

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХВАТА И УДЕРЖАНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ТАЙЛАХ ТОКАМАКА TORE SUPRA

А.А. Кузьмин, А.А. Айрапетов, Л.Б. Беграмбеков, П.А. Шигин (ГОУ ВПО Московский инженерно-физический институт (государственный университет), Москва, Россия)

В работе проведён анализ захвата и удержания изотопов водорода в тайлах токамака Tore Supra, работавших в качестве элементов первой стенки, методом термодесорбционной спектрометрии. Плотность потока ионов на тайлы равнялась $(1-2) \cdot 10^{19}$ ат./ $(с \cdot м^2)$, энергия бомбардирующих ионов была порядка 100 эВ, внедрённая доза дейтерия составляла величину $\sim 5 \cdot 10^{23}$ ат./ $м^2$. Температура поверхности тайлов достигала 500—600 К. В работе показано, что основная часть дейтерия захвачена в приповерхностных областях тайлов, в том числе в перенапылённых слоях. Для захвата в поверхностном слое было получено соответственно для дейтерия и водорода $1,5 \cdot 10^{22}$ и $0,4 \cdot 10^{22}$ ат./ $м^2$. Для захвата в объёме тайлов получены значения $8,8 \cdot 10^{20}$ и $1,3 \cdot 10^{22}$ ат./ $м^3$.

Ключевые слова: водород, дейтерий, графит, термодесорбционная спектрометрия.

STUDY OF HYDROGEN ISOTOPE CAPTURE AND RETENTION IN THE FIRST WALL TILES OF TORE SUPRA TOKAMAK. A.A. KUZMIN, A.A. AYRAPETOV, L.B. BEGRAMBEKOV, P.A. SHCIGIN. Retention of hydrogen isotopes in Tore Supra tiles was investigated by means of thermal desorption spectrometry. The ion flux density on the tiles was $(1-2) \cdot 10^{19}$ at./ $(s \cdot m^2)$, the irradiation ion energy was about 100 eV, the implantation dose was about $5 \cdot 10^{23}$ at./ $м^2$. Temperature of the surface of the tiles reached 500—600 K. It is proved in this paper, that the main amount of deuterium is trapped in the near surface layers and in redeposited layers. The trapped concentration of deuterium and hydrogen in the near surface layers is $1.5 \cdot 10^{22}$ and $0.4 \cdot 10^{22}$ at./ $м^2$ correspondingly. The trapped concentration of deuterium and hydrogen in the bulk is $8.8 \cdot 10^{20}$ and $1.3 \cdot 10^{22}$ at./ $м^3$ correspondingly.

Key words: hydrogen, deuterium, graphite, thermal desorption spectrometry.

В работе был проведён термодесорбционный (ТДС) анализ захвата и удержания изотопов водорода в тайлах токамака Tore Supra, работавших в качестве элементов первой стенки в период с 1995 по 1999 г.

Выявлена специфика захвата и термодесорбции водорода и дейтерия из графита, облучённого в плазме токамака.

Исследование проводилось в лаборатории на стенде для термодесорбционного анализа. Установка предназначена для облучения образцов в плазме и измерения количества захваченного газа методом ТДС (рис. 1).

Для проведения ТДС-анализа исследуемый образец 1 помещается в плазменную камеру 2. После установки образца весь объём вакуумной камеры 3 откачивается через трубопровод откачки 4. Стенки плазменной камеры прогреваются излучением катода 5 для обезгаживания. В данном стенде возможно зажигание тлеющего разряда 6 между накальным катодом 5 и анодом 7. Подача рабочего газа производится через трубку 8. Для облучения образца ионами или электронами плазмы 6 на образец подается соответствующий потенциал относительно неё. Термодесорбция захваченных газов из образца производится при помощи нагревателя 9. Поток термодесорбции регистрируется масс-спектрометром 10. Температура образца регистрируется W—Re-термопарой, образец может прогреваться до 1600 К.

Для ТДС-анализа были взяты два тайла из разных областей первой стенки токамака, что схематически изображено на рис. 2. Из тайлов вырезались по шесть образцов: один — с фронтальной поверхности (образцы

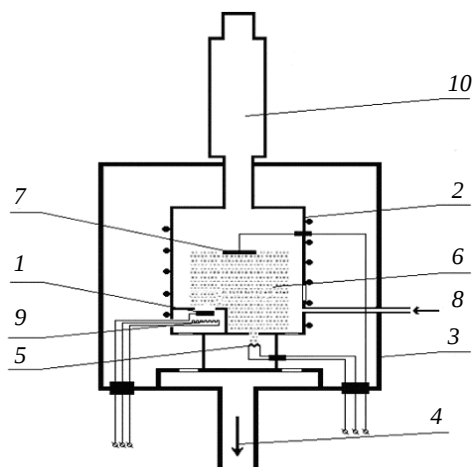


Рис. 1. Схема установки для ТДС-анализа: 1 — образец; 2 — плазменная камера; 3 — вакуумная камера; 4 — откачка; 5 — катод; 6 — плазма; 7 — анод; 8 — подача газа; 9 — нагреватель образца; 10 — масс-спектрометр

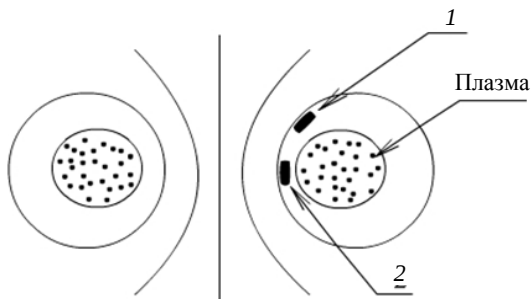


Рис. 2. Положение исследованных тайлов на первой стенке токамака

1-1 и 2-1), по одному — с боковых поверхностей (образцы 1-5, 1-6, 2-5 и 2-6) и три — с различных глубин тайлов (1-2, 1-3, 1-4, 2-2, 2-3, 2-4), (рис. 3).

За время пребывания в токамаке, тайлы подвергались облучению плазмой при следующих параметрах. Плотность потока ионов на тайлы внутреннего обвода первой стенки равнялась $(1-2) \cdot 10^{19}$ ат./ $(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, энергия бомбардирующих ионов была порядка 100 эВ, внедрённая доза дейтерия составляла величину $\sim 5 \cdot 10^{23}$ ат./ м^2 . Температура поверхности тайлов достигала 500—600 К. За все время облучения тайлов в токамаке было проведено более 20 чистящих тлеющих разрядов на гелии, в результате чего стенка облучалась ионами гелия с энергией 600 эВ.

Общее количество выделившегося водорода и дейтерия в составе D_2 , H_2 , HD, CD_4 и CH_4 из образцов тайлов 1 и 2 представлено на рис. 4. На рисунке видно, что захват дейтерия превосходит захват водорода на образцах, вырезанных с фронтальной поверхности тайлов в 1,5—3 раза. Обратное наблюдается для образцов, вырезанных из объёма тайлов. Захват изотопов водорода в образцах, вырезанных с разных сторон боковых поверхностей тайлов (образцы 5 и 6), различается, что говорит о зависимости захвата от ориентации боковой поверхности тайлов. Захват дейтерия в образце 2-1 тайла 2 больше в 1,3 раза, а захват водорода меньше в 1,5 раза, чем захват в образце 1-1. В то же время захват дейтерия в образцах, вырезанных с боковой поверхности тайла 2, меньше в 1,2—3,5 раза, чем в образцах тайла 1. Вместе с тем следует отметить, что различие между выделением обоих газов с обоих боковых и с фронтальных поверхностей не превышает 2 раз. Для образцов, вырезанных из объёма тайлов, десорбция изотопов водорода из образцов тайла 2 примерно равна или слабо превосходит (в 1,2—1,4 раза) десорбцию из образцов тайла 1. Количество водорода и дейтерия, выделившихся из образцов 3, 4, 5 исследованных тайлов, было меньше, чем из образцов 1-1 и 2-1. Эта разница была довольно маленькой для водорода (в 5 раз) и достигала двух порядков величины для дейтерия (см. рис. 4). Согласно измерениям распределения внедрённого дейтерия по глубине методом ядерных реакций [1] основная часть дейтерия захватывается в приповерхностных слоях углеграфитового композита (CFC), т.е. на глубинах, сравнимых с толщиной зоны внедрения ионов. Предварительное электронномикроскопическое исследование обнаружило на поверхности тайлов перенапылённый (переосаждённый) углеродный слой (рис. 5).

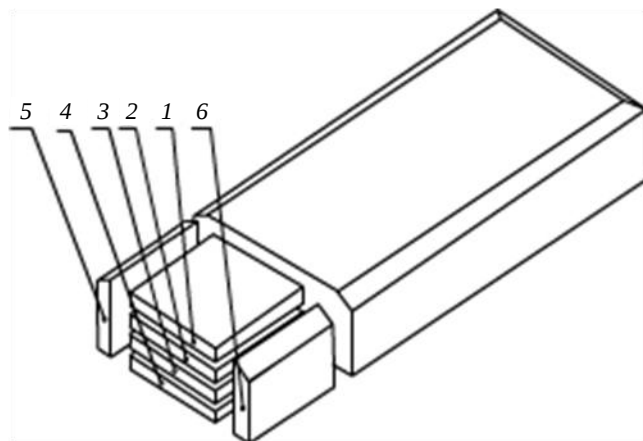


Рис. 3. Схема подготовки образцов из тайла

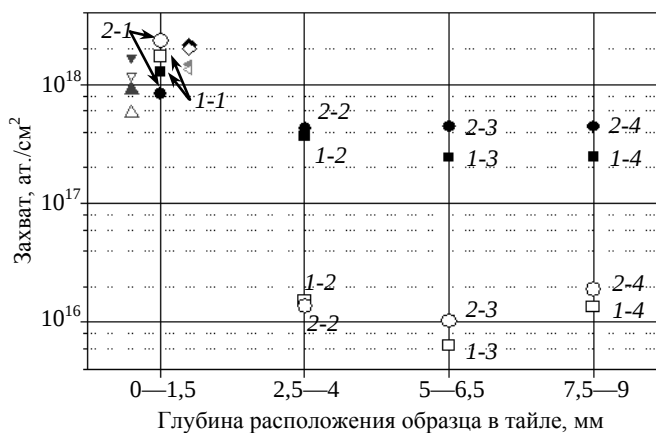


Рис. 4. Десорбция дейтерия и водорода из образцов, вырезанных с поверхности и разных глубин тайлов 1 и 2 (прозрачные значки — дейтерий, сплошные — водород): ♦, ◇ — 1-5; ◀, ▶ — 1-6; ▲, △ — 2-5; ▼, ▽ — 2-6

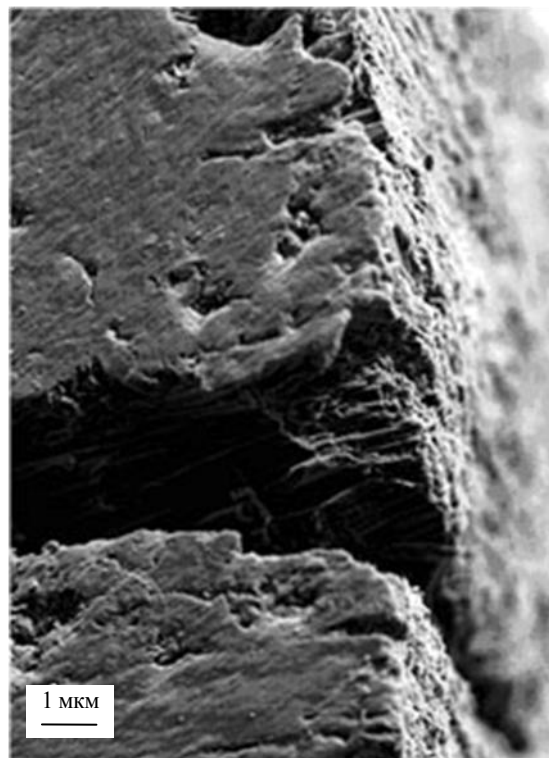


Рис. 5. Перенапылённый углеродный слой на поверхности тайла

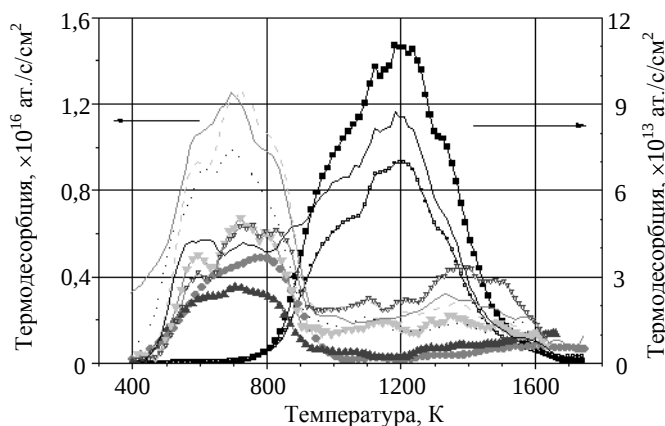


Рис. 6. Спектры термодесорбции дейтерия и водорода из образцов тайла 2 в составе H_2 , HD и D_2 : спектры H_2 умножены на 3: — 2-1, — 2-2, — 2-3, ----- — 2-4; спектры HD: ◻ — 2-1, ▽ — 2-4; спектры D_2 : ■ — 2-1, • — 2-2, ▲ — 2-3

Спектры термодесорбции дейтерия и водорода в составе D_2 , H_2 и HD из различных образцов тайла 2 представлены на рис. 6. Можно отметить, что все спектры из образца 2-1 содержат интенсивный пик в средней части спектра, отличая их от спектров из образцов, вырезанных из объёма тайла. Пик на ТДС-спектре в этом интервале температур появляется в результате захвата частиц при плазменном облучении поверхности образцов 1-1 и 2-1. Формы спектров термодесорбции D_2 , H_2 и HD из одного и того же образца подобны (см. рис. 6). Это говорит о том, что водород и дейтерий находятся в ловушках одинакового типа. Основной пик спектра термодесорбции из образцов, вырезанных из поверхностной части тайлов

(образцы 1-1 и 2-1), и плечи основных пиков располагаются в том же температурном интервале, что и спектры термодесорбции образцов из CFC, облучённых в лабораторных экспериментах ионами с энергией 500, 800 и 1000 эВ, плотность потока ионов $j = 10^{20}$ ат./($m^2 \cdot c$).

В этом же температурном диапазоне располагались максимумы спектров термодесорбции из углеродных слоёв, напылённых в лабораторной установке в атмосфере водорода, а также слоёв, которые после напыления были облучены в водородной плазме [2]. На основании этих лабораторных экспериментов можно утверждать, что концентрация дейтерия в перенапылённом слое составляла 20—30% ат. Это значит, что весь десорбировавшийся дейтерий (за исключением 5—10% ат., по-видимому, выделявшихся из CFC-структуры образцов 1-1 и 2-1) мог быть сосредоточен в перенапылённом слое толщиной примерно 0,5—0,6 мкм. Оценки толщины перенапылённого слоя, сделанные при помощи электронной микроскопии, дают значение толщины этого слоя порядка 0,4—0,5 мкм. Поэтому мы склонны думать, что основная часть дейтерия, выделившегося из образцов 1-1 и 2-1, находилась в перенапылённом слое на их поверхности. А захват дейтерия в перенапылённый слой происходил при его образовании и последующем плазменном облучении.

Выделение водорода из высокотемпературных ловушек говорит о том, что водород уже находился в тайлах до облучения или был имплантирован в тайлы во время работы токамака. В обоих случаях водород может быть захвачен в ловушки, созданные ионами дейтерия. В то же время мы не можем исключить того, что некоторые ловушки, созданные ионами дейтерия во время облучения, могут остаться незаполненными. В них может захватываться водород из молекул H_2O при нахождении тайлов в атмосфере.

Спектры термодесорбции D_2 , H_2 и HD из образцов, вырезанных из объёма, имеют максимум в низкоэнергетической части (см. рис. 6) и продолжаются до 1600—1700 К и, возможно, даже дальше. Формы высокотемпературных частей спектра для разных газов подобны для одного образца. Но их интенсивность уменьшается в ряду H_2 —HD— D_2 . Этот факт позволяет предположить, что дейтерий был захвачен в водородные ловушки благодаря процессам изотопного обмена. Наличие водорода в CFC во время облучения дейтерием способствует проникновению дейтерия в объём тайла и делает возможным захват дейтерия в объёме.

Десорбция CD_4 и CH_4 регистрировалась для всех исследуемых образцов. Образование метана и дейтерометана происходит в поверхностном слое тайлов и в объёме. Подсчёт показывает, что количество дейтерия, десорбирующегося в виде CD_4 , составляло несколько десятков процентов от всей десорбции дейтерия для образцов, вырезанных с поверхности тайлов, и около 10% ат. для образцов из объёма тайлов. Десорбция CH_4 была около 10% ат. для всех образцов. Десорбция тяжёлых углеводородов была незначительна.

В работе [3] приходят к выводу, что углеводороды, содержащие такие же атомы, как и внедряемые, образуются не только в зоне торможения ионов. Они также образуются за зоной торможения, и радиа-

сионно-индуцированные дефекты, проникающие из зоны торможения, работают как движущая сила для образования углеводородов в объёме. Настоящие результаты показывают в первую очередь, что в CFC, облучённом дейтерием, CD_4 образуется на глубине в несколько миллиметров. В настоящее время тот же вывод не может быть сделан для водорода. Мы не можем полностью исключить возможность формирования метана в процессе длительного нахождения тайлов в атмосфере или после подготовки образцов.

Для приближенной оценки полного захвата водорода и дейтерия в тайлы токамака Tore Supra был посчитан средний захват в приповерхностных слоях и объёме тайлов. Уже упоминалось, что захват дейтерия в приповерхностных слоях образцов, вырезанных с поверхности тайлов, намного превосходит захват дейтерия в объёме. Таким образом, происходит захват дейтерия в приповерхностных слоях за полную десорбцию дейтерия из образцов, вырезанных с поверхности тайлов.

Общее количество дейтерия и водорода в токамаке было посчитано, исходя из следующих предположений. Среднее количество дейтерия и водорода в обоих исследованных тайлах было взято за среднее для всех тайлов токамака. Общая площадь первой стенки, покрытой тайлами, составляет 100 м^2 (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Среднее количество водорода и дейтерия, удерживаемого в тайлах 1 и 2

Тайл	Удержание в поверхностных слоях, ат./м ²		Удержание в объёме, ат./м ³	
	Водород	Дейтерий	Водород	Дейтерий
1	$0,4 \cdot 10^{22}$	$1,7 \cdot 10^{22}$	$1,0 \cdot 10^{22}$	$7,8 \cdot 10^{20}$
2	$0,3 \cdot 10^{22}$	$1,3 \cdot 10^{22}$	$1,5 \cdot 10^{22}$	$9,6 \cdot 10^{20}$

Из табл. 2 видно, что около $1,6 \cdot 10^{24}$ атомов дейтерия ($0,9 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot \text{м}^3$) и примерно то же количество атомов водорода ($0,9 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot \text{м}^3$) было захвачено в тайлах токамака ТС после завершения кампании. Около 5% ат. общего количества дейтерия было захвачено в объёме тайлов. 75% ат. водорода было захвачено в объёме тайлов.

Т а б л и ц а 2. Содержание дейтерия и водорода в приповерхностных слоях и объёме всех тайлов токамака Tore Supra ($TS_{об} \approx 0,9 \text{ м}^3$, $TS_{нов} \approx 100 \text{ м}^2$)

Газ	Среднее удержание в поверхностных слоях тайлов 1 и 2, ат./м ²	Среднее удержание в объёме в тайлах 1 и 2, ат./м ³	Удержание в поверхностных слоях тайлов во всех тайлах Tore Supra, ат.	Удержание в объёме во всех тайлах Tore Supra, ат.	Удержание во всех тайлах Tore Supra, ат.
Водород	$0,4 \cdot 10^{22}$	$1,3 \cdot 10^{22}$	$0,4 \cdot 10^{24}$	$\sim 1,2 \cdot 10^{24}$	$\sim 1,6 \cdot 10^{24}$
Дейтерий	$1,5 \cdot 10^{22}$	$8,8 \cdot 10^{20}$	$1,5 \cdot 10^{24}$	$\sim 7,9 \cdot 10^{22}$	$\sim 1,6 \cdot 10^{24}$

Очевидно, что такое большое количество удерживаемых частиц ещё не является полной сорбционной ёмкостью тайлов. Можно предположить, что захват обоих изотопов водорода будет увеличиваться, если время облучения тайлов будет увеличено. В частности, захват во время длительных разрядов может быть гораздо большим.

В работе показано, что существенная часть дейтерия захватывалась в приповерхностную область тайлов из окружающего газа. Сделано заключение о том, что большая часть дейтерия удерживается в приповерхностном слое, в том числе в перенапылённом углеродном слое. Нахождение водорода в CFC во время облучения стимулирует проникновение дейтерия и его захват в объёме тайлов.

Образование дейтерометана и метана зарегистрировано как в поверхностных областях тайлов, так и в объёме. Количество дейтерия и водорода, десорбированного в виде CD_4 и CH_4 соответственно, достигало нескольких десятков процентов общей десорбции для поверхностных областей тайла и составляло около 10% ат. десорбции из объёма. Десорбция остальных углеводородов была незначительна.

Близость величин захвата изотопов водорода в тайлах различных областей стенки сделала возможным на основе полученных результатов подсчитать средние количества дейтерия и водорода, захватываемых в различные области исследованных тайлов, и оценить общие количества водорода и дейтерия, удерживаемых в тайлах первой стенки токамака. Для захвата в поверхностном слое было получено соответственно для дейтерия и водорода $1,5 \cdot 10^{22}$ и $0,4 \cdot 10^{22}$ ат./м². Для захвата в объёме тайлов получены значения $8,8 \cdot 10^{20}$ и $1,3 \cdot 10^{22}$ ат./м³.

Оценки говорят, что примерно $1,6 \cdot 10^{24}$ ат. дейтерия ($0,9 \cdot 10^4$ Па·м³) и такое же количество водорода было сорбировано во всех тайлах Tore Supra к концу кампании. Около 5% ат. общего количества дейтерия и 75% ат. водорода захвачено в объёме тайлов.

Результаты работы дают основание полагать, что захват примерно половины всего напускаемого в установку дейтерия в первой стенке, отмечаемый при длинных импульсах токамака Tore Supra, может быть объяснён захватом в тайлы первой стенки. Причём тайлы могут осуществлять такой захват без признаков насыщения в течение более чем трёх часов работы токамака (скорость захвата дейтерия первой стенкой токамака остаётся постоянной в течение импульса и составляет примерно $2 \cdot 10^{20}$ ат./с [4]).



Арсений Александрович Кузьмин, аспирант МИФИ Алексей Александрович Айрапетов, аспирант Леон Богданович Беграмбеков, д.ф.-м.н., профессор МИФИ Павел Анатольевич Шигин, инженер МИФИ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roth J., Alimov V.Kh., Golubeva A.V. — J. Nucl. Mater., 2007, vol. 363—365, p. 822—826.
2. Begrambekov L.B., Kuznetsov A.S., Shigin P.A. — J. Nucl. Mater. (article in press).
3. Begrambekov L., Buzhinsky O., Gordeev A., Miljaeva E., Leikin P., Shigin P. — Physica Scripta, 2004, № 108, p. 72—75.
4. Tsitrone E., Reiter D., Loarer T., Brosset C., Bucalossi J., Begrambekov L., Grisolia C., Grosman A., Gunn J., Hogan J., Mitteau R., Pégourié B., Ghendrih P., Reichle R., Roubin P. — J. Nucl. Mater., 2005, vol. 337—339, p. 539—543.

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2009 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2009, вып. 3, с. 30—34.