

УДК 533.951

## ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ОТ ИЗОТОПИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЛАЗМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ТОКАМАКЕ FTU

*А. Н. Романников*

ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований,  
Троицк, Моск. обл., Россия

*Во время смены рабочего газа (водорода на дейтерий) в течение определенного количества разрядов токамак работает на смеси газов. Для токамака FTU (Фраскати) во время подобной замены из анализа потоков нейтралов перезарядки и стандартного для FTU расчета энергетического времени жизни  $\tau_E$  получена зависимость  $\tau_E$  от параметра  $A$ . Показано, что в области  $A \cong 1,4-1,6$  происходит увеличение энергетического времени жизни примерно в два раза.*

В настоящее время на крупных токамаках достигнуты термоядерные параметры. Но вопросы удержания энергии и частиц в подобных магнитных системах до сих пор остаются не до конца понятными. Таким, не находящим объяснения в рамках неклассической теории, остается вопрос, связанный с улучшением удержания плазмы с увеличением атомного веса рабочего газа. Наиболее распространенный скейлинг зависимости энергетического времени жизни  $\tau_E$  от изотопического атомного веса  $A$  представляется в виде  $\tau_E \sim A^a$ , где коэффициент  $a$  составляет для разных токамаков от 0 до 1, группируясь ближе к 0,5 [1, 2], при этом основная масса сравнительных экспериментов проведена при  $A = 1$  (водород) и  $A = 2$  (дейтерий). Так как реальные эксперименты часто проводятся на смеси водорода с дейтерием, скейлинг для  $\tau_E$  при  $1 < A < 2$  представляет интерес. Считается [1], что приведенный выше скейлинг в этой области для  $A$  сохраняется. В работе [1] приводятся также графики зависимости  $\tau_E$  от средней электронной плотности плазмы в токамаке ASDEX в омическом режиме для водородной плазмы для первого разряда после замены рабочего газа на дейтерий и для седьмого разряда после этой замены (рис. 1) [1]. При низких плотностях плазмы, только после седьмого разряда появляется изотопический эффект, при этом он становится заметен при определенной средней электронной плотности, равной  $n_1$ . Можно предположить, что после смены рабочего газа водород из диверторных пластин и стенки токамака добавляется в дейтерий, после седьмого разряда  $A$  становится больше некоего  $A_{кр}$  и пороговым образом возникает изотопический эффект. К сожалению, в работе [1] не приводится зависимости  $A$  от средней плотности.

Так как специальных программ, в которых токамак работал бы на разных смесях рабочего газа, на крупных установках практически не проводилось, то для исследования скейлинга при нецелых  $A$  было предложено воспользоваться сменой рабочего газа. Если токамак работает на чистом водороде, а затем переводится на чистый дейтерий, насыщенная водородом стенка будет отдавать его в разряд, приводя к тому, что токамак реально начинает работать на смеси газов. Пока водород на стенке в основном не заменится на дейтерий, будет происходить изменение изотопического состава плазмы от разряда к разряду.

На токамаке FTU (Фраскати, Рим, Италия) ( $R = 93$  см,  $a = 30$  см,  $B_T \leq 8$  Т,  $I_p \leq 1,6$  МА, длительность разряда  $\sim 1,1$  с) смена рабочего газа проводилась несколько раз.

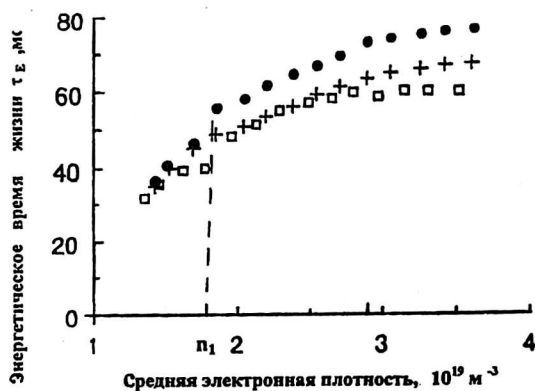


Рис. 1. Зависимость энергетического времени жизни от линейной средней электронной плотности экспериментов со сменой изотопического состава плазмы водорода на дейтерий:

- — начальный разряд с чистым водородом;
- + — первый разряд в D;
- — седьмой разряд в D

На фоне различных физических программ в базе данных FTU был найден один ряд омических разрядов от # 7087 до # 7108, в которых водород заменен дейтерием при относительно одинаковых основных параметрах плазмы. Определяющая часть этих разрядов приведена в таблице. Все данные приведены с разрядов для 0,7 с. Энергетическое время жизни  $\tau_E$  вычисляется стандартным для FTU способом. Относительные концентрации водорода и дейтерия в центральных областях плазмы токамака вычисляются из анализа потоков нейтралов перезарядки, даваемых корпускулярным анализатором [3]. Корпускулярный анализатор на FTU позволяет в счетном режиме по десяти энергетическим каналам получать потоки для водорода и одновременно для дейтерия с относительным разрешением по массе лучше 10 %. Потоки нейтралов собирались с 0,69 с по 0,71 с разряда, а ионные температуры водорода и дейтерия для всех приведенных разрядов были примерно одинаковы и равнялись  $\sim 1,2$  КэВ.

Номер разряда	$V_T, T$	$\bar{n}_e, 10^{19} \text{ м}^{-3}$	$I, \text{ MA}$	$A$	$\tau_E, \text{ мс}$
7087	6	7	0,7	0,10	25
7089	6	7	0,7	0,12	23
7090	6	7	0,7	0,13	27
7094	6	6	0,7	0,32	21
7099*	7,1	12	0,7	0,46	48
7100*	7,1	12	0,7	0,63	51
7105	6	7	0,5	0,75	51
7108	7,1	7	0,7	0,74	53
7170	6	7,5	0,5	1,00	53

Как видно из таблицы, в области  $n_D/(n_D + n_H) + 1 = A > 1,4$  (где  $n_D$  — плотность дейтерия в центральных областях плазмы;  $n_H$  — плотность водорода) начинается резкое увеличение энергетического времени жизни.

После корректировки  $\tau_E$  (в особенности для разрядов 7099 и 7100) со скейлингом для подобных разрядов на FTU [4, 5] в виде  $\tau_E \sim n_e^{0,55} B_t^{0,2}$ , был построен график  $\tau_E$  от  $A$  (рис. 2). Обратим внимание на то, что дейтериевые разряды с параметрами, подобными параметрам разрядов со звездочками из таблицы, согласно [4], укладываются в приведенный скейлинг. Предполагается, что подобная корректировка выделила зависимость энергетического времени жизни только от  $A$ . Из рис. 2 видно, что изотопический эффект для приведенного ряда разрядов пороговым образом появляется в области  $A \sim 1,4-1,6$ , при этом  $\tau_E$  увеличивается примерно в два раза.

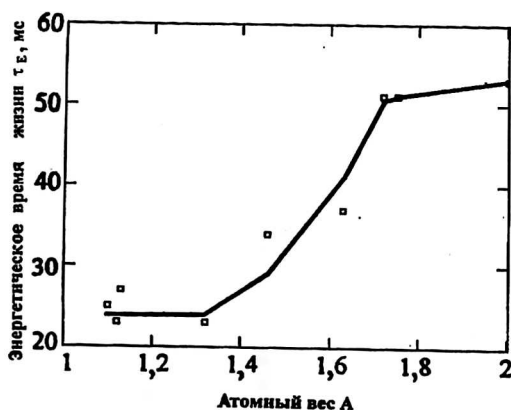


Рис. 2. Зависимость энергетического времени жизни от эффективного изотопического веса рабочего газа в токамаке FTU для различных разрядов (из таблицы)

Таким образом показано, что для FTU существует область параметров плазмы, в которой изотопический эффект появляется пороговым образом при эффективном атомном весе ионов плазмы  $A \sim 1,4-1,6$ . Подобный порог, возможно, существует в экспериментах, представленных на рис. 1. Так как в рамках неклассической теории не находит объяснения наблюдаемый в экспериментах скейлинг  $\tau_E$  от изотопической массы [1], полученный результат представляется интересным.

## Литература

1. Bessenrodt-Weberpals M., Wagner F., and ASDEX team//IPP, 1993, № 3, P. 189.
2. Alladio F., Berton F., Bracco G., et al.//Europhys. Conf. Abstr, 1992, 16 c/1, 23.
3. Bartiromo R., Bracco G., Brusati M., Grosso G., Mantovani S., Tilia B. and Zanza V.//Rev. Sci. Instrum, 1987. V 58, P. 788.
4. Bombarda F., Bracco G., et. al.//ENEА-RT/ERG/FUS, June, 1993.
5. Bartiromo R. ENEА-RT/NUCL/91/07, July, 1991.

Выражаю благодарность доктору V. Zanza, доктору G. Bracco и B. Tilia за предоставленный экспериментальный материал и полезные обсуждения.

## FEATURES OF THE ENERGY CONFINEMENT TIME DEPENDING FROM PLASMA ISOTOPIC COMPOSITION IN FTU TOKAMAK

*A. N. Romannikov*

RRS RF Troitsk Institute of Innovatory and Thermonuclear investigations, Troitsk, Russia.

*During changing of gas on tokamak (hydrogen to deuterium) there is situation when tokamak actually operates on the mixing of H and D. For FTU tokamak, Fraskati, from analysis charge exchange fluxes during transition of gas and analysis  $\tau_E$  (energy confinement time) experimental dependence  $\tau_E$  from parameter A is obtained. It is shown, in the field  $A \sim 1,4-1,6$  the energy confinement time  $\tau_E$  increasing approximately two time.*