в область с высокой концентрацией атомов на периферии плазменного шнура. Симметричный характер распределений потока атомов из внутренней зоны плазменного шнура диаметром в 10 см в сочетании с тем, что энергетические распределения атомов, испускаемых этой зоной, имеют максвелловский характер, свидетельствует, по-видимому, об осесимметричном распределении ионной температуры. Значения ионной температуры для этой зоны представлены нижней кривой на рис. 1. Видно, что ионная температура слабо меняется в приосевой части плазменного шнура диаметром в 10 см.

Описанные эксперименты показывают, таким образом, что анализ потока атомов перезарядки из разных областей плазменного шнура на токамаках может дать информацию о распределении ионной температуры по крайней мере во внутренних областях плазмы. Эти области могут быть тем обширнее, чем дальше от оси разряда расположена оболочка высокой концентрации нейтральных атомов. Именно наличие этой оболочки при наличии дрейфа запертых ионов препятствует измерению распределения ионной температуры данным методом на периферии плазменного шнура.

Автор приносит искреннюю благодарность Л.А.Арцимовичу, В.С.Мухоматову и О.П.Погуце за полезные обсуждения обнаруженных эффектов.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
20 декабря 1972 г.

Литература

- [1] В.В.Афросимов, М.П.Петров. ЖТФ, 37, 1995, 1967.
- [2] Л.А.Арцимович и др. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, IAEA Vienna, 1966 vol. 2, page 595.
- [3] М.П.Петров. ЖТФ, 38, 938, 1968.
- [4] M.J.Forrest et al. CLM-R 107, Culham Laboratory 1970.
- [5] Б.Б.Кадомцев, О.П.Погуце. ЖЭТФ, 51, 1734, 1966.
- [6] O.A.Anderson, H.P.Furth. Nuclear Fusion, 12, 207, 1972.