

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ДИФФУЗИЮ ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ

И. А. Коссов

Наблюдаемые в эксперименте на двухзаходном стеллараторе ФИАН СССР Л-1 [1] скорости распада инжектируемой внешним источником плазмы вплоть до последнего времени не удавалось согласовать с расчетами, выполненными в рамках какой-либо теоретической модели [1, 2].

Предпринимая очередную попытку объяснить механизм потерь плазмы в замкнутых ловушках, мы в настоящей статье обращаемся к явлению, обнаруженному на Л-1 [3, 4] и заключающемуся в существовании направленной вдоль малой оси тороидальной камеры (ось Z на рис. 1) средней скорости ионного компонента (\bar{u}_{z_i}). Качественный анализ и строгое теоретическое рассмотрение, проведенные в [4] и [5], позволяют утверждать, что продольные ионные потоки должны с необходимостью возникать в замкнутых ловушках в режиме слабосоударительной плазмы с радиальным электрическим полем E_r . Природа появления направленных потоков — импульс отдачи, приобретаемый "пролетными" ионами за счет повышенной скорости ухода "запертых", обладающих при $E_r \neq 0$ средней аксиальной скоростью $\bar{v}_Z = v_E / \theta (v_E = c \frac{E_r}{H_Z})$

Методика измерений, использованная в [3] и [4], позволяла определять направленную среднюю скорость только у ионного компонента. Однако, во вращение вокруг главной оси тора, по-видимому, вовлекается плазма в целом. К увлечению электронов вдоль оси Z должно приводить ион-электронное взаимодействие.

Аксиальная скорость, которую приобретет электронный компонент, можно оценить из соотношения:

$$\bar{u}_{z_e} \approx \frac{\nu_{ei}}{\nu_{ei} + \nu_{en}} \bar{u}_{z_i} \quad (1)$$

где ν_{ei} и ν_{en} — частоты столкновений электрон-ион и электрон-нейтрал соответственно. В условиях эксперимента на Л-1 $\nu_{ei} \gg \nu_{en}$ и следовательно, $\bar{u}_{z_e} \approx \bar{u}_{z_i}$.

Для того, чтобы выяснить, сколь существенным может оказаться наличие продольного электронного движения с точки зрения поперечного переноса плазмы, обратимся к работам [5 - 7]. Работы эти являются развитием теории диффузии на парных соударениях с учетом тороидальности камеры (так называемой "неоклассики") и отличаются

от предшествующих исследований тем, что в них впервые изучены эффекты, связанные с существованием в аксиально-симметричных замкнутых ловушках продольных электрических полей E_z . Показано, что в продольных электрических полях плазма (за счет дрейфа "запертых" частиц) приобретает среднюю радиальную скорость \bar{u}_r . В магнитной ловушке типа Токамак скорость \bar{u}_r направлена от периферии камеры к оси Z, и процесс диффузии при этом напоминает явление пинчевания плазменного шнура.

Анализ, проведенный в [5 - 7] показывает, что радиальная скорость \bar{u}_r , приобретаемая плазмой, — результат возникновения силы трения между "запертыми" и "пролетными" частицами, тогда, когда последние обладают некоторой средней продольной скоростью \bar{u}_z . Формально, с точки зрения вида математического выражения, полученного для поперечного потока [5], и по самой физической сути явления — безразлично, какова причина, приводящая к установлению средних аксиальных скоростей. В разобранном в [5 - 7] случае продольное движение — результат существования электрического поля E_z . Если же $E_z = 0$, но тем не менее, благодаря какому-либо механизму (в частности, отмеченному в [4, 5]) "пролетные" частицы ускоряются вдоль торoidalной камеры, — в плазме должны происходить явления, аналогичные предсказываемым в [5 - 7]. Радиальная скорость, которую приобретают заряженные частицы в связи с появлением аксиального движения, может быть определена из соотношения:

$$\bar{u}_{r_i} = a \frac{m_i v_i \bar{u}_{z_i} c}{e H_z \Theta} (r/R)^{1/2} \quad (2)$$

(a — численный коэффициент, равный для электронов 2,1). При этом знак скорости \bar{u}_{r_i} (определяемый направлением \bar{u}_{z_i} , Θ и H_z) в общем случае может не совпадать со знаком, предсказываемым для Токамака.

С точки зрения эксперимента на Л-1 наибольший интерес представляет анализ поведения электронов, от скоростей ухода которых зависит время жизни плазмы в ловушке. Отрицательный потенциал, который принимает плазма, удерживаемая в Л-1 [1], свидетельствует о том, что скорость диффузии ионов превосходит диффузионную скорость электронов. Механизм потерь ионов, по-видимому, связан с уходом в "конус потерь", возникающий в пространстве скоростей [4]. Аксиальное движение электронного компонента, обнаруженное на стеллараторе Л-1, должно, согласно (2), приводить к появлению поперечной скорости \bar{u}_r . Легко показать, что при рассмотренном в [4, 5] механизме ускорения заряженных частиц вдоль Z, поперечное перемещение электронов должно происходить в направлении от оси торoidalной камеры к периферии, увеличивая таким образом скорость потерь плазмы.

Роль процессов, связанных с продольным электронным потоком, можно оценить, вводя коэффициент κ , который, исходя из результатов

работы [5], может быть выражен в виде:

$$\kappa \equiv \frac{\tau_0}{\tau(\bar{v}_Z)} \approx \frac{\omega_{ce} \Theta \bar{v}_Z}{v_T^2 \frac{\partial \ln n_e T_e^{-0.38}}{\partial r}} \quad (3)$$

Здесь τ_0 — время жизни плазмы, рассчитанное в отсутствие продольного движения электронов, а $\tau(\bar{v}_Z)$ — время жизни, соответствующее поперечной скорости \bar{v}_Z , определяемой из соотношения (2). ω_{ce} — циклотронная электронная частота. В условиях эксперимента, характерных для Л-1, $\kappa > 1$. (При $H_Z \approx 10$ кэ $\kappa \approx 10$).

Подставляя в [2] выражение для кулоновских частот соударений и принимая во внимание, что $\tau(\bar{v}_Z) \approx 0,5(a/\bar{v}_Z)$ (где a — поперечный размер плазмы) получаем, что (для $a = 3$ см и $a/R \approx 1/20$):

$$\tau(\bar{v}_Z) \approx 10^{12} \frac{T_e^{3/2} H_Z \Theta}{n_e \bar{v}_Z} \quad (4)$$

Для $T_e = 2$ эв, $H_Z = 3$ кэ, $\Theta = 1/30$, $n_e = 2 \cdot 10^{10}$ см⁻³, $\bar{v}_Z = 5 \cdot 10^6$ см/сек из [4] получаем, что $\tau(\bar{v}_Z) \approx 3$ мсек, что близко к экспериментально измеренному значению с $\tau_{\text{эксп}} \approx 1 - 2$ мсек.

Автор глубоко благодарен М.С.Рабиновичу, Л.М.Коврижных, И.С.Шпигелю, М.С.Бережецкому, С.Е.Гребенщикову и И.С.Сбитниковой за интерес к работе, обсуждения и полезные замечания.

Физический институт
им. П.Л.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
21 июня 1971г.

Литература

- [1] М.С.Бережецкий, С.Е.Гребенщиков, И.А.Косый, Ю.И.Нечаев, М.С.Рабинович, И.С.Сбитникова, И.С.Шпигель. Докл. СМ-24/D-5 на III-ей Междунар. Конф. по физике плазмы и управл. синтезу. Новосибирск, 1968.
- [2] М.С.Бережецкий, С.Е.Гребенщиков, Л.М.Коврижных, И.А.Косый, И.С.Сбитникова, И.С.Шпигель. Докл. на III-ей Европ. Конф. по управл. синтезу и физике плазмы, Утрехт, 1969.
- [3] М.С.Бережецкий, С.Е.Гребенщиков, И.А.Косый, И.С.Шпигель, Докл. на IV Европ. Конф. по управл. синтезу и физике плазмы, Рим, 1970.
- [4] М.С.Бережецкий, С.Е.Гребенщиков, И.А.Косый, И.С.Сбитникова, И.С.Шпигель. Докл. СМ-28/160 на IV-ой Междунар. Конф. по физике плазмы и управл. синтезу, США, 1971.

- [5] Л.М.Коврижных. Докл. СМ-28/161 на IV-ой Междунар. Конф. по физике плазмы и управл. синтезу, США, 1971.
- [6] P.Rutherford, L. Kovrizhnikh, M. Rosenbluth, Докл. на IV-ой Европ. Конф. по управл. синтезу и физике плазмы, Рим, 1970.
- [7] А.А.Галеев, Диффузионно-электрические явления в плазме удерживаемой в Токамаке, Препринт ИЯФ 25 – 70, Новосибирск, 1970.
- [8] А.А.Галеев, Р.З.Сагдеев, ЖЭТФ, 53, 359, 1967.
- [9] Л.М.Коврижных. ЖЭТФ, 56, №3, 1969.
-