

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ
ПО ИНЖЕКЦИИ МАКРОЧАСТИЦ В ТОКАМАК ФТ-1

*А. П. Жилинский, Б. В. Кутеев, М. М. Ларионов,
А. Д. Лебедев, С. С. Михайкин, В. А. Никифоров,
В. А. Рожанский, Л. Д. Цендин*

Исследован распад возмущения примесей (Li, C, O, Si, Ti, нержавеющая сталь, Cu, Mo, W), внесенного с помощью макрочастицы в центральную область плазмы. Показано, что примеси выносятся из разряда с характерным временем τ , слабо зависящим от их сорта. Значения τ находятся в согласии с предсказаниями теории, учитывающей полоидальное вращение плазмы.

Удержание и перенос примесей в токамаке анализировались различными методами в работах [1 – 5]. Полученные данные указывают на то, что существует механизм, выносящий примеси из разряда, причем среднее время их жизни τ слабо зависит от заряда и массы примеси. Причина этого выноса до сих пор остается неясной. В работах [2 – 4] вынос примеси связывался с наличием в центральной области зоны перемешивания с $q < 1$. Однако, перемешивание в центральной области не может непосредственно привести к выносу примесей из разряда. С другой стороны, теоретический анализ показывает, что поток примесей наружу может существовать и в спокойной плазме [6]. Различие исследованных режимов, косвенный характер некоторых методик и невысокая точность экспериментальных данных затрудняют количественное сопоставление полученных результатов между собой.

Ниже описано исследование переноса примесей на токамаке ФТ-1 новым методом макрочастиц [7], который позволяет одним и тем же способом с помощью прямых измерений определить τ для различных примесей. В экспериментах изучался распад возмущения концентрации примесей, вносимого с помощью макрочастицы в центральную область плазмы. При этом оказывается возможно непосредственно анализировать в идентичных условиях перенос примесей наружу. Было исследовано удержание чистых элементов – C, Si, Ti, Cu, Mo, W и смесей LiH, LiOH, нержавеющая сталь. В отличие от ранее выполненных экспериментов по измерению скорости полоидального вращения плазмы [8], где использовались графитовые макрочастицы размером ~ 1 мм, в данных экспериментах в камеру вбрасывались макрочастицы размером $100 \div 200$ мкм, содержащие $10^{17} \div 10^{18}$ атомов. В результате взаимодействия с плазмой за 1 – 3 мсек они нагревались до температуры, соответствующей началу испарения. Стадия испарения частицы занимала 2 \div 4 мсек. За время $\lesssim 5$ мсек происходило перераспределение ионов примеси по сечению и установление равновесного ионизационного состояния. Измерения проводились на последующей стадии распада, когда уменьшение концентрации примеси было практически экспоненциальным,

а параметры плазмы — невозмущенными. Характеристики разряда имели значения: ток $J_p = 30 \div 40$ кА, магнитное поле $B = 5 \div 10$ кГс, средняя плотность $\bar{n}_e = (4 \div 6) \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$, электронная температура в центре $T_e(0) = 300$ эВ, ионная температура $T_i(0) \approx 100$ эВ, большой радиус установки $R = 62,5$ см, радиус диафрагмы $a = 15$ см.

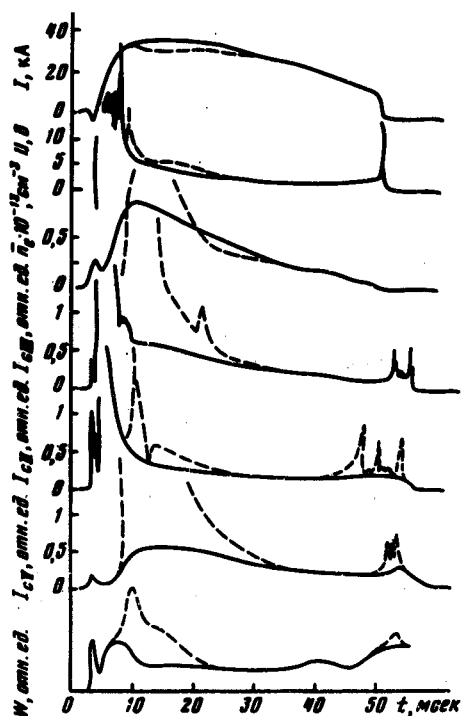


Рис. 1

Характер взаимодействия макрочастиц с плазмой и динамика их испарения не сильно изменяется в случае различных материалов. Поэтому ниже приводятся результаты для графитовых макрочастиц. Типичные осциллограммы тока J_p , напряжения на обходе $v_{обх}$, \bar{n}_e , излучения линий СII, СIII, CV и сигнала болометра W для разрядов в нормальном режиме (сплошные линии) и с инжектированной макрочастицей (штриховые) показаны на рис. 1. Несмотря на увеличение плотности и резкий рост радиационных потерь и линейчатого излучения примесей в начале разряда, в целом инжекция макрочастицы не вызывает нарушения МГД устойчивости разряда. Ток и напряжение на обходе не сильно отличаются от невозмущенных значений. К $20 \div 25$ мсек разница становится малой и можно пользоваться данными измерений, полученными в невозмущенном разряде.

Время жизни определялось по постоянным спада возмущений свечения линий или болометра, которые аппроксимировались экспонентами.

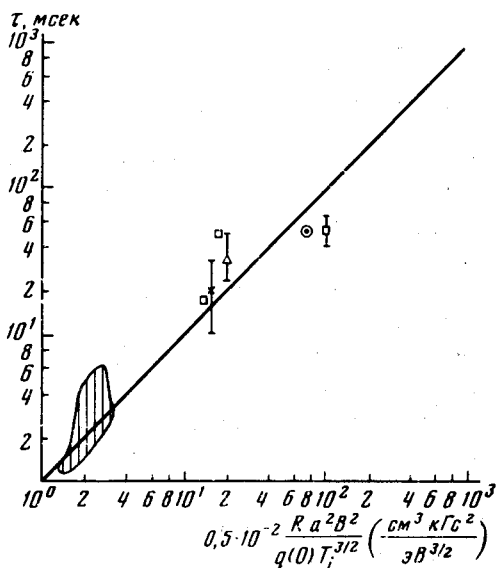


Рис. 2. Заштрихованная область — результаты данной работы, \times — T-4, \square — T-10, Δ — TFR \odot — PLT

	LiH	LiOH	C	Si	Ti	SS	Cu	Mo	W
z^*	3	6	4	12	12	16	18	20	25
m_I	7	—	12	28	48	56	64	96	184
$\tau_{\text{бол}}$	2,5	4	10	3,5	2	3	3	3	3
τ_{n_e}	4	—	5	2,5	3	3	2,5	5	3

z^* — расчетные максимальные возможные заряды ионов; $\tau_{\text{бол}}$ — время жизни по болометру; τ_{n_e} — время жизни по плотности

При инъекции углеродной макрочастицы значения τ , определенные по линиям CII, CIII, CIV составили 14,7 и 3 мсек. В случае LiOH τ , измеренные по линиям OII и OV, оказались равными 1,5 и 3 мсек. Времена жизни, полученные с использованием болометрического сигнала и скорости спада электронной плотности, приведены в таблице. Видно, что для всех исследованных элементов они оказываются близкими. Большие чем у других элементов значения τ у углерода можно, по-видимому, объяснить тем, что при использованной методике в наблюдаемом времени жизни учитывается рециклинг в пристеночной области, и для углерода обратные потоки оказываются существенными. В пользу такого процесса свидетельствует и возрастание постоянных спада свечения линий ионов углерода при переходе от CIV к CII.

При изменении магнитного поля с 7 до 10,5 кГс время жизни C увеличивалось с 7 до 11 мсек. Уменьшение тока с 30 до 20 кА привело к сокращению времени жизни τ с 2 до 1,2 мсек.

Если $T_e \gg T_i$ и $\frac{d \ln n_e}{dr} \gg \frac{1}{z} \frac{d \ln n_i}{dr}$, что имеет место в наших экспериментах, и центр плазмы заряжен положительно относительно периферии, то радиальная скорость переноса примесей в спокойной плазме дается выражением [6]

$$v_{rI} = - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{q(r) c^2 m_i^{1/2} T_i^{3/2}}{R e^2 B^2} \left(\frac{d \ln T_i}{dr} + \frac{T_e}{T_i} \frac{d \ln n_e}{dr} \right). \quad (1)$$

Таким образом, характерное время выноса ионов примеси по порядку величины есть

$$\tau = \left\langle \frac{a}{v_{rI}} \right\rangle = \beta \frac{R a^2 B^2 e^2}{T_i^{3/2}(0) q(0) m_i^{1/2} c^2}. \quad (2)$$

Параметр β зависит от профилей температуры и концентрации. Так, например, положив в основном объеме токамака

$$T_i / T_i(0) = n_e / n_e(0) = T_e / T_e(0) = 1 - r^2 / a^2,$$

$$q(r) = q(0) (1 - r^2 / a^2)^{-1/2},$$

получим $v_{rI} = A r$, где

$$A = 2\sqrt{\frac{\pi}{2}} \left[1 + \frac{T_e(0)}{T_i(0)} \right] \frac{q(0) c^2 m_i^{1/2} T_i^{1/2}(0)}{R a^2 e^2 B^2}.$$

Спад концентрации примеси описывается при этом уравнением

$$\frac{\partial n_I}{\partial t} + A r \frac{\partial n_I}{\partial r} + 2 A n_I = 0, \quad (3)$$

которое соответствует экспоненциальному распаду с постоянной времени $\tau = \frac{1}{2} A$, так что параметр β в формуле (2) равен $\beta = \{ 2\sqrt{2\pi} \times [1 + \frac{T_e(0)}{T_i(0)}] \}^{-1}$. Для условий эксперимента в ФТ-1 параметр $\beta = 0,05$. На рис. 2 сопоставлены экспериментальные значения времени жизни примесей, полученные на разных токамаках и рассчитанные согласно (2) при $\beta = 0,05$

$$\tau (\text{мсек}) = 0,5 \cdot 10^{-2} \frac{R a^2 B^2}{q(0) T_i^{3/2}} \left(\frac{\text{см}^3 \cdot \text{кгс}^2}{\text{эВ}^{3/2}} \right). \quad (4)$$

Видно достаточно хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов. Отметим также, что с точностью до коэффициента порядка единицы (4) совпадает с неоклассическим временем теплопроводности основных ионов.

Таким образом, показано, что примесь, искусственно введенная в токамак на начальной стадии разряда, выводится из плазмы. Экспериментальные результаты подтверждают выводы работы [6], в которой предсказывается выталкивание примесей наружу вне зависимости от их сорта. Предложенная в работе методика позволяет легко изучать поведение примесей самых различных элементов и может оказаться полезной при детальном исследовании переноса примесей в токамаках.

Политехнический институт
им. М.И.Калинина

Поступила в редакцию
14 июля 1980г.

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

Литература

- [1] A.A.Cohen, J.L.Cecchi, E.S.Marmar. Phys. Rev. Lett., 35, 1507, 1975.
- [2] V.A.Abramov et al. 8-th Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys. Prague, 1977, p. 30.
- [3] V.V.Buzankin, V.A.Vershkov, Y.N.Dnestrovskiy. 7-th Int. Conf. on Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus. Res. Innsbruck, 1978.

- [4] В.В.Афросимов, Ю.С.Гордеев, А.Н.Зиновьев, А.А.Коротков. Физика плазмы, 5, 987, 1979.
- [5] TFR Group, *ibid* [2], p. 32.
- [6] В.А.Рожанский. Физика плазмы, 6, вып. 4, 1980.
- [7] В.Е.Голант, А.П. Жилинский, Б.В. Кутеев, В.А.Рожанский, И.Е.Сахаров, Л.Д. Цендин. Письма в ЖТФ, 3, 1035, 1977.
- [8] А.П.Жилинский, Б.В.Кутеев, М.М.Ларионов, А.Д.Лебедев, В.А.Рожанский, Л.Д.Цендин. Письма в ЖЭТФ, 30, 405, 1979.
-