

РЕКОМБИНАЦИЯ ВОДОРОДА В КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

Ю.С.Гордеев, А.Н.Зиновьев, М.П.Петров

В работе изложена методика расчета и приведены данные о скорости радиационной рекомбинации водорода в плазме квазистационарных термоядерных установок (например, токамаков). Показано, что в современных токамаках концентрация атомов водорода может в ряде случаев определяться радиационной рекомбинацией.

Существующие в относительно небольшом количестве атомы водорода в плазме квазистационарных термоядерных установок (например, токамаков) приводят к заметному охлаждению ионов. Основным механизмом появления атомов в горячей плазме считается их проникновение вглубь плазмы со стенок за счет эстафетной перезарядки на ионах водорода. Концентрация атомов в современных токамаках, определяемая экспериментально и расчетным путем [1], составляет в центре плазмы $n_a(0) = 10^6 \div 10^7 \text{ см}^{-3}$ на границе плазмы $n_a(1) \sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

В условиях достаточно плотной плазмы с концентрацией $n \gtrsim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в современных токамаках следует учитывать еще один механизм появления атомов — радиационную рекомбинацию. Однако, экспериментальные и расчетные данные о сечениях рекомбинации в условиях электронной температуры $T_e \gtrsim 1 \text{ кэВ}$, типичной для токамаков, отсутствуют. В настоящей работе изложены методика и результаты расчетов скоростей рекомбинации в плазме с $T_e = 1,5 \div 10^5 \text{ эВ}$. Сделаны оценки концентрации атомов n_a^r , возникших в результате этого процесса, и проведено сравнение этих величин с концентрациями атомов n_a , проникших в плазму от стенок.

В работе [2] приведено следующее выражение для скорости рекомбинации при захвате электрона на все уровни иона водорода:

$$\langle \sigma_p v_e \rangle = 1,27 \cdot 10^{-13} \frac{(I/T_e)^{3/2}}{I/T_e + 0,59} \quad (\text{см}^3/\text{сек}). \quad (1)$$

Здесь v_e — скорость электронов в плазме, угловые скобки означают усреднение по распределению Максвелла, I — ионизационный потенциал атома водорода ($I = 13,6 \text{ эВ}$). Авторы работы [2] ограничивают область применимости формулы (1) условием $I/T_e > 1/32$, то есть сравнительно невысокими температурами $T_e \lesssim 400 \text{ эВ}$. Для современных токамаков и токамаков следующего поколения характерны величины $I/T_e \sim 10^{-2} \div 10^{-3}$. Ниже изложен проведенный нами расчет скоростей рекомбинации для широкого диапазона температур (от 1,5 до 10^5 эВ).

Известно, что сечение рекомбинации при захвате электрона на $1s$ -уровень в рамках нерелятивистской квантовой механики может быть вычислено точно:

$$\sigma_r(1s) = \frac{2^8 \pi^2 \hbar e^2}{3m^2 c} \frac{a^6}{(a^2 + 1)^2} \frac{e^{-4a \arctg 1/a}}{1 - e^{-2\pi a}}; \quad a = \frac{Ze^2}{\hbar v}. \quad (2)$$

Здесь m — масса электрона, \hbar — постоянная Планка, c — скорость света, e — заряд электрона, v — относительная скорость атома и электрона, Z — заряд ядра иона. В соответствии с [3] можно следующим образом связать полное сечение рекомбинации σ_r и сечение рекомбинации на $1s$ -уровень $\sigma_r(1s)$:

$$\sigma_r = \sigma_r(1s)(1,20 + 0,28a). \quad (3)$$

Соотношение (3) хорошо выполняется в диапазоне величин $a = 0 \div 3$ [3], что соответствует диапазону температур $T_e \gtrsim Z^2 \cdot 1,5 \text{ эВ}$. С учетом (2)

и (3) получаем:

$$\langle \sigma_r v_e \rangle = Zf(x), \quad x = l/T_e, \quad (4)$$

$$f(x) = Ax^{3/2} \int_0^{\infty} \frac{e^{-xu^2}}{(u^2 + 1)^2} \frac{e^{-\frac{4}{u} \operatorname{arctg} u}}{1 - e^{-2\pi/u}} (1,20u + 0,28) du, \quad (5)$$

$$A = \frac{1024}{3} \pi \sqrt{\pi} \frac{e^2}{mc^2} \frac{e^2}{\hbar} \frac{\hbar}{mc} = 4,524 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3/\text{сек}. \quad (6)$$

Интегрирование выражения (5) было проведено нами численно. На рис. 1 приведены результаты нашего расчета величины $\langle \sigma_r v_e \rangle$ для водорода (кривая (1)) в зависимости от T_e , а также значения $\langle \sigma_r v_e \rangle$, рассчитанные по формуле (1) (кривая (2)). Видно, что оба метода расчета $\langle \sigma_r v_e \rangle$ хорошо согласуются в диапазоне $T_e < 321$. Что касается нашего расчета, то он применим в случае рекомбинации любого иона с ионизованной $1s$ -оболочкой. Применимость расчета в области высоких температур ограничивается только необходимостью учета релятивистских поправок.

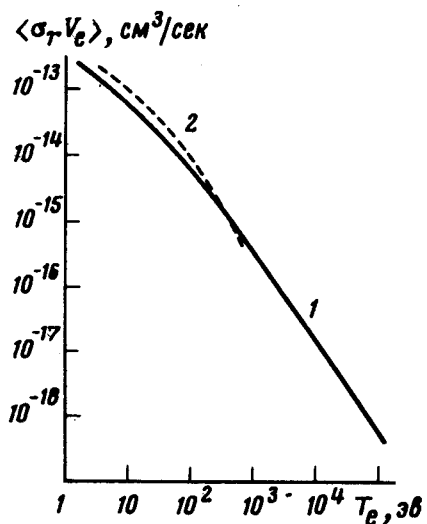


Рис. 1. Зависимость скорости рекомбинации водорода от электронной температуры плазмы. Кривая 1 — расчет авторов настоящей работы, кривая 2 — расчет по формуле (1) [2]

Рассчитанные величины $\langle \sigma_r v_e \rangle$ могут быть использованы для оценки концентрации атомов водорода, возникших в горячей плазме термоядерных установок из-за радиационной рекомбинации:

$$\frac{n_a^r}{n} = \frac{\langle \sigma_r v_e \rangle}{\langle \sigma_i v_e \rangle + \langle \sigma_i v_i \rangle}. \quad (7)$$

Здесь n — плотность плазмы, $\langle \sigma_i v_e \rangle$ — скорость ионизации атомов водорода электронами, $\langle \sigma_i v_i \rangle$ — скорость ионизации атомов водорода протонами, v_i — относительная скорость атомов и протонов. Используя известные данные о скоростях ионизации электронами [4] и протонами [5], можно построить зависимость отношения n_a^r/n от температуры плазмы T . Такая зависимость приведена на рис. 2 (кривая 1).

Концентрацию атомов n_a^r интересно сравнить с концентрацией атомов n_a , проникших в плазму от стенок за счет эстафетной перезарядки.

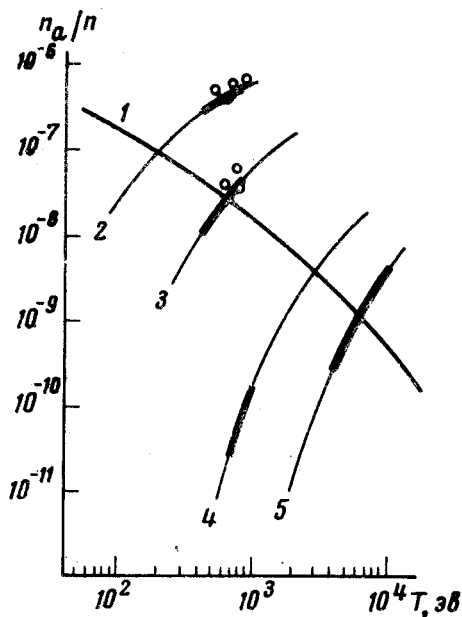


Рис. 2. Отношение концентрации атомов к концентрации плазмы в центральной области плазменного шнура токамаков в зависимости от температуры плазмы: 1 — атомы рекомбинационного происхождения, 2 — атомы перезарядки в Токамаке-4 ($n = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $a = 17 \text{ см}$), 3 — атомы перезарядки в Токамаке-10 ($n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $a = 35 \text{ см}$), 4 — атомы перезарядки в "Алкаторе" ($n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $a = 8 \text{ см}$) 5 — атомы перезарядки в токамаке-реакторе ($n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $a = 150 \text{ см}$).

Жирными отрезками на кривых 2 + 5 показаны диапазоны рабочих температур соответствующих токамаков. На кривых 2 и 3 кружками показаны экспериментальные значения концентрации атомов, определенные по выходящему из плазмы потоку атомов [1, 8]

На основании решения кинетического уравнения для функции распределения атомов в плазме токамаков, поступающих с поверхности вглубь плазменного шнура [6], можно написать следующее выражение для концентрации атомов $n_a(0)$ на оси плазменного шнура:

$$n_a(0) = \frac{1,23 \cdot 10^{10}}{\sqrt{T^r}} \exp\left\{-\frac{6 \cdot 10^{-14} n a}{\sqrt{T^r}}\right\}. \quad (8)$$

Здесь a — радиус сечения плазменного шнура токамака в см. Выражение (8) написано с использованием того факта, что плотность атомов на границе плазменного шнура $n_a(1) = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ (типичное для токамаков значение, неоднократно измеренное экспериментально). Считается, что атомы падают на поверхность плазмы с энергией $\sim 2 \text{ эв}$. Зависимость величин отношений n_a/n от температуры для современных токамаков, а также для большого токамака-реактора, проектируемого в настоящее время (см., например [7]), изображены на рис. 2 (кривые 2+5). Рис. 2 показывает, что токамаки масштаба Токамака-4 оперируют в режимах, когда концентрация атомов в основном определяется газообменом плазмы со стенками. В токамаке-10, а также в токамаке-реакторе рекомбинация может играть заметную роль в образовании атомов в плазме. В американском токамаке "Алкатор", для которого характерна относительно высокая плотность плазмы ($n \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$) [9], концентрация атомов в плазме практически полностью определяется рекомбинацией.

Таким образом, приведенные на рис. 2 зависимости показывают, что при рассмотрении материального и энергетического баланса плазмы современных токамаков с учетом роли атомов в этих обоих балансах следует в ряде случаев учитывать радиационную рекомбинацию водорода.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе

Академии наук СССР

Литература

Поступила в редакцию
21 января 1977 г.

- [1] А.Б.Извозчиков, М.П.Петров. Физика плазмы, 2, 212, 1976.
 - [2] Л.А.Вайнштейн, И.И.Собельман, Е.А.Юков. Сечения возбуждения атомов и ионов электронами., М., изд. Наука, 1973.
 - [3] В.И.Коган. Сб. Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций. М., изд. АН СССР, 1958, т. 3, стр. 99.
 - [4] W.L.Fite, R.T.Brackmann. Phys. Rev., 112, 1141, 1958.
 - [5] W.L.Fite, R.F.Stebbins, D.G.Hummer, R.T.Brackmann. Phys. Rev., 119, 663, 1960.
 - [6] О.В.Константинов, В.И.Перель. ЖТФ, 30, 1485, 1960.
 - [7] Ю.Н.Днестровский, Д.П.Костомаров, С.Е.Лысенко. Препринт ИАЭ-2494, Москва 1975 г.
 - [8] А.Б.Берлизов, Н.Л.Васин, В.П.Виноградов, Е.П.Горбунов, Ю.Н.Днестровский, В.С.Заверяев, А.Б.Извозчиков, С.Е.Лысенко, Г.Е.Ноткин, М.П.Петров и др. Письма в ЖЭТФ, 23, 502, 1976.
 - [9] E.Apgar et al. 6-th Int. Conf on Plasma Physics and Contr. Nucl. Fusion, Berhtesgarten, 1976, IAEA CN35/A5.
-