

P13-2015-62

А. Ю. Дидык, Г. Г. Бондаренко<sup>1</sup>, А. А. Ерискин<sup>1,2</sup>,  
А. П. Кобзев, В. Я. Никулин<sup>2</sup>, П. В. Силин<sup>2</sup>, И. В. Волобуев<sup>2</sup>,  
В. Белоус<sup>3</sup>, Я. Васяк<sup>3</sup>, Е. Хаевска<sup>3</sup>

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ И ВОДОРОДА  
В Zr-, Ni- и Ti-СБОРКАХ ФОЛЬГ  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОЙ ДЕЙТЕРИЕВОЙ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Направлено в журнал «Поверхность. Рентгеновские, синхротронные  
и нейтронные исследования»

---

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

<sup>2</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

<sup>3</sup> Национальный центр ядерных исследований, Отвоцк, Польша

Дидык А. Ю. и др.

P13-2015-62

Распределение дейтерия и водорода в Zr-, Ni- и Ti-сборках фольг при воздействии импульсной дейтериевой высокотемпературной плазмы

Методом регистрации ядер отдачи дейтронов и протонов (ERDA) изучен процесс накопления и перераспределения дейтерия и водорода при импульсном воздействии высокотемпературной дейтериевой плазмы (ИВТДП) на установке «Плазменный фокус» (ПФ-4) в сборках из двух Ni-, Ti- или Zr-фольг высокой чистоты. Установлено, что при ИВТДП происходит перераспределение имплантированного дейтерия и газовой примеси водорода на большие глубины в сборках из изученных Zr-, Ni- и Ti-фольг, значительно превышающие пробеги ионов дейтерия (при их максимальной скорости до  $\sim 10^8$  см/с).

Как и в ранее выполненных исследованиях, обнаруженное явление может быть объяснено выносом имплантированного дейтерия и водорода под воздействием мощных ударных волн, образуемых в металлических фольгах от ИВТДП, и (или) ускорением диффузии атомов дейтерия и водорода под действием волны сжатия-растяжения на фронте ударной волны с перераспределением дейтерия и водорода на большие глубины.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2015

Didyk A. Yu. et al.

P13-2015-62

The Distribution of Deuterium and Hydrogen in Zr, Ni and Ti Foil Assemblies after Exposure to Pulsed High-Temperature Deuterium Plasma

The accumulation and redistribution of deuterium and hydrogen in the assemblies of two high-purity Ni, Ti or Zr foils under high-temperature pulsed action of deuterium plasma at the "Plasma Focus" (PF-4) set-up was studied by the method of registration of recoil deuterons and protons (ERDA). It was found that redistribution of implanted deuterium and hydrogen gas impurities in the assemblies of the studied Zr, Ni and Ti foils takes place to large depths greatly exceeding the ranges of deuterium ions (at their maximum speeds of up to  $10^8$  cm/s). As in earlier studies, the observed phenomenon can be explained by the redistribution of the implanted deuterium and hydrogen under the influence of powerful shock waves formed in the metal foil under the action of high-temperature pulsed plasma, and (or) the acceleration of the diffusion of deuterium and hydrogen atoms under the influence of compression-expansion waves at the front of the shock wave accompanied by redistribution of hydrogen and deuterium to great depths.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2015

## ВВЕДЕНИЕ

За последние годы в связи с успехами в лазерной технике и с созданием мощных импульсных лазеров в пико- и фемтосекундных диапазонах значительное развитие получила относительно новая область науки — физика высокой плотности энергии [1, 2]. Это направление развивалось как для изучения воздействия коротких импульсов на конденсированные среды, т. е. с целью детального исследования таких процессов, как лазерное распыление, абляция, перераспределение примесей, возникновение новых и растворение старых фаз, так и для изучения влияния и возникновения мощных ударных волн и их проявлений [3, 4]. Помимо этого сформировалось и другое важное направление исследований по воздействию мощных импульсов лазерного излучения с целью создания лазерного управляемого ядерного синтеза. В таких процессах осуществляется экстремально высокое энерговыделение в вещество, когда теплопроводность (электронная, лучистая и фононная) не успевает охладить мишень за время импульсного нагрева. Однако в связи с тем, что длина волны лазера мала, а высокочастотный скин-эффект значительно уменьшает глубину проникновения света в твердое тело, а также в образующуюся при этом плотную приповерхностную плазму, здесь имеют место лишь поверхностные эффекты.

Как известно, при работе термоядерных реакторов в материале первой стенки должно происходить накопление компонентов плазмы (дейтерия и трития) и продуктов термоядерных реакций в виде гелия. Поэтому изучение процессов накопления и адсорбции–десорбции легких газов и особенно трития имеет важнейшее значение [3, 4].

Целью настоящей работы является изучение распространения ударных волн в металлических фольгах по эффектам, обусловленным процессами перераспределения и накопления ионов от импульсной дейтериевой плазмы и присутствующей газовой примеси — водорода, которые изучались методом детектирования ядер отдачи дейтерия и водорода (elastic recoil detection — ERDA) и резерфордского обратного рассеяния (Rutherford backscattering spectrometry — RBS).

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В исследованиях была использована методика облучения набора фольг из металлов, ВТСП-керамик, металлических сплавов, многослойных структур и полимерных пленок на установке ПФ-4 в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН [3–5]. Применение установок типа «плазменного фокуса» (ПФ) для получения мощных потоков плазмы и изучение ее воздействия на материалы представляется также весьма актуальным с точки зрения возможности моделирования таких процессов. Параметры ПФ-4 следующие: энергия конденсаторной батареи 3,6–4 кДж, максимальный ток  $\approx 400$  кА, скорость плазменного потока до  $10^8$  см/с, плотность плазмы до  $\approx 10^{18}$  см $^{-3}$ , длительность плазменного импульса 50–100 нс, плотность вносимой в поверхность мишени до  $\sim 10^8$ – $10^9$  Вт/см $^2$ , выход нейтронов до  $\sim 10^8$  за импульс дейтериевой плазмы, время между импульсами для частичного охлаждения мишени не менее 5–6 мин. Разрядная вакуумная камера установки ПФ-4 после работы на дейтериевой плазме была откачана до  $10^{-3}$  Торр, а затем вновь наполнена чистым дейтерием до рабочего давления от 2 до 4 Торр.

В выполненных экспериментах по изучению воздействия дейтериевой высокотемпературной плазмы расстояние от анодной вставки до мишени составляло 25 мм (рис. 1). При воздействии дейтериевой плазмы на образцы осуществлялось также измерение выхода нейтронов по термоядерной реакции  ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow n + {}^3_2\text{He}$  из дейтериевой плазмы и мишеней нейтронными детекторами [6, 7].

Фольги из никеля (99,98 %) толщиной 0,25 мм, титана (99,6 %) толщиной 0,25 мм и циркония (99,8 %) толщиной 0,3 мм (фирма Goodfellow Cambridge Limited) были облучены на установке ПФ-4 [3–5] в сборке из двух плотно прижатых фольг пятнадцатью импульсами дейтериевой плазмы (рис. 1). Все фольги имели размер  $10 \times 15$  мм, с точностью по толщине  $\pm 10\%$  и по габаритным размерам  $\pm 0,5$  мм. Для удобства введем символическое обозначение сборки фольг в виде  ${}^1\text{Мет-1}|{}^2\text{Мет-2}$ .

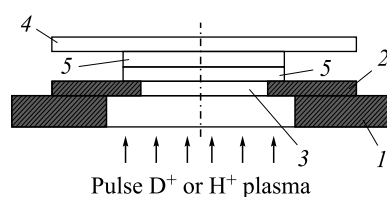


Рис. 1. Сборка металлических фольг для облучения образцов импульсной аргоновой высокотемпературной плазмой на «Плазменном фокусе» ПФ-4 [4, 5] (поток плазмы снизу): 1 — нижняя часть дискового держателя образцов на четыре сборки из нержавеющей стали X18H10T (НС); 2 — передняя диафрагма с диаметром отверстия 3, равным 10 или 15 мм; 4 — прижимная пластина из нержавеющей стали; 5 — две или четыре фольги из одного материала

Все ERDA-спектры были получены с использованием анализирующего пучка ионов гелия с энергией 2,3 МэВ при скользющем угле падения на образец в  $15^\circ$  на электростатическом генераторе ЭГ-5 Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ [8, 9]. Обработка спектров проводилась с применением стандартной программы SIMNRA 6.06 [10].

### RBS- И ERDA-ИССЛЕДОВАНИЯ НИКЕЛЕВЫХ ФОЛЬГ

На рис. 2 представлены спектры RBS и ERDA для ядер отдачи протонов и дейтронов от ближней к ПФ-4 поверхности первой фольги  $^{63}\text{Ni}$  в сборке. В табл. 1 приведено распределение элементов, соответствующее спектру ERDA на рис. 2, справа.

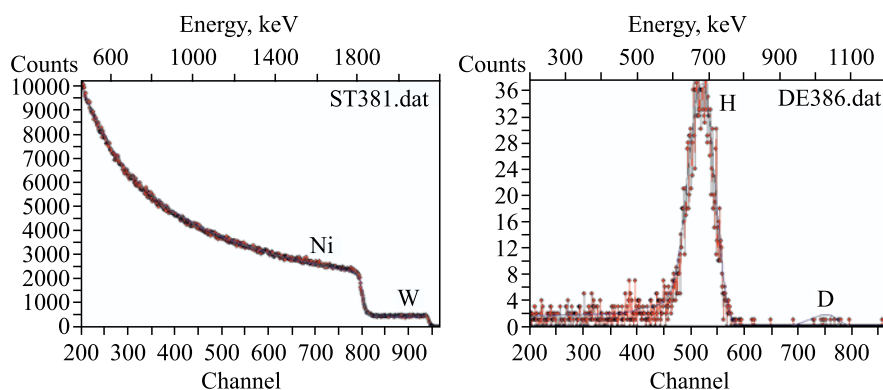


Рис. 2. RBS и ERDA с поверхности фольги  $^{63}\text{Ni}$

Таблица 1

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см <sup>2</sup>	H, %	D, %	C, %	Ni, %	W, %
150	4,0	0,2	11,3	81,0	3,5
350	3,5	0,1	—	92,9	3,5
550	0,5	—	—	96,0	3,5
950	0,3	—	—	96,2	3,5
1450	0,2	—	—	96,3	3,5
1950	0,2	—	—	96,3	3,5
4950	—	—	—	96,5	3,5

На рис. 3 представлены спектры RBS и ERDA для ядер отдачи протонов и дейтронов от дальней к ПФ-4 поверхности первой фольги  $^{63}\text{Ni}$  в сборке. В табл. 2 приведено распределение элементов, соответствующее спектру ERDA на рис. 3, справа.

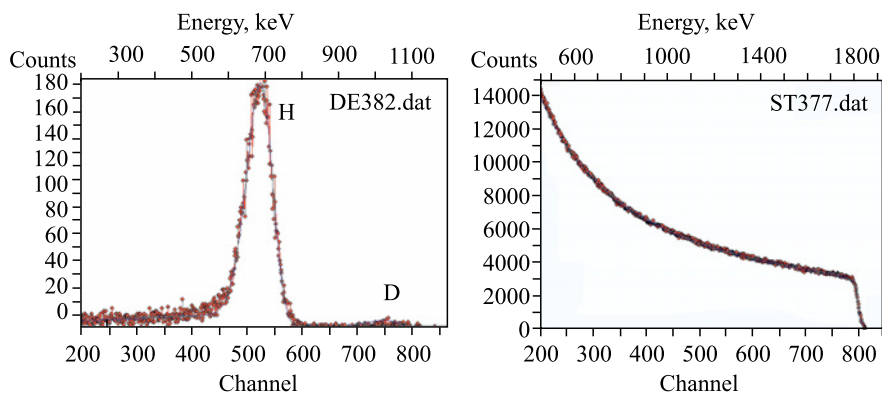


Рис. 3. RBS и ERDA с поверхности фольги Ni-1<sup>2</sup>

Таблица 2

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см <sup>2</sup>	H, %	D, %	C, %	Ni, %
150	12,0	0,3	14,7	73,0
350	8,5	0,2	5,3	86,0
550	2,0	0,1	—	97,9
950	0,5	—	—	99,5
1450	0,5	—	—	99,5
1950	0,4	—	—	99,6
2950	0,4	—	—	99,6
4950	—	—	—	100,0

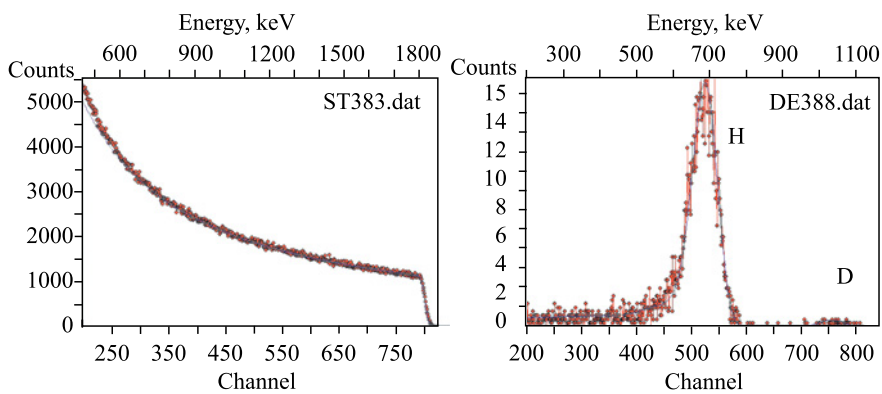


Рис. 4. RBS и ERDA с поверхности фольги <sup>1</sup>Ni-2

На рис.4 представлены спектры RBS и ERDA для ядер отдачи протонов и дейтронов от ближней к ПФ-4 поверхности второй фольги <sup>1</sup>Ni-2 в сборке. В табл.3 приведено распределение элементов, соответствующее спектру ERDA на рис. 4, справа.

Таблица 3

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см <sup>2</sup>	H, %	D, %	Ni, %
150	7,0	0,2	92,8
300	6,0	0,1	93,9
500	1,0	—	99,0
900	0,5	—	99,5
1400	0,3	—	99,7
1900	0,3	—	99,7
2900	0,3	—	99,7
4900	—	—	100,0

На рис. 5 представлены спектры RBS и ERDA для ядер отдачи протонов и дейтронов от дальней к ПФ-4 поверхности второй фольги Ni-2<sup>2</sup> в сборке. В табл. 4 приведено распределение элементов, соответствующее спектру ERDA на рис. 5, справа.

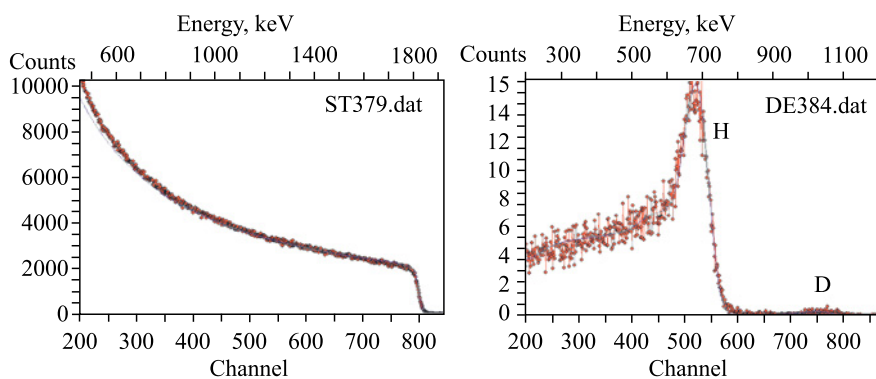


Рис. 5. RBS и ERDA с поверхности фольги Ni-2<sup>2</sup>

Таблица 4

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см <sup>2</sup>	H, %	D, %	C, %	Ni, %
150	17,0	0,3	14,7	68,0
350	15,0	0,2	5,3	79,5
550	7,0	0,1	—	92,9
950	7,0	—	—	93,0
1450	6,0	—	—	94,0
1950	6,0	—	—	94,0
2950	5,0	—	—	95,0
4950	—	—	—	100,0

## RBS- И ERDA-ИССЛЕДОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ ФОЛЬГ

На рис.6 представлены спектры RBS и ERDA для ядер отдачи протонов и дейтронов от ближней к ПФ-4 поверхности первой фольги  $^{1}\text{Ti}$ -1 в сборке. В табл.5 приведено распределение элементов, соответствующее спектру ERDA на рис. 6, справа.

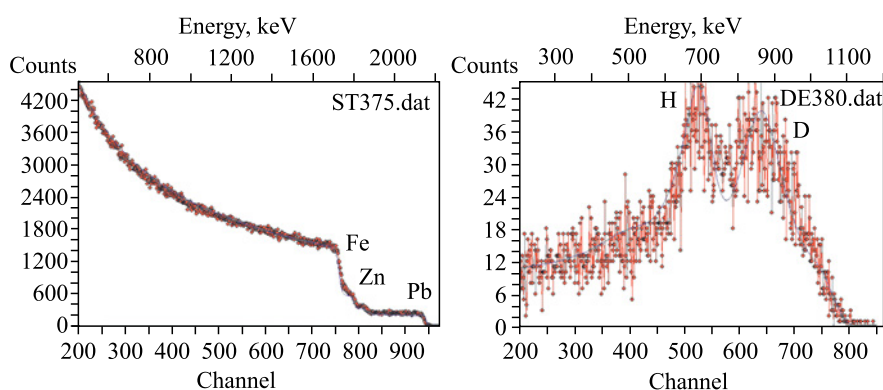


Рис. 6. RBS и ERDA с поверхности фольги  $^{1}\text{Ti}$ -1

Таблица 5

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см <sup>2</sup>	H, %	D, %	O, %	Ti, %	Fe, %	Zn, %	Pb, %
150	5,0	1,0	3,5	70,0	14,0	5,0	1,5
350	1,5	1,0	—	76,0	15,0	5,0	1,5
650	1,2	1,4	—	74,9	16,0	5,0	1,5
1050	1,2	1,7	—	73,6	17,0	5,0	1,5
1550	1,1	1,7	—	73,7	17,0	5,0	1,5
2050	1,0	0,8	—	74,7	17,0	5,0	1,5
3050	1,0	0,5	—	75,0	17,0	5,0	1,5
4950	—	—	—	76,5	17,0	5,0	1,5

На рис.7 представлены спектры RBS и ERDA для ядер отдачи протонов и дейтронов от дальней к ПФ-4 поверхности первой фольги  $\text{Ti}$ -1<sup>2</sup> в сборке. В табл.6 приведено распределение элементов, соответствующее спектру ERDA на рис. 7, справа.

На рис.8 представлены спектры RBS и ERDA для ядер отдачи протонов и дейтронов от ближней к ПФ-4 поверхности второй фольги  $^{1}\text{Ti}$ -2 в сборке. В табл.7 приведено распределение элементов, соответствующее спектру ERDA на рис. 8, справа.



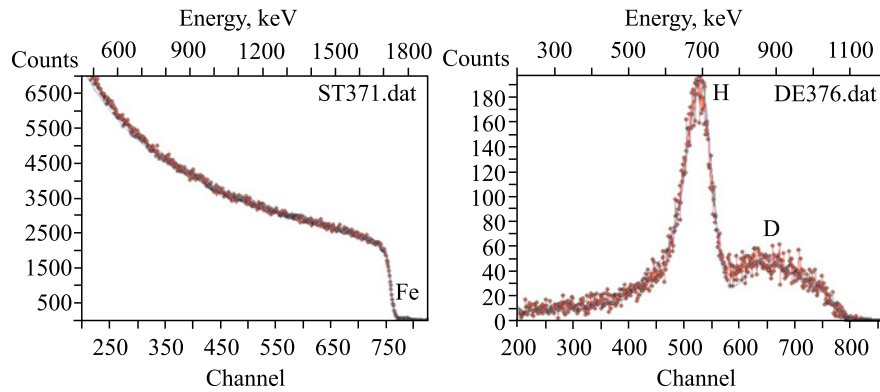


Рис. 7. RBS и ERDA с поверхности фольги  $Ti-1^2$

Таблица 6

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см <sup>2</sup>	H, %	D, %	O, %	Ti, %	Fe, %
150	12,0	0,8	17,2	68,0	2,0
350	5,0	1,0	19,0	75,0	—
550	2,5	1,1	10,4	86,0	—
950	1,5	0,9	5,6	92,0	—
1350	0,5	0,9	—	98,6	—
1750	0,4	0,6	—	99,0	—
2250	0,4	0,3	—	99,3	—
3250	0,2	0,1	—	99,7	—
6350	—	—	—	100,0	—

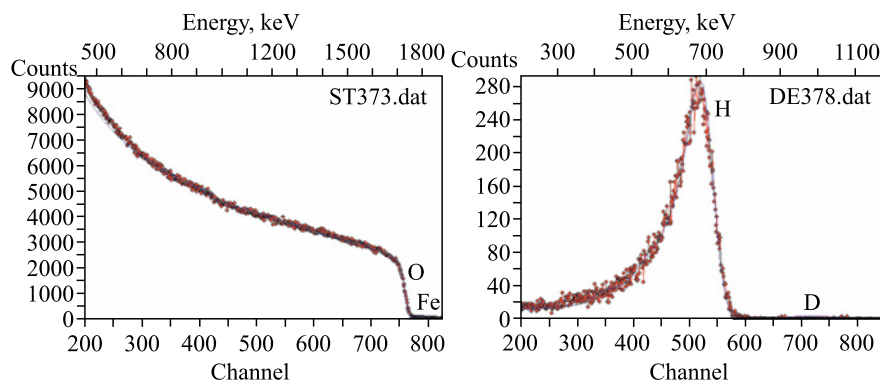


Рис. 8. RBS и ERDA с поверхности фольги  $^1Ti-2$

Таблица 7

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см <sup>2</sup>	H, %	D, %	O, %	Ti, %	Fe, %
150	12,0	0,1	35,9	50,0	2,0
350	9,0	0,1	25,9	65,0	—
650	5,0	0,1	19,9	75,0	—
1050	3,0	—	14,0	83,0	—
1550	1,5	—	9,5	89,0	—
2050	0,7	—	—	96,0	—
2050	0,6	—	—	98,0	—
4050	—	—	—	100,0	—

На рис.9 представлены спектры RBS и ERDA для ядер отдачи протонов и дейтронов от дальней к ПФ-4 поверхности второй фольги Ti-2<sup>2</sup> в сборке. В табл.8 приведено распределение элементов, соответствующее спектру ERDA на рис.9, справа.

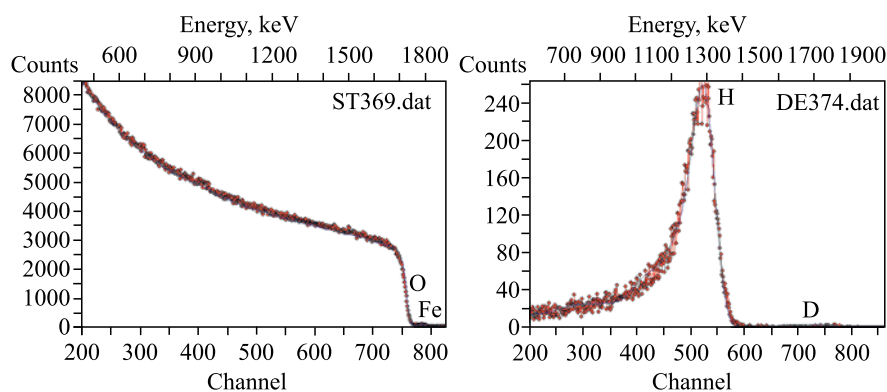


Рис. 9. RBS и ERDA с поверхности фольги Ti-2<sup>2</sup>

Таблица 8

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см <sup>2</sup>	H, %	D, %	O, %	Ti, %	Fe, %
150	14,0	0,1	15,9	68,0	2,0
350	7,0	0,1	7,9	85,0	—
650	3,5	0,1	4,4	92,0	—
1050	2,3	—	—	97,7	—
1850	1,1	—	—	98,9	—
2850	0,7	—	—	99,3	—
5850	—	—	—	100,0	—

### RBS- И ERDA-ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИРКОНИЕВЫХ ФОЛЫГ

На рис. 10 представлены спектры RBS и ERDA для ядер отдачи протонов и дейтронов от ближней к ПФ-4 поверхности первой фольги  ${}^1\text{Zr-1}$  в сборке. В табл. 9 приведено распределение элементов, соответствующее спектру ERDA на рис. 10, справа.

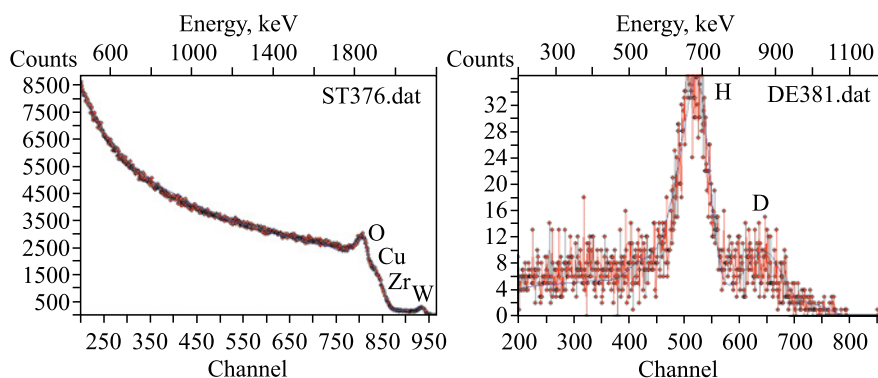


Рис. 10. RBS и ERDA с поверхности фольги  ${}^1\text{Zr-1}$

Таблица 9

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см <sup>2</sup>	H, %	D, %	O, %	Cu, %	Zr, %	W, %
150	4,0	0,1	58,4	35,0	0,0	2,5
350	3,0	0,15	45,85	20,0	29,0	2,0
550	2,0	0,2	35,8	—	60,0	2,0
950	0,9	0,5	24,6	—	72,0	2,0
1350	0,5	0,4	17,1	—	80,0	2,0
1750	0,5	0,3	12,3	—	85,0	2,0
2250	0,5	0,4	7,1	—	90,0	2,0
2750	0,4	0,1	1,5	—	96,0	2,0
3750	—	—	—	—	98,0	2,0

На рис. 11 представлены спектры RBS и ERDA для упругорассеянных ядер водорода (протонов) и дейтерия (дейтронов) от дальней к ПФ-4 поверхности первой фольги  $\text{Zr-1}^2$  в сборке. В табл. 10 приведено распределение элементов, соответствующее спектру ERDA на рис. 11, справа.

На рис. 12 представлены спектры RBS и ERDA для ядер отдачи протонов и дейтронов от ближней к ПФ-4 поверхности второй фольги  ${}^1\text{Zr-2}$  в сборке. В табл. 11 приведено распределение элементов, соответствующее спектру ERDA на рис. 12, справа.

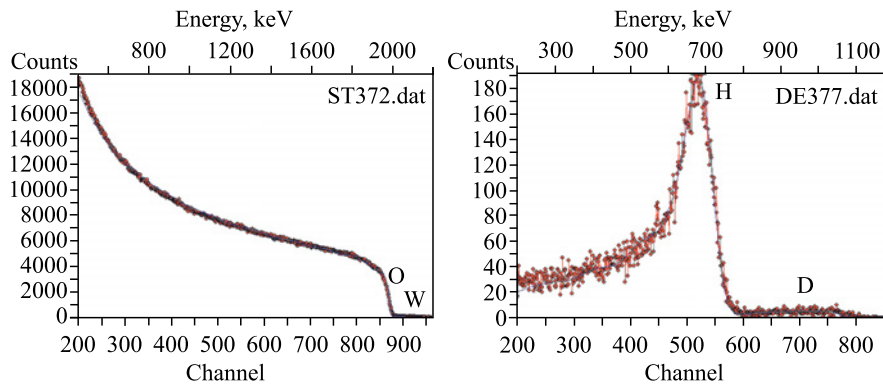


Рис. 11. RBS и ERDA с поверхности фольги  $Zr-1^2$

Таблица 10

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./ $cm^2$	H, %	D, %	O, %	Zr, %	W, %
150	10,0	0,2	54,6	35,0	0,2
350	8,0	0,2	44,5	47,0	0,3
550	5,0	0,2	34,4	60,0	0,4
950	3,5	0,1	24,0	72,0	0,4
1350	2,5	0,1	17,0	80,0	0,4
1750	2,0	0,1	12,5	85,0	0,4
2250	1,5	0,1	8,0	90,0	0,4
2750	0,2	0,1	3,3	96,0	0,4
3750	—	—	—	99,6	0,4

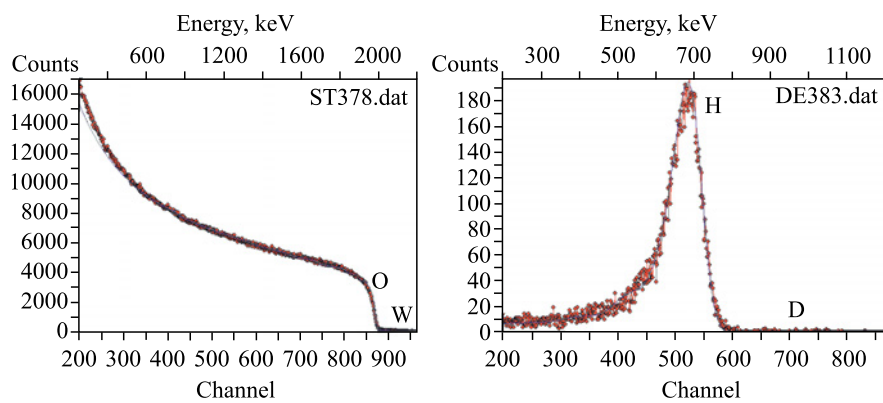


Рис. 12. RBS и ERDA с поверхности фольги  $^1Zr-2$

Таблица 11

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см <sup>2</sup>	H, %	D, %	O, %	Zr, %	W, %
150	12,0	0,05	52,75	35,0	0,2
350	10,0	0,05	39,65	50,0	0,3
550	5,0	0,05	30,45	64,0	0,5
950	2,2	0,05	20,25	77,0	0,5
1350	1,0	—	12,0	86,5	0,5
1750	0,7	—	5,8	93,0	0,5
2250	0,6	—	—	98,9	0,5
2750	0,1	—	—	99,4	0,5
3750	—	—	—	99,5	0,5

На рис. 13 представлены спектры RBS и ERDA для ядер отдачи протонов и дейтронов от дальней к ПФ-4 поверхности второй фольги Zr-2<sup>2</sup> в сборке. В табл. 12 приведено распределение элементов, соответствующее спектру ERDA на рис. 13, справа.

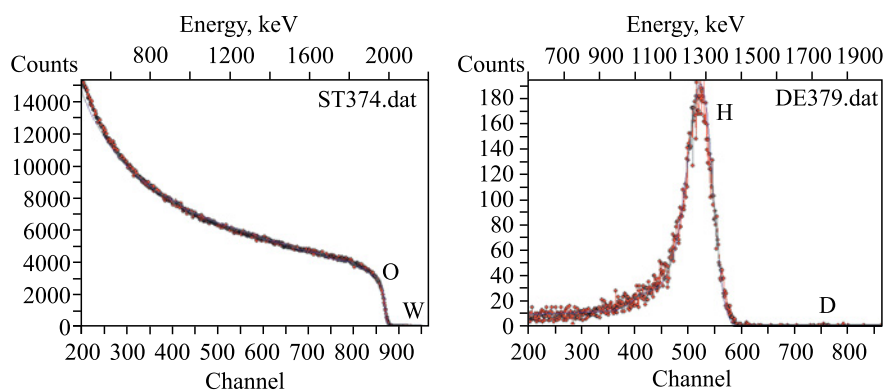


Рис. 13. RBS и ERDA с поверхности фольги Zr-2<sup>2</sup>

Таблица 12

Глубина, $\times 10^{15}$ ат./см <sup>2</sup>	H, %	D, %	O, %	Zr, %	W, %
150	13,0	0,03	51,77	35,0	0,2
350	10,0	0,03	39,67	50,0	0,3
550	4,0	0,03	30,47	65,0	0,5
950	2,0	0,03	19,97	77,5	0,5
1350	1,0	—	12,0	86,5	0,5
1750	1,0	—	5,5	93,0	0,5
2250	1,0	—	—	98,5	0,5
2750	0,1	—	—	99,4	0,5
3750	—	—	—	99,5	0,5

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Следует отметить, что качество фольг после воздействия высокотемпературной плазмы на ближних к ПФ-4 сторонах первых фольг в сборках весьма далеко от необходимого для надежных количественных RBS- и ERDA-исследований.

При воздействии высокотемпературной плазмы дейтерия на сборки фольг Ti|Ti, Ni|Ni и Zr|Zr превышение выхода нейтронов над фоном наблюдалось при хорошей форме и амплитуде сигналов от ПФ-4 по мере накопления имплантированного дейтерия.

На поверхности образцов при снятии спектров RBS и ERDA всегда присутствует углеводородная пленка, которая также может изменять концентрации этих элементов при обработке аппроксимации спектров программой SIMNRA 6.06 [10].

При обработке спектров RBS (см. рис. 2–13, слева) для более точной аппроксимации экспериментальных спектров вводились дополнительные элементы, такие как углерод, кислород, железо, медь и вольфрам.

Тем не менее представляется важной проверка наличия в облученных образцах вышеперечисленных металлов на растровом микроскопе с зондовым рентгеновским анализом. Это касается в первую очередь меди и вольфрама, которые составляют материалы анодной вставки ПФ-4.

Как видно из табл. 1–12, происходит проникновение дейтерия на обратную сторону металлических фольг. Это заметно на ближайших к ПФ-4 фольгах, но эффект проявляется и на вторых фольгах в сборках. Особенно эффект значителен на титановых (табл. 5 и 6) и циркониевых (табл. 9 и 10) фольгах.

Во всех фольгах присутствовал в качестве газовой примеси водород, перераспределение которого также характеризует процессы переноса легких примесей по толщине фольг. Как видно из сравнения концентраций водорода на ближайших и удаленных от ПФ-4 сторонах фольг, везде концентрация водорода сильно увеличивается от первой ко второй фольге в сборках. На никелевых фольгах эффект составляет от 4 до 12 % (табл. 1 и 2) и от 7 до 17 % (табл. 3 и 4); на титановых фольгах — от 5 до 12 % (табл. 5 и 6) и от 12 до 14 % (табл. 7 и 8); на циркониевых фольгах — от 4 до 10 % (табл. 9 и 10) и от 12 до 13 % (табл. 11 и 12).

Обнаруженное явление сверхглубокого проникновения водорода, а также дейтерия (см. [12, 13, 17–19]) может быть объяснено воздействием мощных ударных волн [1–5, 13–19] на перераспределение водорода и дейтерия с переносом их как легких и слабосвязанных примесей на большие глубины.

Другим, более разработанным подходом (см. также [12, 13, 17–19]) является ускоренная диффузия примесей при наличии внешней движущей силы  $F$  (см. [11]). Тогда законы Фика для потока частиц следует представить в виде

([11] и [20])

$$\bar{J} = -D \cdot \bar{\nabla} C(\bar{R}) + K \cdot \langle \bar{V} \rangle_F, \quad (1)$$

$$\frac{\partial C(\bar{R})}{\partial t} = \bar{\nabla} [D \bar{\nabla} C(\bar{R})] - K \cdot \bar{\nabla} \langle \bar{V} \rangle_F, \quad (2)$$

где внешняя движущая сила  $F$  придает каждому атому среднюю дополнительную скорость  $\langle \bar{V} \rangle_F$ , здесь  $K$  — коэффициент пропорциональности. Средняя дополнительная скорость каждого атома  $\langle \bar{V} \rangle_F$  предположительно может быть сопоставлена со скоростью распространения ударной волны, которая, как известно, превышает скорость распространения звука в материале в несколько раз [1–6, 12, 13, 17–19]. Как известно, при мощном импульсном воздействии вначале в материале распространяется упругая волна, которая на определенной глубине  $R_{E-S}$ , зависящей от материала и плотности мощности импульса, на поверхности трансформируется в ударную волну с крутым передним фронтом волны сжатия и волной растяжения за фронтом ударной волны. Поэтому на относительно небольших глубинах  $R < R_{E-S}$  в качестве дополнительной скорости легкого не связанного в химическую связь и (или) слабосвязанного примесного атома  $\langle \bar{V} \rangle_F$ , возможно, следует выбирать скорость объемной продольной  $V_{||}$  или поперечной  $V_{\perp}$  упругих волн.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом регистрации ядер отдачи дейтронов и протонов (ERDA) изучен процесс накопления и перераспределения дейтерия и водорода при импульсном воздействии высокотемпературной дейтериевой плазмы на установке «Плазменный фокус» (ПФ-4) в сборках из двух Ni-, Ti- или Zr-фольг высокой чистоты. Установлено, что при ИВТДП происходит перераспределение имплантированного дейтерия и газовой примеси водорода на большие глубины в сборках из изученных Zr-, Ni- и Ti-фольг, значительно превышающие пробеги ионов дейтерия (при их максимальной скорости до  $\sim 10^8$  см/с).

Обнаруженное явление может быть объяснено выносом имплантированного дейтерия и водорода под воздействием мощных ударных волн, образуемых в металлических фольгах от ИВТДП, и (или) ускорением диффузии атомов дейтерия и водорода под действием волны сжатия-растяжения на фронте ударной волны с перераспределением дейтерия и водорода на большие глубины. Аналогичное поведение обнаружено в сборках из двух или трех и более фольг из никеля, ванадия, ниобия, тантала различных толщин, включая и сборки фольг из разнородных материалов [11–13].

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Фортов В. Е.* Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе. М.: Физматлит, 2008. 264 с.
2. *Фортов В. Е.* Экстремальные состояния вещества. М.: Физматлит, 2010. 304 с.
3. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б, справочные приложения, банки данных. Т. IX-3 / Под ред. В. А. Грибкова. М., 2007. 591 с.
4. *Иванов Л. И., Пименов В. Н., Грибков В. А.* Взаимодействие мощных импульсных потоков энергии с материалами // Физика и химия обработки материалов. 2009. № 1. С. 23–37.
5. *Антонова Л. Х. и др.* Воздействие ударных волн на токонесящие свойства ВТСП ленты YBCO(123) // Докл. АН. 2009. Т. 428, № 4. С. 471–473.
6. *Волобуев И. В. и др.* Детекторы для нейтронов из короткоживущей плазмы // Тр. ФИАН. 1977. Т. 94. С. 21–28.
7. *Волобуев И. В. и др.* Исследование пространственной анизотропии нейтронного излучения на установках «Плазменный фокус» // Краткие сообщ. по физике. 1987. № 11. С. 32–34.
8. *Hrubčín L. et al.* Application of the ERD method for hydrogen determination in silicon (oxy)nitride thin films prepared by ECR plasma deposition // Nucl. Instr. Meth. B. 1994. V. 85. P. 60–62.
9. *Кобзев А. П.* Элементный анализ наноструктур на пучках заряженных частиц // Ядерная физика и нанотехнологии. Ядерно-физические аспекты формирования, изучения и применения наноструктур / Под ред. А. Н. Сисакяна. Дубна, 2008. С. 142–154.
10. *Mayer M.* SIMNRA Users Guide. <http://rzg.mpg.de/~mam/>
11. *Бокштейн Б. С.* Диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978. 248 с.
12. *Didyk A. Yu.* Anomalous deep penetration of hydrogen and deuterium into a sandwich of two niobium foils and deuterium polyethylene (CD<sub>2</sub>)<sub>n</sub> under action of pulse high temperature hydrogen plasma // Part. Nucl., Lett. 2012. V. 9, No. 2. P. 186–191.
13. *Didyk A. Yu.* Anomalous deep penetration of hydrogen in niobium at high temperature exposure pulses of hydrogen plasma // Part Nucl., Lett. 2012. V. 9, No. 3. P. 253–258.
14. *Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматлит, 1963. 632 с.
15. *Великович А. Л., Либерман М. А.* Физика ударных волн в газах и плазме. М.: Наука, 1987. 295 с.
16. *Блейзер Г. А., Кривококов В. П., Пащенко О. В.* Тепломассоперенос в твердом теле при воздействии мощных пучков заряженных частиц. Новосибирск: Наука, 1999. 176 с.
17. *Didyk A. Yu. et al.* Storage of deuterium and hydrogen in Ni-foils under influence of high temperature deuterium plasma // J. Surf. Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2013. V. 7, No. 1. P. 18–22.



18. *Didyk A. Yu. et al.* Transport of hydrogen in Nb-foil set under action of high temperature hydrogen plasma at “Plasma Focus” set up // *J. Surf. Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2013. V. 7, No. 4. P. 707–710.
19. *Didyk A. Yu., Wśniewski R.* Properties of Hydrogen and Its Isotopes under High Pressure, and Technological Applications. Dubna: JINR, 2013. 320 p.
20. *Жирифалько Л.* Статистическая физика твердого тела. М.: Мир, 1975. 382 с.

Получено 14 июля 2015 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 28.09.2015.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,12. Уч.-изд. л. 1,35. Тираж 245 экз. Заказ № 58640.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)