

ИЗМЕРЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА-4

*Е.В.Александров¹⁾, В.В.Афросимов, Е.Л.Березовский,
А.Б.Извозчиков, В.И.Марасев, А.И.Кисляков,
Е.А.Михайлов, М.П.Петров, Г.В.Росляков²⁾.*

Методом активной корпускулярной диагностики с инжекцией в плазму пучка атомов впервые продемонстрирована возможность измерений локальной ионной температуры по рассеянию атомов на ионах. Распределения температуры и плотности ионов по радиусу плазмы получены использованием перезарядки ионов на искусственной мишени из атомов пучка.

Для измерений методом перезарядки на искусственной мишени [1, 2] и рассеяния пучка атомов на ионах плазмы [3] были использованы инжектор атомов [4], многоканальные анализаторы атомных частиц [5] и несколько детекторов пучка (рис. 1). Конструкция обеспечивала независимое сканирование сечения плазменного шнура инжектором атомов 1 и анализаторами атомных частиц 2 и 3. Это позволяло проводить опыты по рассеянию пучка атомов на ионах плазмы в диапазоне углов $\theta_{\text{рас}}$ от 0 до 16° и опыты по перезарядке на искусственной мишени практически во всем сечении плазменного шнура (соответствующая часть сечения плазменного шнура заштрихована на рис. 1). Использовались пучки атомов He^0 , H^0 и D^0 с параметрами: энергия $E_a = 8 \div 11$ кэВ, длительность импульса $\tau_{\text{п}} = 200$ мкс, эквивалентная плотность тока в центре камеры Токамака-4 $i_a = 10 \div 30$ мА/см².

При рассеянии монокинетического пучка атомов на ионах плазмы на малый угол θ в случае, когда скорость атомов v_a намного превосходит тепловую скорость ионов v_{iT} , температура ионов T_i связана с ушире-

¹⁾ ИАЭ им. И.В.Курчатова

²⁾ ИЯФ СО АН СССР

нием энергетического контура рассеянных атомов на полувывоте ΔE следующей зависимостью (3)

$$T_i = \frac{1}{16 \ln 2} \frac{m_2}{m_1} \frac{(\Delta E)^2}{E_a \theta^2}, \quad (1)$$

где m_1, m_2 — массы атомов пучка и ионов плазмы соответственно. Если же условие $v_a \gg v_{iT}$ не выполняется, то связь между T_i и ΔE становится более сложной и зависимость T_i от ΔE следует получать расчетным путем.

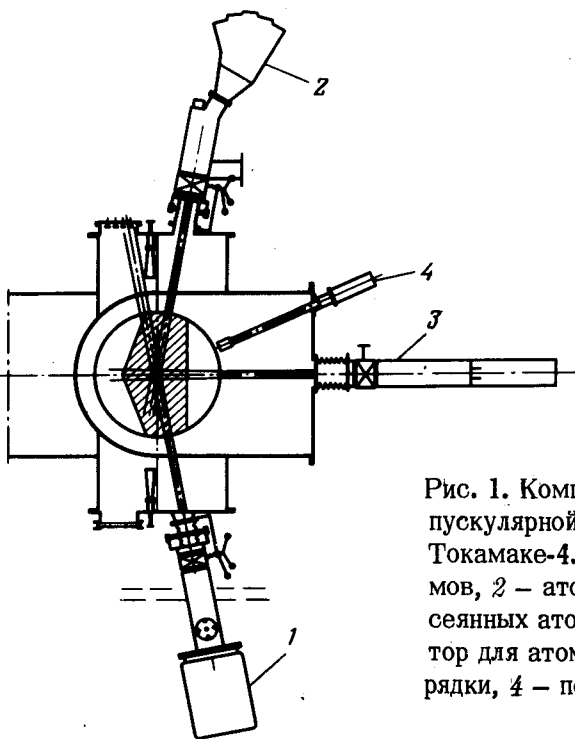


Рис. 1. Комплекс аппаратуры для корпускулярной диагностики плазмы на Токамаке-4. 1 — инжектор пучка атомов, 2 — атомный анализатор для рассеянных атомов, 3 — атомный анализатор для атомов искусственной перезарядки, 4 — подвижный детектор пучка

Для измерения T_i по рассеянию использовался пучок атомов He^0 , который более удобен по сравнению с пучками атомов H^0 и D^0 , так как практически не создает фона, связанного с обратной перезарядкой ионов, образовавшихся из атомов пучка, и имеет большое сечение рассеяния. Кроме того, для гелиевого пучка должны лучше разделяться пики, соответствующие рассеянию на ионах водорода и примесей [6]. Пример результатов по рассеянию представлен на рис. 2. Видно, что при повышении температуры частиц-мишеней происходит как уширение контура, так и возрастание средней энергии рассеянных атомов. Последнее вызвано тем, что в данном опыте v_a превосходило v_{iT} всего в 3 раза. Экспериментальный контур хорошо согласуется с расчетным, соответствующим $T_i = 210$ эВ. Погрешность определения T_i по наилучшему соответствию расчетных контуров экспериментальному оказывается не более ± 15 эВ. Видно также, что отсутствует сколько-нибудь значительный сигнал, соответствующий рассеянию на примесях.

В экспериментах по перезарядке ионов плазмы на атомах инжектируемого пучка возникающий поток атомов $J_{\text{акт}}$ регистрируется на фоне потока атомов J_0 , существующего из-за перезарядки ионов на атомах, естественно присутствующих в плазме. Отношение этих потоков для энергии регистрируемых атомов E составляет:

$$\frac{J_{\text{акт}}}{J_0} \sim \frac{n_{\text{п}}(s_1)N(s_1)\sigma_{\text{п}}(E_a)E_a^{1/2} \phi_i(E_1 s_1) L_{\text{п}} \exp(-\tau(s_1, a))}{L \int_0^L n_0(s)N(s) \langle \sigma_{\text{п}} v_{\text{отн}} \rangle \phi_i(E, s) \exp(-\tau(s, a)) ds} \quad (2)$$

где $n_{\text{п}}$, n_0 — концентрация атомов в пучке и плазме, N — концентрация протонов в плазме, ϕ_i — функция распределения протонов по энергии, s_1 — координата исследуемого объема плазмы, $L_{\text{п}}$, L — размеры пучка и плазмы в направлении наблюдения, $\tau(s, a)$ — "оптическая толщина" плазмы для атомов на пути от точки s до края плазмы, a — радиус сечения плазменного шнура, $\sigma_{\text{п}}$ — сечение резонансной перезарядки, $v_{\text{отн}}$ — относительная скорость ионов и атомов, $\langle \sigma_{\text{п}} v_{\text{отн}} \rangle$ — скорость перезарядки, усредненная по максвелловскому распределению ионов плазмы по энергиям.

В данном методе атомы пучка используются только в качестве мишеней для перезарядки ионов плазмы и не должны регистрироваться анализатором атомов. Поэтому в водородную плазму инжектировался дейтериевый пучок и использовался пятиканальный анализатор атомов, обеспечивающий масс-анализ и разделение атомов перезарядки H^0 и атомов пучка D^0 .

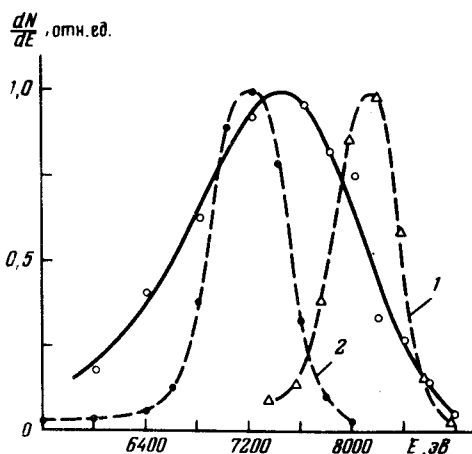


Рис. 2. Энергетические контуры при рассеянии пучка атомов He^0 в водородной плазме в точке, расположенной на расстоянии 8 см от центра камеры. 1 — $\theta = 0^\circ$ (исходный контур пучка); 2 — $\theta = 9^\circ$ — для рассеяния в газе до разряда; 3 — $\theta = 9^\circ$ — для рассеяния в плазме; сплошная кривая — расчет для $T_i = 210$ эВ. Для удобства сравнения контуры нормированы в максимуме

В эксперименте (при указанных параметрах пучка и относительно высокой концентрации атомов в плазме Токамака-4, которая в исследованном режиме составляла $(2 \div 3) \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$) отношение $J_{\text{акт}}/J_0$ достигало 2. Полученный экспериментально радиальный профиль T_i представлен на рис. 3, а. Здесь же показано расчетное распределение $T_i(r)$. При расчете учитывался кулоновский нагрев ионов и их охлаждение за счет неклассической теплопроводности, а также диффузии и перезарядки.

Указанный диапазон результатов расчета $T_i(r)$ связан с неопределенностью величин эффективного заряда плазмы, запаса устойчивости плазмы и концентрации атомов на краю плазменного шнура. Удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных данных указывает на классический характер энергобаланса ионов в Токамаке-4.

Измерение интенсивности пучка и потока атомов водорода, возникающих при перезарядке протонов на пучке, позволяет определить распределение плотности протонов $N(r)$ в плазме. Пример экспериментального профиля $N(r)$ приведен на рис. 3, б.

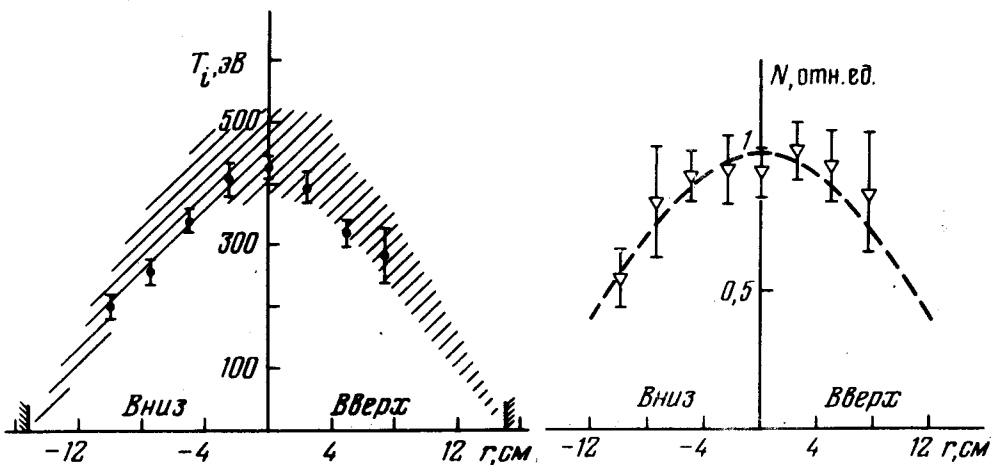


Рис. 3. а – Распределение ионной температуры T_i по радиусу r плазменного шнура при сканировании относительно экваториальной плоскости камеры установки. ● – результат экспериментов по перезарядке на искусственной мишени, заштрихованная область – результат расчета. Режим разряда: ток $I = 90$ кА, концентрация электронов $\bar{n}_e = 2 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$, продольное магнитное поле $H = 31$ кэ, электронная температура в центре плазмы $T_e(0) = 1$ кэВ; б – распределение плотности протонов N по радиусу плазменного шнура r в том же режиме разряда, пунктир – парабола $(1 - (r/20)^2)^2$.

В заключение авторы приносят глубокую благодарность В.С.Стрелкову и К.А.Разумовой за постоянный интерес к работе и всему персоналу Токамака-4 за обеспечение возможности проведения экспериментов.

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

Поступила в редакцию
31 июля 1978 г.
После переработки
23 ноября 1978 г.

Литература

- [1] А.М.Кудрявцев, А.Ф.Сорокин. Письма в ЖЭТФ, 18, 486, 1973.
[2] В.В.Афросимов, М.П.Петров, В.А.Садовников. Письма в ЖЭТФ, 18, 510, 1973.

- [3] В.Г.Абрамов, В.В.Афросимов, И.П.Гладковский, А.И.Кисляков, В.И.Перель, ЖТФ, 61, 1924, 1971.
- [4] Г.И.Димов, Г.В.Росляков, А.Я.Савкин. ПТЭ, 4, 29, 1977.
- [5] В.В.Афросимов, Е.Л.Березовский, И.П.Гладковский, А.И.Кисляков, М.П.Петров, В.А.Садовников. ЖТФ, 45, 56, 1975.
- [6] В.В.Афросимов, И.П.Гладковский, А.И.Кисляков. Письма в ЖТФ, 3, 10, 1977.
-