

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕЛИЯ И ТРИТИЯ С БЕРИЛЛИЕМ В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

И. Е. Кенжина<sup>1</sup>, А. О. Муканова<sup>1</sup>, Т. В. Кульсартов<sup>1</sup>, Е. В. Чихрай,  
В. П. Шестаков, И. Л. Тажибаева<sup>2</sup>, Ю. Н. Гордиенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский Институт Экспериментальной и Теоретической физики,  
Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Институт Атомной Энергии Национальный Ядерный Центр Республики Казахстан,  
Курчатов, Казахстан  
[kenzhina@physics.kz](mailto:kenzhina@physics.kz)

*В работе приводятся исследования параметров взаимодействия трития и гелия с облученным бериллием различных марок. Работа включает в себя ряд этапов таких, как: расчет содержания накопленного количества трития и гелия; проведение термодесорбционных (ТДС) исследований образцов облученного бериллия трех исследуемых марок; обработка и анализ экспериментальных результатов; определение основных параметров взаимодействия трития с облученным бериллием, необходимых для оценки возможности использования процедуры высокотемпературной дегазации в качестве метода детритизации, а также для расчета распределения трития в бериллиевых материалах термоядерного реактора (ТЯР).*

### Введение

Одной из проблем термоядерного синтеза является выбор конструкционных материалов, способных выдержать в процессе работы ТЯР высокие термические и нейтронные нагрузки в стационарных режимах, а так же при срывах плазмы. В настоящее время активно начаты работы по реализации проекта ИТЭР, в котором плазмообращённым материалом, а так же материалом для размножения нейтронов в некоторых испытательных модулях blankets будет бериллий. В процессе работы ИТЭР бериллий будет подвержен значительным радиационным повреждениям под воздействием нейтронного излучения. Облучение бериллия быстрыми нейтронами приводит к образованию и накоплению в нём радиационных дефектов, а также ядер гелия и трития, которые образуются в нём в результате протекания ядерных реакций на атомах бериллия.

До сих пор полная картина процессов взаимодействия трития с бериллием не ясна, существует значительное расхождение по определённым параметрам взаимодействия изотопов водорода с бериллием для данных, полученных различными авторами [1–7].

Целью проводимых исследований являлось изучение поведения трития и определение эффективных коэффициентов диффузии и энергии активации

диффузии трития в облучённом бериллии различных марок. Эти данные позволяют определить распределение трития в конструкции ТЯР, что необходимо для оптимизации процессов извлечения, утилизации и дальнейшего использования трития (например, выбора режимов прогрева узлов установки с целью их детритизации).

### Объекты исследования

В качестве объектов исследования выбраны образцы трех марок бериллия: S-65H, I-220H и S-200F, первые два из которых изготовлены методом горячего изостатического прессования (ГИП), а третий (S-200F) – методом вакуумного горячего прессования (ВГП). Все три марки бериллия были изготовлены фирмой Materion Brush Beryllium & Composites, USA и предоставлены для исследований Агентством по Атомной энергии Японии (JAEA). Химический состав всех исследуемых марок бериллия приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав образцов бериллия

Марка	Массовая доля примесей, %							
	Be	BeO	C	Fe	Al	Si	Mg	Другие металлы элементы
S-65H	99,44	0,7	<0,01	0,08	0,04	0,02	<0,01	<0,04
S-200F	99,00	1,0	0,06	0,12	0,05	0,03	<0,01	<0,04
I-220H	98,6	1,9	0,03	0,06	0,01	0,02	<0,01	<0,04



Рис. 1. Плотность нейтронного потока от энергетического спектра нейтронов реактора ВВР-К

Марки бериллия S-200F и I-220H выбраны для сравнения с предлагаемым для использования в реакторе ИТЭР сортом S-65, наиболее чистой модификацией которого является марка S-65H. В данной работе образцы облучались на исследовательском реакторе ВВР-К в течение 200 часов при температуре 70 °С. Флюенсы по быстрым и тепловым нейтронам составили  $5,5 \cdot 10^{19}$  н/см<sup>2</sup> и  $9,5E + 19$  н/см<sup>2</sup> соответственно. Спектр нейтронов реактора и плотности потока показаны на рис. 1. Размеры образцов и значения мощностей полученных доз приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 1

Мощности доз и размеры образцов

Марка бериллия	Ø, мм	Ширина, мм	Мощность дозы, мкЗ/ч
S-65H	$10 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,1$	458
S-200F	$9,98 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,1$	571
I-220H	$10,51 \pm 0,1$	$1,51 \pm 0,1$	460

Опытные образцы для ТДС- экспериментов и исследований микроструктуры были подготовлены путем нарезки исходных бериллиевых дисков на 4 равных сектора.

### Экспериментальная установка и методика проведения исследований

Эксперименты по термодесорбции образцов облучённого бериллия проводились в Институте атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан (ИАЭ НЯЦ РК), расположенного в г. Курчатов, на экспериментальной установке ВИКА, методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС) в режиме линейного нагрева. Подробное описание установки и методики приведено в работе [8].

### Результаты микроструктурных исследований

Микроструктурные исследования облучённых образцов до экспериментов по ТДС показали, что микроструктуры образцов бериллия марок S-65H и S-200F наиболее близки между собой и отличаются большей упорядоченностью и однородностью по сравнению с бериллием марки I-220H, границы зёрен декорированы выделениями окиси бериллия (рис. 2, а, б). Микроструктура образца бериллия марки I-220H характеризуется большой неоднородностью размеров зёрен и их распределения в материале, по границам зёрен присутствует более обширная и разветвленная сетка окислов бериллия (рис. 2, в). Эти результаты согласуются с другими литературными данными для исследуемых марок бериллия [9].

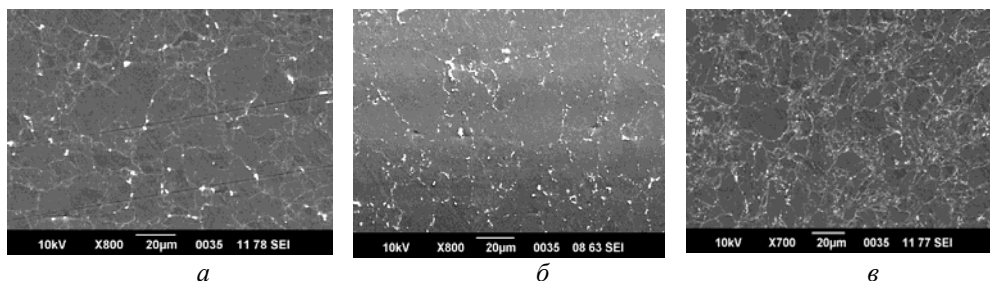


Рис. 2. Результаты микроструктурных исследований облученного бериллия: *a* – поверхность образца бериллия марки S-65H, средний диаметр зёрен 11 мкм; *б* – поверхность образца бериллия марки S-200F, средний диаметр зёрен 15 мкм; *в* – поверхность образца бериллия марки I-220H, средний диаметр зёрен 7,9 мкм

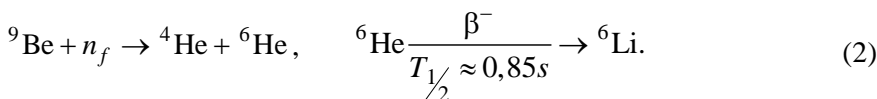
### Расчет количества наработанных атомов трития и гелия

При реакторном облучении в бериллии примесные атомы трития и гелия образуются по следующим ядерным реакциям:

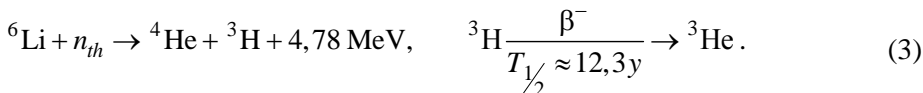
1)  $(n, 2n)$  при  $E \geq 2,7$  МэВ (580 мбарн)



2)  $(n, \alpha)$  при  $E \geq 0,71$  МэВ (115 мбарн)



Литий из-за высокого значения сечения реакции (945 барн) в потоке тепловых нейтронов практически мгновенно выгорает по следующей реакции:



Остальные реакции из-за малости соответствующего поперечного сечения не вносят существенного вклада в количественную наработку трития и гелия [10].

Учитывая форму спектра нейтронов и дифференциальные поперечные сечения указанных реакций, можно подсчитать число образовавшихся атомов газа на конец облучения по следующим формулам, вытекающим из выражения для скорости нейтронной реакции [11]

$$N_{\text{Be}} = N(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2)\Phi_{\sigma}\tau = 1,37E + 17 = 33,34 \text{ ppm}, \quad (4)$$

$$N_{4\text{He}} = 2N(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2)\Phi_{\sigma}\tau = 2,74E + 17 = 2.08 \text{ ppm}, \quad (5)$$

где  $N$  – количество атомов бериллия во всем объеме образца;  $N_{\text{He}}$  – количество образовавшихся атомов гелия;  $N_{\text{ЗН}}$  – количество образовавшихся атомов трития;  $\bar{\sigma}_1$  – среднее эффективное сечение реакции (1),  $\text{см}^2$ ;  $\bar{\sigma}_2$  – среднее эффективное сечение реакции (2),  $\text{см}^2$ ;  $\Phi_f = 5,46\text{E} + 19 \text{ н/см}^2$  – флюенс по быстрым нейтронам.

Для оценки количества газа, потерянного из приповерхностных слоев образца, были определены длины пробега трития и гелия в бериллии с помощью программы LISE v.9.8.18 [12], в основе расчетов которой лежит формула Бете-Блоха для ионизационных потерь тяжелых заряженных частиц с зарядом  $Z$  в среде с плотностью электронов  $n$

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n Z^2 e^4}{m_e v^2} \left( \ln \frac{2m_e v^2}{\bar{I}^2} - \ln \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right) \quad (6)$$

где  $m_e$  – масса электрона,  $c$  – скорость света,  $v$  – скорость частицы,  $\bar{I}$  – средний ионизационный потенциал атомов вещества среды, через которую проходит частица,  $e$  – заряд электрона [13].

Вычисленные длины пробега трития и гелия в бериллии составили 48,2 и 6,9 мкм соответственно, при этом соответствующее количество потерянных атомов газа из исходных образцов не превысило 6 % для трития и 1 % для гелия.

Время от момента выгрузки образцов из реактора до начала ТДС-экспериментов составило около 4 месяцев, следовательно, в результате радиоактивного распада было дополнительно потеряно 1,8% содержания атомов трития, которое преобразовалось в  $^3\text{He}$ .

В итоге перед началом ТДС-экспериментов содержание трития  $\text{T}_2$  и изотопов гелия  $^4\text{He}$  и  $^3\text{He}$  в образцах было соответственно 1.93 ppm, 33.08 ppm и 0.04 ppm.

### Результаты ТДС-экспериментов и их анализ

В ходе проведения ТДС-экспериментов с образцами облученного бериллия были получены температурные зависимости изменения парциальных давлений исследуемых газов в камере установки. На рис. 3 приведен ТДС-спектр для образца марки S-200F. Красная пунктирная кривая показывает изменение температуры.

По полученным данным были оценены количества трития  $\text{T}_2$  и гелия  $^4\text{He}$  в образцах облученного бериллия, которые достаточно хорошо совпали между собой в пределах ошибки для всех марок бериллия, и составили  $25 \pm 3$  ppm для  $^4\text{He}$ , и  $1,3 \pm 0,3$  ppm для  $\text{T}_2$ . Содержание изотопа  $^3\text{He}$ , как и предполагалось, оказалось незначительным, и составило менее 0,02 ppm.

Характер ТДС зависимостей позволил сделать выводы, качественно характеризующие процесс выделения гелия и трития из исследованных марок облученного бериллия, которые заключаются в следующем:

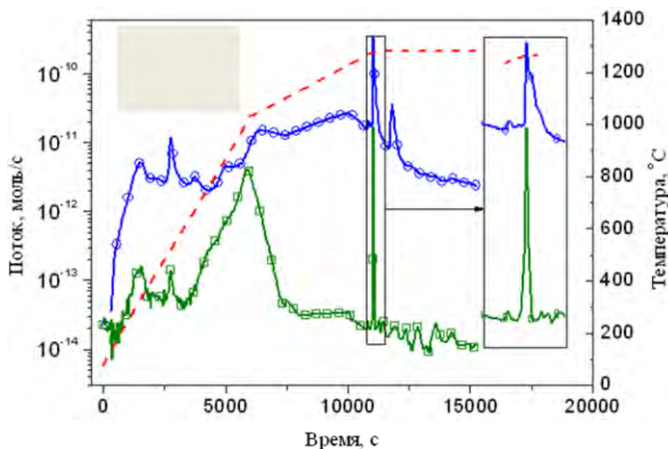


Рис. 3. Временная зависимость выделения трития и гелия из образца бериллия S-200F (скорость нагрева 40 °C/мин):  $\square$  — M6;  $\circ$  — M4

*Гелий* при равномерном нагреве в основном выделяется в процессе плавления бериллиевого образца, либо при температурах, близких к температуре плавления, при значительном времени выдержки (более часа при температуре выше 1150 °C). Данный факт связан с низким коэффициентом диффузии гелия в бериллии;

*Тритий* выделяется как во время плавления (для исследуемых образцов бериллия марок S-65H, I-220H при плавлении выделяется около 50 % накопленного трития, в то время как для образцов S-200F при плавлении выделяется около 10 % накопленного трития), так и в низкотемпературной области, которую можно условно разбить на 2 интервала:

1) первые очень незначительные, но заметные пики выделения трития наблюдаются для всех исследованных марок бериллия при температурах около 300–320 °C и 500 °C, причём при температуре 500 °C также наблюдается незначительное выделение гелия. Первое выделение (при температуре около 300–320 °C) связано с процессом выхода трития из приповерхностных пор и полых образований на поверхности. Второе выделение (при температуре около 500 °C) определяется некоторым общим растрескиванием образца и выходом газа (как гелия, так и трития) по образующимся свободным путям из полостей и трещин в теле образца.

2) во втором интервале температур для бериллия марки S-65H (выше 700 °C) наблюдается диффузионное выделение трития, установленное посредством выявления характерных особенностей для диффузионных пиков.

Интересно отметить, что для бериллия сорта S-200F наблюдается гораздо более эффективное выделение трития при его диффузии (рис. 3), чем из остальных сортов исследованного бериллия.

## Расчёт коэффициентов диффузии

Для анализа была использована модель, учитывающая возможность необратимого захвата диффундирующего трития некоей ловушкой (гелиевые пузырьки, кислородные ловушки и пр.). Предположение о необратимом захвате было сделано на основе характера выделения газов в ТДС-спектрах: выделение основного количества газа наблюдается при температурах, близких к плавлению, соответственно это отвечает предположению, что весь тритий и гелий связан в ловушках до плавления.

Уравнения для модели диффузии в присутствии ловушек с необратимым захватом:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D(t) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k_1 C. \quad (7)$$

Дополнительно определяются параметры, зависящие от времени и температуры:

$$D(t) = D_0 \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right), \quad k_1(t) = k_{10} \exp\left(-\frac{E_T}{RT}\right), \quad T = T_0 + \beta t, \quad (8)$$

где  $T$  – температура металла, К;  $\beta$  – скорость нагрева металла;  $E_D$ ,  $E_T$  – энергии активации диффузии и захвата в ловушки соответственно, кДж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Из начальных условий известна концентрация диффузанта в металле  $C_0(x, t = 0)$ . В качестве приближения модели были применены граничные условия 1-го рода, удовлетворяющие условиям непрерывной откачки диффузанта  $C(x = 0, t) = 0$  и  $C(x = l, t) = 0$ , где  $l$  – толщина образца.

На основе этой модели было проведено моделирование ТДС-зависимостей и получены данные по параметрам диффузии трития, которые сведены в табл. 3 и представлены на рис. 4

Таблица 2

Параметры взаимодействия трития с образцами бериллия марок S-65H, I-220H, S-200F

Марка бериллия	Эффективный коэффициент диффузии, $D_0$ , м <sup>2</sup> /с	Энергия активации диффузии, $E_D$ , кДж/моль
S-65H	65	280
I-220H	60	285
S-200F	110	280

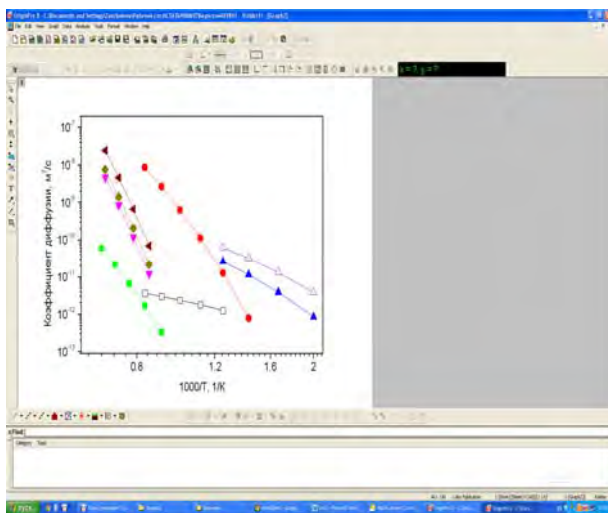


Рис. 4. График коэффициентов диффузии трития в бериллии. Литературные данные: ■ –  $D = 10^{-4} \exp(-178,6/RT)$  [5]; □ –  $D = 3 \cdot 10^{-11} \exp(-21/RT)$  [4]; ● –  $D = 4 \cdot 10^{-3} \exp(-130/RT)$  [6]; △ –  $D = 6,7 \cdot 10^{-9} \exp(-31/RT)$ , ▲ –  $D = 8 \cdot 10^{-9} \exp(-38/RT)$  [3]. Полученные данные: ▼ – I-220H,  $D = 60 \exp(-285/RT)$ ; ◆ – S-65H,  $D = 65 \exp(-280/RT)$ ; ▽ – S-200F,  $D = 110 \exp(-280/RT)$

Значения параметров взаимодействия трития с бериллием оказались завышены и, в большей степени, соответствуют данным по диффузии пузырьков газовых комплексов в бериллии, описанным в работе [5]. Из табл. 3 видно, что они удовлетворительно совпали между собой для образцов бериллия марок S-65H и I-220H. Эффективный коэффициент диффузии трития в образцах марки S-200F оказался примерно в два раза выше, чем для других марок бериллия. Погрешность определялась в ходе метода подгонки, как максимально допустимое отклонение экспериментальных кривых от расчётных (~20 %).

### Обсуждение результатов исследования

Теоретически рассчитанные значения концентраций наработанных газов в бериллии при облучении несколько превышают экспериментально полученные значения. Возможно, это связано с тем фактом, что исходные образцы были подвержены механической резке с целью подготовки опытных образцов непосредственно для экспериментального использования. Предположительно, в ходе этой процедуры из бериллия также произошел существенный выход атомов газа по образованным радиационным дефектам. Кроме того, некоторое количество атомов гелия и трития остается связанным в бериллии даже после его плавления. С учетом всего вышесказанного, полученные экспериментальным путем значения концентраций трития и гелия в облученном бериллии вполне можно считать качественно достоверными.

Термодесорбционное исследование выделения трития из облученных образцов бериллия привело к заключению, что движение газовых пузырьков



с тритием в бериллии можно разбить на две стадии: диффузия по объёму зерна до его границ и диффузия по границам зёрен. Причём диффузия по границам зёрен является очень быстрым процессом, и основное время выделения трития из образца тратится на выход пузырьков газа на границы зёрен, которые покрыты плёнкой в виде  $\text{BeO}$ , служащей диффузионным барьером.

При высоких температурах в бериллии начинается процесс рекристаллизации зёрен, который также затруднен наличием окисной плёнки бериллия. Выше температур  $700\text{ }^\circ\text{C}$  плёнка  $\text{BeO}$  начинает разрушаться, коагулируясь в отдельные включения, что облегчает процесс рекристаллизации.

В ходе микроструктурных исследований было обнаружено, что в образцах бериллия марок S-65H и I-220H, изготовленных методом горячего изостатического прессования, размер зерна меньше, чем в образце бериллия марки S-200F, изготовленного методом горячего вакуумного прессования, окись  $\text{BeO}$  лежит плотной равномерной плёнкой по поверхности в отличие от образца бериллия марки S-200F, где окись  $\text{BeO}$  располагается в виде отдельных включений. На различие микроструктуры этих образцов, по всей видимости, влияет метод изготовления. Согласно данным Папирова [8], на поверхности зёрен мелкозернистых образцов при изготовлении методом ГИП остаётся множество дислокаций, для которых требуются дополнительные затраты энергии на аннигиляцию, и которые оказывают дополнительное сопротивление перемещению границ в процессе рекристаллизации. Образец S-200F изготавливался в условиях вакуума, что избавило его от лишних загрязнений. Вследствие чего в нём рекристаллизация протекает свободно и зёрна растут с большей скоростью.

При этом становится очевидным, что при росте зерна пузырьки трития в зёрнах образца S-200F начинают более активно перемещаться, быстро оказываются на границах зёрен, выходят на поверхность и выделяются, это объясняет эффективное выделение трития путём диффузии ниже температуры плавления.

Сравнивая полученные результаты с работами по ТДС-исследованиям облучённого бериллия [14, 15, 16] можно сделать вывод о том, что механизм выделения гелия и трития существенно зависит от дозы облучения бериллия. В указанных выше работах бериллий был облучён до существенно более высоких флюенсов ( $\sim 3 \cdot 10^{21}$ ,  $1 \cdot 10^{22}$  н/см<sup>2</sup>), чем в настоящей работе ( $\sim 10^{20}$  н/см<sup>2</sup>). Предложенный механизм выделения трития и гелия при высоких флюенсах был следующий: наблюдался взрывной характер выхода трития и гелия из материала, который был вызван формированием открытой пористости в результате коалесценции пузырей и растрескиванием, обусловленным ростом напряжений при распухании бериллия. В экспериментах с бериллием, облучённых до флюенсов выше  $3 \cdot 10^{21}$  н/см<sup>2</sup> наблюдались такие эффекты как:

- существенное снижение температуры выделения трития при увеличении скорости нагрева исследуемого образца ( $\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$  при скорости нагрева  $14\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ ,  $\sim 400\text{ }^\circ\text{C}$  при скорости нагрева  $90\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ );

- заметная разница между пиками выделения трития и гелия.

Как следует из настоящей работы, для бериллия, облучённого до существенно меньших флюенсов, механизм выделения трития в меньшей степени

связан с разрушением и растрескиванием, а в большей степени с растворением оксидной плёнки ВеО на границах зёрен и с последующей диффузией трития по границам зёрен.

То, что не происходит заметного растрескивания при нагреве облучённых до флюенсов  $\sim 10^{20}$  н/см<sup>2</sup> образцов бериллия, подтверждается ещё тем фактом, что выделение гелия происходит в основном при температуре плавления образца.

### Заключение

В ходе выполненных работ по изучению газовыделения из образцов облучённого бериллия была проведена серия ТДС-экспериментов с тремя марками облучённого бериллия, получены временные и температурные зависимости выделения гелия и трития из образцов облучённого бериллия.

Для всех образцов облучённого бериллия оценены количества трития Т<sub>2</sub> и гелия <sup>4</sup>Не, которые достаточно хорошо совпали между собой в пределах ошибки.

Анализ ТДС-спектров показал, что для марки бериллия S-200F основное выделение трития зафиксировано в диффузионном пике, тогда как в двух других марках бериллия основная часть трития выделяется при плавлении.

Проведены микроструктурные исследования поверхности бериллиевых образцов трёх марок до ТДС-экспериментов, определены данные по основным характеристикам структуры образцов.

Опираясь на литературные данные, данные микроструктурного анализа и результаты экспериментов по газовыделению, удалось описать механизм выделения трития, принимая во внимание то, что скорость рекристаллизации зёрен бериллия марки S-200F намного превышает скорость рекристаллизации других марок исследуемых марок бериллия. Ускоренная рекристаллизация зёрен приводит к быстрому выходу газовых пузырьков с тритием.

Проведена обработка спектров выделения трития с помощью модели диффузии с учётом необратимого захвата диффундирующего трития ловушками, были определены основные параметры модели и аррениусовские зависимости эффективных коэффициентов диффузии трития в облучённом бериллии.

### Список литературы

1. D. L. Baldwin, M. C. Billone. Diffusion/Desorption of tritium from irradiated beryllium / J. Nucl. Mater. – 1991. – Vol. 948. – P. 212–215.
2. S. Cho, M. A. Abdou. Analysis of tritium kinetics of SIBELIUS beryllium/ Fusion Engineering and Design. – 2000. – Vol. 51. – P. 85–91.
3. E. Abramov, M. P. Riehm, D. A. Thomson. Deuterium Permeation and Diffusion in High Purity Beryllium / J. Nucl. Mater. – 1990. – Vol. 175. – P. 90–95.
4. P. Jones, R. Gibson. Hydrogen in beryllium / J. Nucl. Mater. – 1967. – Vol. 21. – P. 353–354.

5. E. Rabaglino. Helium and Tritium in Neutron-irradiated Beryllium: дис. канд. инж. наук: 0947-8620: защищена 20.01.04 : утв. 20.07.04 / Rabaglino Elisa. – Karlsruhe, German, 2004. – 137 с.
6. I. L. Tazhibayeva, E. A. Kenzhin, V. Shestakov, E. V. Chikhray, A. Klepikov, O. Romanenko. Hydrogen release from reactor irradiated beryllium / J. Nucl. Mater. – 1996. – Vol. 233–237. – P. 837–840.
7. C. Ronchi. On diffusion and precipitation of gas-in-solid / J. Nucl. Mater. – 1987. – Vol. 148. – P. 316.
8. T. V. Kulsartov. Tritium migration in the materials proposed for fusion reactors: Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> and beryllium / T. V. Kulsartov, Yu. N. Gordienko, I. L. Tazhibayeva, E. A. Kenzhin, A. O. Sadvakassova, Zh. A. Zaurbekova // J. Nucl. Mater. – 2013. – Vol. 442, Is. 1–3, Suppl. 1. – P. S740–S745.
9. И. И. Папиров. Рекристаллизация бериллия / И. И. Папиров, И. В. Стоев // Вестник Харьковского университета/ННЦ «Харьковский физико-технический институт». – 2008. – Вып. № 2/38/. № 808. – С. 11–24.
10. T. A. Tomberlin. Beryllium – A Unique Material In Nuclear Applications// INEEL/CON-04-01869 PREPRINT 36th International SAMPE Technical Conference. – 2004. – P. 12.
11. В. В. Федоров. Нейтронная физика: Учебное пособие. – Санкт-Петербург: ПИЯФ РАН, 2004. – P. 334.
12. LISE ++:[официальный веб-сайт]. – [2014]. – Режим доступа: <http://lise.nslc.msui.edu/>, свободный. – Еп.
13. А. И. Абрамов, Ю. А. Казанский, Е. С. Матусевич. Основы экспериментальных методов ядерной физики: Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
14. D. V. Andreev et al. Studies of tritium desorption from beryllium and characterisation of erosion products under plasma-beryllium interaction / Fusion Engineering and Design. –1998. – Vol. 39–40. – P. 465–475.
15. Д. В. Андреев, В. Н. Беспалов, А. Ю. Бирюков, Е. А. Красиков. Влияние стационарного и циклического отжига на структуру и распухание облученного нейтронами бериллия. – ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 1998. – Вып. 1-2. – С. 13–21.
16. D. V. Andreev, V. N. Bepalov, A. Yu. Biryukov, B. A. Gurovich, P. A. Platonov. Post-irradiation studies of beryllium reflector of fission reactor. Examination of gas release, swelling and structure of beryllium under annealing / J. Nucl. Mater. – 1996. – Vol. 233-237. – P. 880–885.