

Письма в ЖЭТФ, том 18, вып. 2, стр. 106 – 109

29 июля 1973 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФУЗИИ ПРИМЕСИ В ТОКАМАКЕ СПЕКТРАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ

B. И. Гервидс, B. A. Крупин

В настоящей работе путем сравнения экспериментальных и расчетных распределений интенсивностей линий ионов примеси углерода в водородной плазме токамака показано существование диффузии примесных ионов к оси плазменного шнуря. Получены оценки локальных значений плотностей диффузационных потоков ионов примеси, а также вклада примесей в плотность диффузационного потока протонов.

На установке ТМ-3 в режимах с электронной плотностью $n_e \sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и температурой $T_e \sim 300 \div 400 \text{ эв}$ проведены измерения распределений абсолютных интенсивностей $I(r, t)$ линий ионов СIII, CIV, CV примеси углерода и линий водородных атомов по сечению плазменного шнуря. При указанных достаточно низких электронных плотностях интенсивность свечения линии прямо пропорциональна концентрации излучающего иона n_k ($k = 0, 1, \dots$; z — кратность ионизации, z — заряд ядра) и вместе с ней определяется, как это непосредственно следует из уравнений сохранения числа ионов данного сорта [1]

$$\frac{\partial n_k(r, t)}{\partial t} = -\operatorname{div} j_k(r, t) + f_k(n_e, T_e, r, t) \quad (1)$$

трремя процессами: а) скорость заселения данной кратности ионизации f_k (ионизация, рекомбинация и т. д.); конкретный вид f_k зависит от выбора модели процессов заселения; б) диффузией примесных ионов ($\operatorname{div} j_k$, j_k — плотность диффузионного потока иона k); в) поступлением примеси в плазму с периферии в процессе разряда (оно определяет граничные условия, которые мы здесь не вычисляем).

Наблюдаемые интенсивности линий отвечают, очевидно, "полному" уравнению (1). Для выделения вклада диффузии нами были произведены численные расчеты на ЭВМ зависимости от времени распределений интенсивностей этих линий и концентраций всех ионов углерода без учета диффузии и поступления примеси в плазму (уравнение (1) без диффузионного члена $\operatorname{div} j_k$). Расчеты проводились в справедливом, при указанных выше плотностях, корональном приближении (подробнее, в том числе вид функции f_k , смотри [2]; распределение суммарной плотности примеси предполагалось однородным). Для расчетов бралось параболическое распределение $n_e(n_e(r, t) = 2\bar{n}_e(t)(1 - r^2/a^2))$, что соответствует результатам контрольных измерений на установке ТМ-3. Распределение электронной температуры $T_e(r, t)$ также бралось параболическим. При этом использовалась экспериментальная (по микроволновым и диамагнитным измерениям) зависимость от времени средних $\bar{n}_e(t)$ и $\bar{T}_e(t)$. Типичные экспериментальные и расчетные кривые представлены на рис. 1. Наблюданное резкое отличие экспериментальных и расчетных кривых невозможно объяснить ни неточным знанием зависимости $T_e(r)$, ни погрешностью экспериментального определения \bar{T}_e , так как вариация в широких пределах \bar{T}_e и вида распределения $T_e(r)$ (от параболического до плоского) лишь несущественно влияет на вид расчетных кривых, сохраняя быстрое "прогорание" в центре (см. рис. 1) и максимум интенсивности на периферии. Равным образом не проходит и объяснение колоколообразной формы экспериментальных кривых наличием поступления нейтральных атомов примеси в центр и диффузией ионов примеси наружу, так как в наших условиях это привело бы к трудновыполнимому требованию: энергия $E(\text{CI}) \geq 10^2 \text{ эв}$.

Таким образом, характер отличия экспериментальных кривых от расчетных свидетельствует о весьма существенной роли неучитываемого в расчете члена $\operatorname{div} j_k$, т. е. о наличии в условиях эксперимента отчетливо выраженной диффузии примесных ионов к оси плазменного шнуря.

ра в течение всего разряда. Отметим, что указанные характерные отличия экспериментальных и расчетных кривых наблюдаются и для других ионов углерода¹, что дополнительно подтверждает сделанный вывод.

Установив описанным выше способом факт наличия диффузии примесных ионов к оси шнура, перейдем к оценке ее скорости.

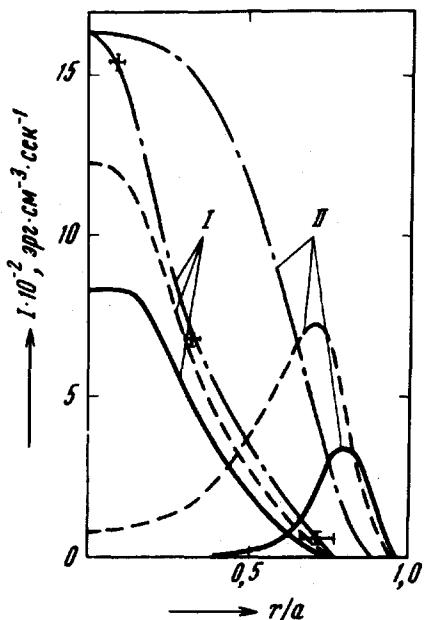


Рис. 1. Распределение интенсивности $I(r, t)$ линии 2271 Å иона CV; I – эксперимент, II – расчет. Штрих-пунктирные кривые для 2,5 мсек, пунктируные – 4,5 мсек, сплошные – 7,5 мсек от начала разряда. Расчетные кривые нормированы по максимуму экспериментальной кривой для 2,5 мсек

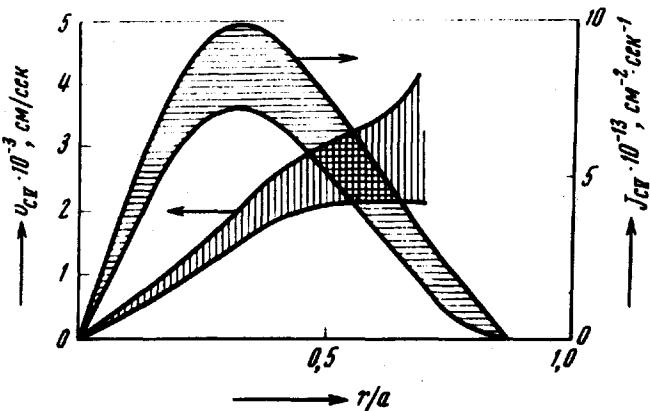


Рис. 2. Плотность диффузионного потока $j(r, t)$ (масштаб справа), и скорость диффузии $v_d(r, t)$ (масштаб слева) иона CV для $t = 4,5$ мсек. В обоих случаях верхняя граница соответствует параболическому распределению $T_e(r)$, нижняя граница – равномерному распределению $T_e(r)$

Вычисление локальных величин $j_k(r, t)$ и соответствующих скоростей диффузии $v_k = j_k / n_k$ по экспериментально определяемым зависимостям $n_e(r, t)$, $T_e(r, t)$ и $I_{k-1}(r, t)$, $I_k(r, t)$, $I_{k+1}(r, t)$ произво-

дится с помощью уравнения (1). Интегрируя его по r , для радиальной составляющей j_k получаем:

$$i_k^r(r, t) = \frac{1}{r} \int_0^r \left(\frac{\partial n_k}{\partial t} - f_k \right) r' dr' \quad (2)$$

($i_k^r > 0$ соответствует диффузии к оси шнура).

Результаты вычислений по формуле (2) для иона СV представлены на рис. 2.

По полученным в работе данным о диффузии ионов углерода СIV и СV, с помощью соотношения $k i_k^r \approx i_{pk}^r$, вытекающего из [1, 3] оценена величина i_{pk}^r — вклад в плотность радиального диффузионного потока протонов наружу, вносимый взаимодействием протонов и примесных ионов заряда k . Для области $r/a = 0,25 \div 0,5$ находим $i_{p3}^r + i_{p4}^r \approx (3 \div 4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$. Для сравнения укажем, что плотность радиального диффузионного потока электронов наружу i_e^r , определенная в том же режиме по спаду электронной концентрации и скорости ионизации атомов водорода [4] для указанной области составила $(2 \div 5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$.

Отметим в заключение, что изложенный способ обнаружения диффузии примесных ионов и оценки локальных значений ее скорости не содержит предположений о каких-либо конкретных механизмах диффузии. Это обстоятельство, очевидно, открывает принципиальную возможность выбора между различными механизмами диффузии путем сравнения результатов применения данного способа с соответствующими теоретическими зависимостями.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность К.А.Разумовой и В.И.Когану за постоянный интерес к работе и полезные обсуждения. Авторы признательны А.А.Галееву и Д.А.Щеглову за полезные обсуждения.

Поступила в редакцию
18 июня 1973 г.

Литература

- [1] С.И.Брагинский. 'Явления переноса в плазме', сб. "Вопросы теории плазмы", вып 1, Госатомиздат. 1963.
- [2] I.Galushkin, V.I.Gervids, V.I.Kogan. Nuclear Fusion, Suppl., 193, 1972.
- [3] А.А.Галеев, Р.З.Сагдеев. ЖЭТФ, 53, 348, 1967.
- [4] Г.А.Бобровский, Н.Д.Виноградова, Э.И.Кузнецов, К.А.Разумова. Письма в ЖЭТФ, 9, 269, 1969.