

ТЕРМОДЕСОРБЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЛУЧЕННОГО БЕРИЛЛИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК

*А. О. Садвакасова, И. Л. Тажипбаева, Е. А. Кенжин, Ю. Н. Гордиенко,
Т. В. Кульсартов, Н. И. Барсуков, Е. Ю. Тулубаев, Ю. В. Понкратов*

Институт Атомной Энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
sadvakassova@nnc.kz

В представленной работе приводятся экспериментальные результаты термодесорбционных исследований газовыделения из образцов бериллия различных марок, облученных на реакторах БН-350 (Казахстан), JMTR (Япония) и ИВГ.1М (Казахстан). В экспериментах были получены кинетические зависимости выделения молекул газа из образцов, по которым определялись данные по составу и количеству компонентов газа. Для моделирования экспериментальных кинетик предложена феноменологическая модель и разработана программа, получены эффективные коэффициенты диффузии трития и гелия в исследуемых образцах, а также энергии активации этих процессов.

Введение

Одной из проблем термоядерного синтеза является выбор конструкционных материалов, способных выдержать в процессе работы ТЯР высокие термические и нейтронные нагрузки на стационарных режимах, а так же при срывах плазмы. В настоящее время активно ведутся работы по реализации проекта ИТЭР, в котором плазмобращенным материалом, а так же материалом для элементов замедлителя и отражателя blankets будет бериллий. В процессе работы ИТЭР бериллий будет подвержен значительным радиационным повреждениям под воздействием нейтронного излучения. Облучение бериллия быстрыми частицами способствует образованию и накоплению в нем радиационных дефектов, а также ядер гелия и трития, которые образуются в нем в результате протекания ядерных реакций на атомах бериллия. До сих пор полная картина процессов взаимодействия трития с бериллием не является очевидной, существует значительное расхождение по определенным параметрам взаимодействия изотопов водорода с бериллием для данных, полученных различными авторами [1–8]. Целью проводимых исследований являлось изучение поведения трития и определение эффективных коэффициентов диффузии и энергии активации трития в бериллии различных марок.

Объекты исследования

В представляемой работе приводятся результаты серии термодесорбционных экспериментов (далее ТДС) по исследованию газовой выделению из образ-

цов некоторых марок бериллия, предварительно облученных на реакторах БН-350 (Казахстан), ИВГ.1М (Казахстан), JMTR (Япония).

1. Бериллий, облученный на реакторе БН-350 (Образцы партии «Б-1»). Исследуемые образцы (рис. 2) диаметром 9 мм и различной толщины (1 и 2 мм) были вырезаны из стержня, спеченного дистиллированного бериллия марки ДВ-56, изготовленного на Ульбинском машиностроительном заводе (рис. 1). Бериллиевый стержень облучался на реакторе БН-350 в течение 300 эффективных суток до флюенса по быстрым нейтронам ($E > 0,1$ МэВ) порядка $5 \cdot 10^{21}$ н/см², после чего в 1996 году был выгружен из реактора.

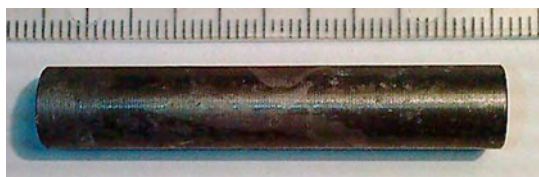


Рис. 1. Фрагмент бериллиевого стержня марки ДВ-56, облученного на реакторе БН-350

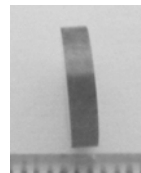
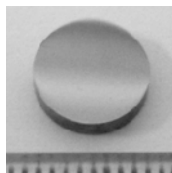


Рис. 2. Образец для термодесорбционных экспериментов

Таблица 1

Химический состав бериллия марки ДВ-56

Элементы	Be	Si	Fe	Al	C	BeO
Содержание, %	98,64	0,013	0,055	0,02	0,072	1,2

2. Бериллий, облученный на реакторе JMTR (Образцы партии «Б-2»).

Из фрагмента бериллиевого стержня, приготовленного методом горячего прессования и выдавливания в форме цилиндра диаметром 30 мм, облученного на реакторе JMTR потоком тепловых нейтронов примерно $8,0 \cdot 10^{13}$ н/см²·с и потоком быстрых нейтронов примерно $7,5 \cdot 10^{12}$ н/см²·с до флюенса порядка 10^{20} н/см² и выгруженного из реактора в 1974 году, были вырезаны образцы в форме квадратов толщиной 1,5 мм и размерами 6×6 мм. Внешний вид фрагмента бериллиевого стержня и изготовленных образцов показан на рис. 3 и 4, химический состав бериллия из реактора JMTR представлен в табл. 2.

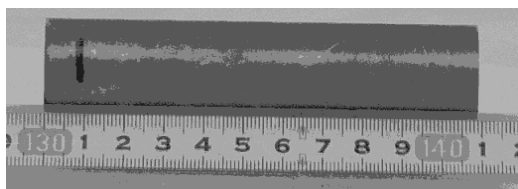


Рис. 3. Фрагмент бериллиевого стержня, облученного на реакторе JMTR

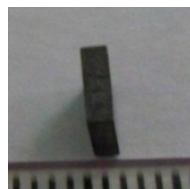
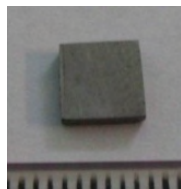


Рис. 4. Образец для термодесорбционных экспериментов

Таблица 2

Химический состав бериллия реактора JMTR

Элементы	Be	BeO	Fe	Al	Si	Mg	N	Cl	Ni	Др.
Содержание, %	98,3	1,7	0,16	0,1	0,08	0,05	0,05	0,04	0,03	0,08

3. Бериллий, облученный на реакторе ИВГ.1М (Образцы партии «Б-3»). Также были исследованы бериллиевые образцы в форме полудисков диаметром 4,5 мм и толщиной от 1 до 1,5 мм, вырезанных из бериллиевого стержня марки ТШГ-200 длиной 56 мм и диаметром 9 мм, облученного в реакторе ИВГ.1М до флюенса по быстрым нейтронам ($E > 0,1$ МэВ) порядка $10^{19} - 10^{20}$ н/см² и выгруженного из реактора в 2010 году. Внешний вид бериллиевого стержня и изготовленных образцов показан на рис. 5 и 6, химический состав бериллия марки ТШГ-200 представлен в табл. 3.



Рис. 5. Фрагмент бериллиевого стержня, облученного на реакторе ИВГ.1М

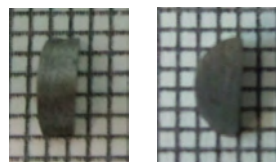


Рис. 6. Образец для термо-десорбционных экспериментов

Таблица 3

Химический состав бериллия марки ТШГ-200

Элементы	Be	Fe	Al	Si	Cr	F	O	C	Ti	Др.
Содержание, %	97,8	0,25	0,03	0,04	0,05	0,002	1,3	0,12	0,04	0,08

Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

Эксперименты по термодесорбции образцов облученного бериллия проводились в ИАЭ НЯЦ РК, расположенного в г. Курчатов, Казахстан, на экспериментальной установке ВИКА. Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 7, технические характеристики сведены в табл. 4.

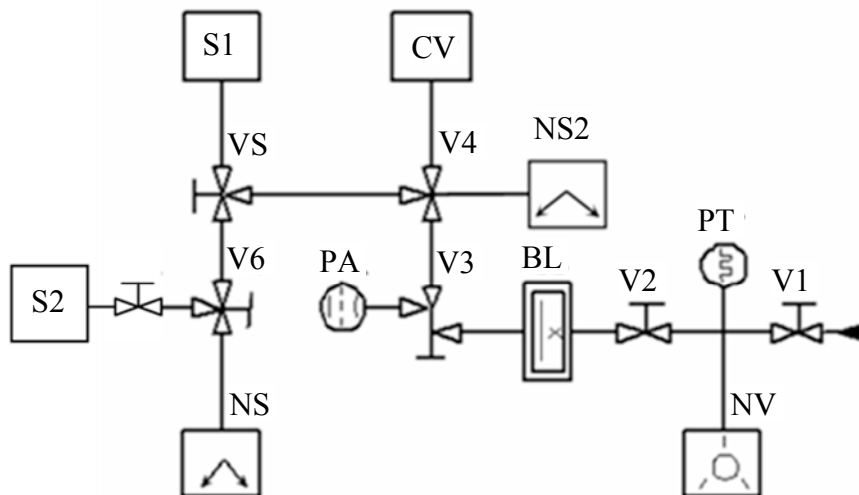


Рис. 7. Принципиальная схема экспериментальной установки ВИКА: PA – вакуумметр ионизационный; PT – вакуумметр; NS – магнеторазрядный насос НОРД-100; V – вакуумный вентиль; NS2 – магнеторазрядный насос НОРД-250; NV – насос НВР-5 ДМ; BL – азотная ловушка; S1 – омегатронный датчик РМО-13 масс-спектрометра ИПДО-2; S2 – датчик квадрупольного анализатора остаточных газов (RGA-100); CV – рабочая камера

Таблица 4

Технические характеристики установки ВИКА

Интервал рабочих температур	от 30 до 1500 °С;
Давление в рабочем объеме камеры	при 1500 °С 10^{-5} Па;
Точность автоматического поддержания температуры относительно заданной	$\pm 0,5$ °С;
Диапазон скоростей нагрева образца	от 2 до 50 °С/мин

Методика проведения исследований заключалась в следующем: изготовленный образец облученного бериллия обезжиривался, загружался в тигель рабочей камеры экспериментальной установки (рис. 8). После этого проводилась дегазация образца при температуре примерно 150 °С в течение четырех часов при непрерывной откачке вакуумными насосами. Затем образец охлаждался до комнатной температуры и далее проводился эксперимент по нагреву бериллиевого образца. Каждый из исследуемых образцов линейно нагревался до температуры 1250 °С с регистрацией выделяющихся газов с массовыми числами 3 (^3He), 4 (^4He и НТ), 6 (T_2), 18 (H_2O), 20 (НТО) и 22 (T_2O). Скорость линейного нагрева варьиро-



Рис. 8. Вакуумная камера с образцом

вась в диапазоне от 5 до 20 °С/мин. Нагрев образца осуществлялся путем прямого пропускания электрического тока через нагреватель с тиглем и с жестко закрепленной на тигле вольфрам-рениевой термопарой (ВР5/20).

Результаты ТДС экспериментов

В ходе проведения ТДС-экспериментов с облученными образцами бериллия партий Б-1, Б-2, Б-3 были получены временные зависимости изменения парциальных давлений исследуемых газов в камере установки (характерные кривые представлены на рис. 9).

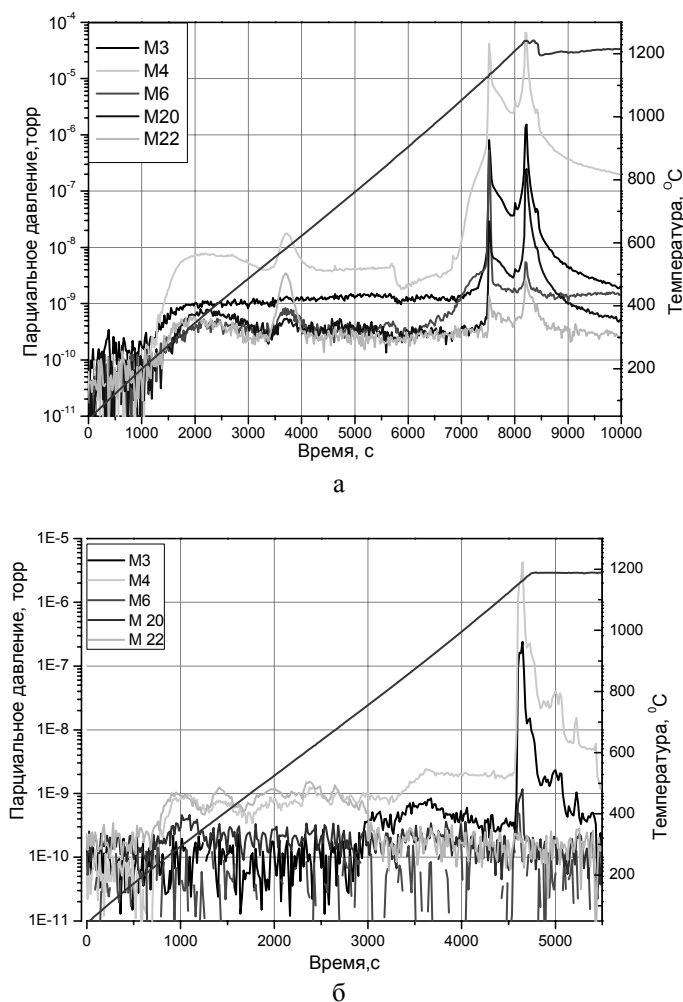


Рис. 9. Выделение регистрируемых газов из образцов партии Б-1, Б-2, Б-3 за время ТДС эксперимента: а – ТДС спектры газовой выделению газов в результате линейного нагрева образца партии Б-1 со скоростью 10 °С/мин (толщина 1 мм); б – ТДС спектры газовой выделению газов в результате линейного нагрева образца партии Б-2 со скоростью 15 °С/мин (толщина 3 мм); в – ТДС спектры газовой выделению газов в результате линейного нагрева образца партии Б-3 со скоростью 10 °С/мин (толщина 1,3 мм) (см. также с. 289)

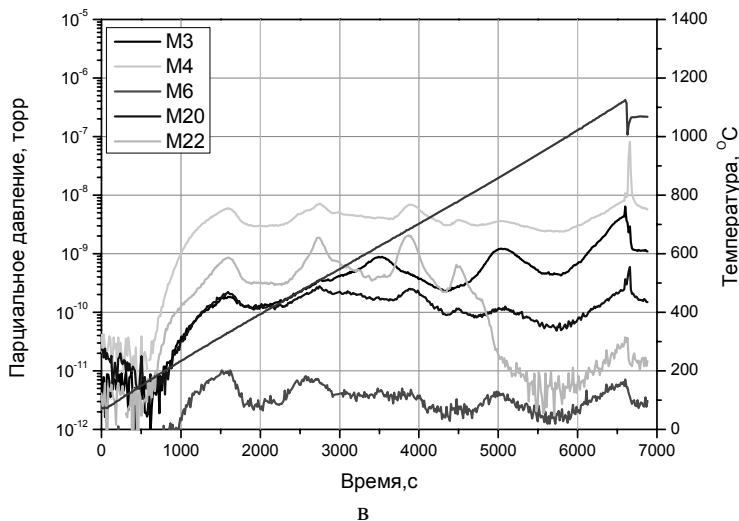


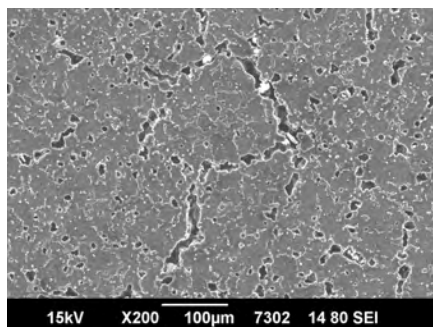
Рис. 9. Окончание

Из зависимостей газовыделения, полученных в результате ТДС-экспериментов с исследуемыми образцами, зафиксировано, что интенсивное выделение гелия происходит при $T > 950$ °C, при температурах, близких к температуре плавления бериллия ($T_{пл.} \approx 1285$ °C).

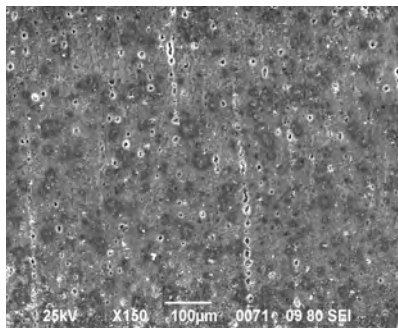
В представленных ТДС экспериментах была получена кинетика выделения трития с учетом его количественного распределения по тритийсодержащим молекулам (НТ, T_2 , НТО, T_2O), также отдельно фиксировалось выделение ^4He , ^3He в процессе нагрева.

Результаты микроструктурных исследований

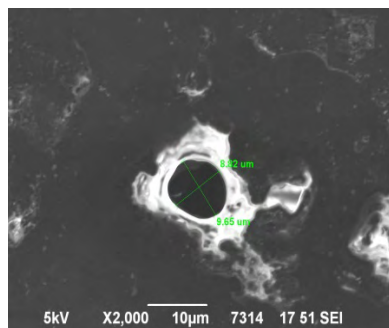
К настоящему моменту частично проведены исследования микроструктуры исследуемых образцов после экспериментов по ТДС. Они показали значительное развитие и разрушение поверхности (рис. 10,а), при анализе поверхности поперечного сечения облученных образцов было обнаружено, что она имеет большое количество равномерно расположенных пор разных размеров (рис. 10,б). Средний диаметр поры составляет величину порядка 10 мкм (рис. 10,в). Наблюдаемое увеличение количества и размера пор, появление трещин обусловлено взрывным газовыделением гелия и трития в высокотемпературной области ТДС-спектра.



а



б



в

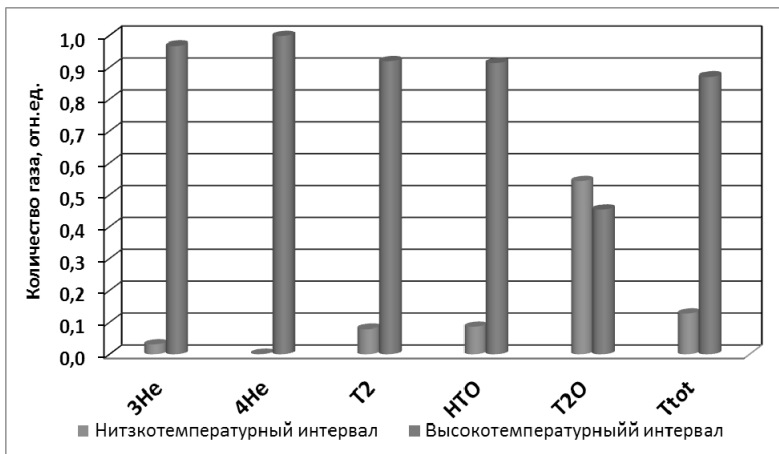
Рис. 10. Результаты микроструктурных исследований облученного бериллия после ТДС-экспериментов (образец партии Б1): а – поверхность бериллиевого образца; б – поверхность поперечного сечения образца; в – увеличенный вид поры в образце

Анализ и обсуждение результатов ТДС экспериментов

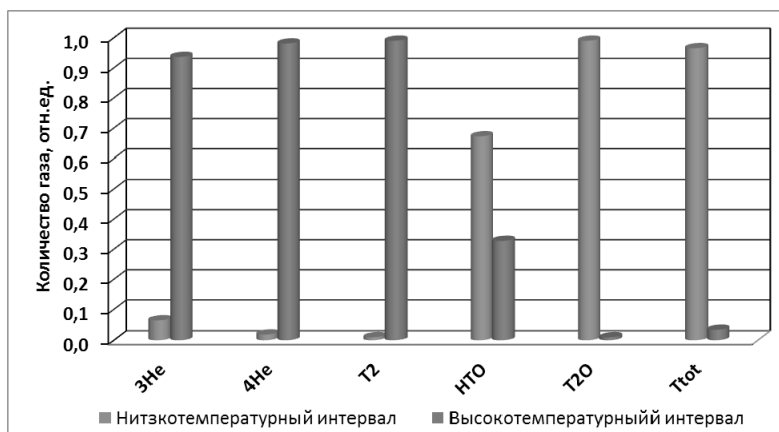
Анализ зависимостей газовыделения исследуемых газов из бериллиевых образцов проводился по двум временным интервалам ТДС экспериментов. Первый временной интервал соответствует температурной области до температуры образца $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ – низкотемпературная область, второй временной интервал соответствует высокотемпературной области (температура образца от $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$), при котором наблюдается характерное «взрывное» выделение всех газов в районе температуры плавления, что связано с активными изменениями структуры материала.

На рис. 11, 12 приведены данные по составу выделившегося газа из облученных образцов бериллия. На рис. 11 представлены гистограммы относительного выделения газов из различных образцов бериллия на разных этапах ТДС экспериментов.

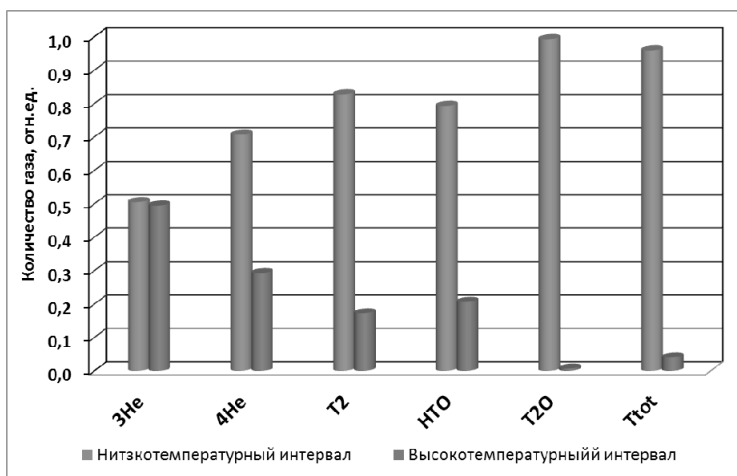
Диаграммы относительного вклада интегрального выделения тритийсодержащих молекул в общее выделение трития в двух температурных областях линейного нагрева образцов партий Б-1, Б-2, Б-3 показаны на рис. 12.



а



б



в

Рис. 11. Гистограмма относительного выделения газов из образцов за время ТДС эксперимента: а – образец партии Б-1; б – образец партии Б-2; в – образец партии Б-3

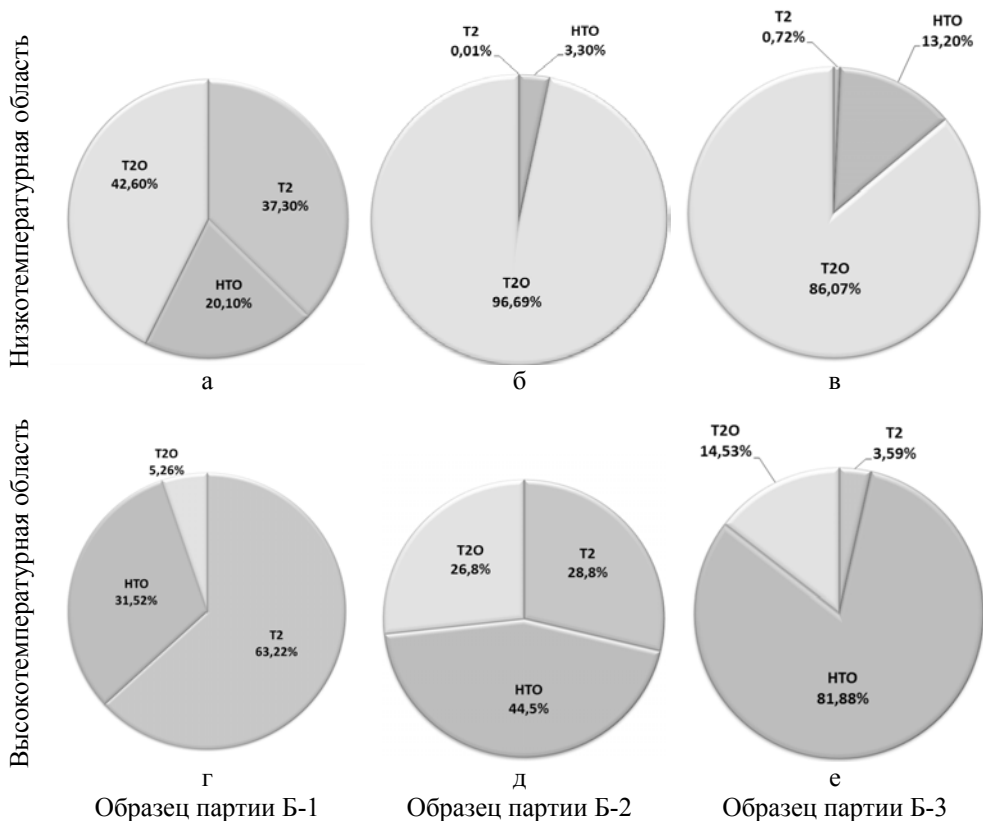


Рис. 12. Относительный вклад интегрального выделения тритийсодержащих молекул в общее выделение трития из исследуемых образцов бериллия за время ТДС эксперимента

Из рис. 11, 12 можно сделать выводы что:

– основное выделение гелия происходит в высокотемпературной области для образцов партии Б1, Б2. Для образцов партии Б3 выделение в высокотемпературной области наблюдается на уровне $\sim 50\%$ от общего выделения;

– для образцов партии Б-1 (облученных до более высоких доз, чем образцы другой партии, и имеющих более высокое содержание наработанного трития) выделение трития в основном происходит в высокотемпературном диапазоне, причем, как видно из диаграммы (см. рис. 12,г), тритий выделяется в виде молекулы трития T_2 ($\sim 60\%$) и молекул тритиевой воды НТО, T_2O ($\sim 30\%$);

– для образцов партии Б-2, Б-3 выделение трития в основном происходит в низкотемпературном диапазоне, тритий выделяется в виде молекул тритиевой воды НТО, T_2O ($\sim 99\%$). Относительный вклад молекул трития T_2 составляет менее 1% , причем для образцов партии Б2 явных пиков выделения молекул трития T_2 зафиксировано не было;

– в высокотемпературном диапазоне вклад в общее выделение трития из образцов партии Б-2, Б-3 молекул T_2 увеличивается и составляет от 5 до 25% .

Выделение трития в виде тритиевой воды связано с реакцией взаимодействия атома трития с кислородом (оксидом бериллия) в образце. Мы предполагаем, что она может протекать по сложному механизму: например, при прямом химическом взаимодействии атома трития с оксидом бериллия (либо гидрооксидом бериллия при образовании молекулы НТО), распадом тритий-оксида бериллия и т. д. Данный механизм нам не совсем понятен, поэтому зависимости потока тритиевой воды, полученные в ТДС экспериментах, нами не анализировались.

Не выяснен вопрос и о том, насколько важна была выдержка образцов (для образцов партии Б1 она составляла около 17 лет, для образцов партии Б2 около 36 лет), и насколько она могла повлиять на состояние трития в бериллии. При определении коэффициентов диффузии нами рассматривались зависимости выделения молекулы T_2 .

Для каждого образца были оценены интегральные количества выделившихся исследуемых газов, которые сведены в таблицу табл. 5.

Таблица 5

Интегральное количество газов ^4He , ^3He и T_2 в исследуемых образцах

Тип образца	Б-1	Б-2	Б-3
^4He , ppm	650	4	12
^3He , ppm	25	0,6	0,7
T_{total} , ppm	15	0,1	0,4

Расчет коэффициентов диффузии трития в бериллии различных марок

Для описания экспериментов по ТДС образцов партии Б-1, а именно зависимости выделения молекул трития T_2 , была выбрана модель газовой выделенности, которая учитывает одновременное движение атомов газа, осаждение их в пузыри и миграцию к границам зерна. Она применялась ранее для описания ТДС-экспериментов с образцами бериллия, облученного до флюенсов, сравнимых с теми, при которых были облучены образцы партии Б1 из наших экспериментов. Данная модель подробно описана в работах [5, 8].

Основная система дифференциальных уравнений модели:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial c_{gr}}{\partial t} = -Kc_{gr} - Hc_{gr}, \\ \frac{\partial c_{bb}}{\partial t} = Kc_{gr} - Uc_{bb}, \\ \frac{\partial c_{bnd}}{\partial t} = Hc_{gr} + Uc_{bb}, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial c_{gr}}{\partial t} = -Kc_{gr} - Hc_{gr}, \\ \frac{\partial c_{bb}}{\partial t} = Kc_{gr} - Uc_{bb}, \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial c_{gr}}{\partial t} = -Kc_{gr} - Hc_{gr}, \\ \frac{\partial c_{bnd}}{\partial t} = Hc_{gr} + Uc_{bb}, \end{array} \right. \quad (3)$$

где c_{gr} – средняя объемная концентрация атомов газа в зерне; c_{bb} – средняя концентрация атомов газа в объеме пузырька; c_{bnd} – средняя концентрация атомов газа, вышедших на границы зерен.

Все концентрации нормированы к полному количеству газа в начале эксперимента, как показано в формуле:

$$c_{gr} + c_{bb} + c_{bnd} = 1. \quad (4)$$

Выражение (1) описывает динамическое растворение атомов газа. Концентрация газа c_{gr} при растворении уменьшается, если атомы газа, диффундирующие в решетке, удерживаются пузырьками (параметр захвата Kc_{gr}), либо если они достигают границ зерна (параметр, отвечающий за выделение на границу зерна – Hc_{gr}). Параметр захвата учитывает дополнительный вклад в увеличение концентрации газа в пузырьках c_{bb} (2), пока другой член покидания границы зерна увеличивает количество газа на границах зерна и, следовательно, выделившегося газа c_{bnd} (3). В отсутствии соответствующей миграции пузырька к границам зерна единственным механизмом, позволяющим осевшему газу выделиться, является выход из пузырьков (параметр выхода газа из пузырька – Uc_{bb}).

Временная константа захвата атомов в пузырьки:

$$Kc_{gr} = \chi k_{sc}^2 Dc_{gr} = 4\pi\chi r_i N_i Dc_{gr}, \quad (5)$$

Временная константа миграции атомов на границы зерен:

$$Hc_{gr} = k_{sg}^2 Dc_{gr} = 3 \frac{\sqrt{\chi} k_{sc}}{\lambda} Dc_{gr}, \quad (6)$$

Временная константа выхода пузырьков:

$$U = TU_0 \exp(-Q'/kT), \quad (7)$$

где χ – фактор захвата; k_{sc} – интенсивность стока атомов в объеме зерна; r_i – размеры пузырька; N_i – объемная концентрация пузырьков; k_{sc} – интенсивность стока на границы зерен; λ – длина миграции атомов по границам; Q' – энергия активации деформацией; D – эффективный коэффициент диффузии атомов газа.

Основные параметры модели сведены в табл. 6. К основным параметрам модели, прежде всего, относятся размеры исследуемых образцов (в нашем случае это «тонкие» образцы в виде дисков и полудисков с площадью S , диаметром d и толщиной l (причем $l \ll d$)). Также сюда относятся начальные концентрации атомов гелия (${}^4\text{He}$) и трития (T_2) в образце, которые определяются на основе интегрального выделения в экспериментах по ТДС, а также оцениваются расчетным путем, на основе данных о флюенсе облучения и времени выдержки образцов после облучения. В результате микроструктурных

исследований были оценены размеры зерна λ и размеры пузырьков, а также расчетная концентрация пузырьков N в единице объема, которые так же входят в число исходных данных для расчета.

Таблица 6

Основные параметры модели

Толщина l , мм	Диаметр d , мм	Начальная концентрация ${}^4\text{He}$, моль/м ³	Начальная концентрация T_2 , моль/м ³	Размер зерна λ , $\mu\text{м}$	Размер пузырьков r , нм	Концентрация пузырьков N , ат/м ³	Фактор захвата χ
1	9	124	2,1	10÷100	1÷12	10^{24}	0,8

Недостатком предложенной модели является значительное количество параметров, которые приходится варьировать в широких пределах, тем не менее, данная модель удовлетворительно позволила описать ТДС-спектры, полученные для образцов бериллия партии Б-1 (рис. 13), облученного на реакторе БН-350, и рассчитать эффективный коэффициент диффузии трития в бериллии (табл. 7).

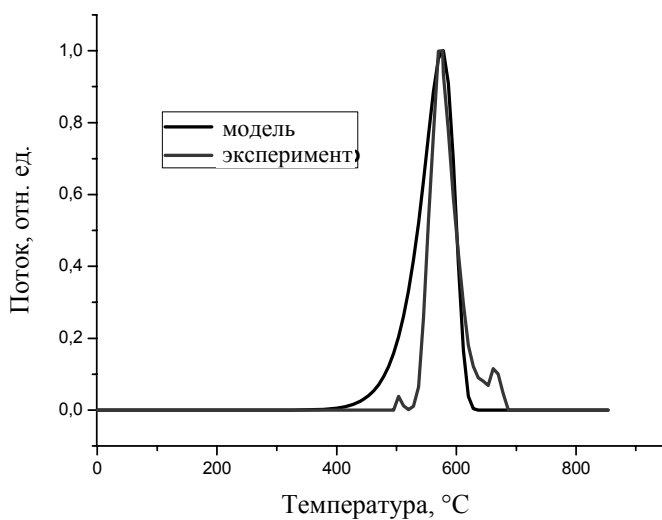


Рис. 13. Моделированная кривая выделения T_2 из облученного бериллия партии Б-1

Для образцов бериллия партии Б-2, Б-3 ситуация выглядит несколько иной, и дело здесь в следующем: общий флюенс по быстрым нейтронам для этих образцов существенно меньше ($10^{19} - 10^{20}$ н/см² против $5 \cdot 10^{21}$ н/см² для образцов партии Б-1). Соответственно, было сделано предположение о том, что влияние именно гелиевых пузырьков на захват трития при его ТДС

выделении из менее облученных образцов бериллия существенно ниже за счет меньшего общего количества гелия в таких образцах.

Поэтому для анализа была использована простая модель, которая учитывала возможность необратимого захвата диффундирующего трития некоей ловушкой (предположительно в качестве ловушек мы рассматривали любой радиационный дефект структуры, включая гелиевые пузырьки, кислородную ловушку, и пр.).

Предположение о необратимом захвате было сделано на основе характера выделения трития и гелия в полученных ТДС-спектрах. Взрывное выделение, при котором наблюдается основной выход газа, происходит при температурах, близких к плавлению, соответственно, это отвечает предположению, что весь тритий и гелий связан в ловушках до плавления.

Наличие заметных пиков выделения газа в низкотемпературной части ТДС-спектров также отвечает различным механизмам:

1) в случае, если одновременно на спектре ТДС наблюдается сразу несколько пиков различных газов: ^3He , ^4He , T_2 – это свидетельствует о недиффузионном выделении газа из пор (появлении легких путей выхода), так как коэффициенты диффузии гелия и трития различаются на порядки;

2) в случае, если мы наблюдаем один пик выделения трития, то можно предположить, что он обусловлен диффузионным механизмом и может быть описан в рамках модели диффузии в присутствии необратимого захвата диффузанта ловушками неограниченной емкости.

Уравнения для модели диффузии в присутствии ловушек с необратимым захватом приведены ниже:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D(t) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k_1 C. \quad (8)$$

Дополнительно определяются параметры, также зависящие от времени и температуры:

$$\begin{aligned} D(t) &= D_0 \exp(-E_D/RT); \\ k_1(t) &= k_{10} \exp(-E_T/RT); \\ T &= T_0 + \beta t, \end{aligned} \quad (9)$$

где T – температура металла, К; β – скорость нагрева металла (образец линейно нагревается); 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 I-го рода, удовлетворяющие условиям непрерывной откачки диффузанта $C(x = 0, t = 0)$ и $C(x = l, t = 0)$, где l – толщина образца.

Выделение трития из бериллия зависит от огромного количества факторов: образование оксидной пленки с особенно низкими коэффициентами диффузии изотопов водорода в ней, затрудненная десорбция с поверхности, также достаточно важным является процесс растрескивания бериллия в процессе

нагрева. В проведенных экспериментах не удалось корректно определить толщину оксидной пленки и оценить процесс растрескивания бериллия в ходе нагрева (как показал визуальный осмотр образцов, он происходил после экспериментов), поэтому расчет проводили в выбранных модельных приближениях (применение граничных условий I-го рода), а полученные в ходе такой оценки параметры предполагали считать эффективными параметрами, рассчитанными в выбранных приближениях.

Геометрические размеры образца и начальная концентрация трития в образце определяются в модели исходя из реальных значений для каждого эксперимента. Значения энергии активации и предэкспоненты в аррениусовской зависимости коэффициента диффузии и константы скорости захвата варьировались и подгонялись на основе нескольких экспериментов, проведенных с различными скоростями нагрева и для образцов различной толщины.

Определенные в результате моделирования эффективные коэффициенты диффузии трития в бериллии двух марок сведены в табл. 7, видно, что они удовлетворительно совпали между собой. Погрешность определялась в ходе метода подгонки как максимально допустимое отклонение экспериментальных кривых от расчетных.

Таблица 7

Рассчитанные параметры взаимодействия трития с образцами Б-1, Б-3

Образцы бериллия	Эффективный коэффициент диффузии трития D_0 , м ² /с	Энергия активации диффузии E_D , кДж/ моль
Б-1	$(4,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-4}$	100±10
Б-3	$(3,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-4}$	90±5

На рис. 14 приведены литературные данные по значениям эффективных коэффициентов диффузии, определенные различными авторами [1–6]. Сравнение с литературными данными показало, что рассчитанные эффективные коэффициенты диффузии трития лежат в области значений, полученных Абрамовым для бериллия высокой степени очистки.

Моделирование кинетики газовой выделенности из образцов партии Б-2 не проводилось, т. к. не было зафиксировано явных диффузионных пиков трития в ТДС-спектрах, что возможно связано с длительной выдержкой образцов после облучения. Кроме того что за данное время распалось около 80 % наработанного в бериллии трития, часть его могла вступить в химические реакции, либо покинуть образец.

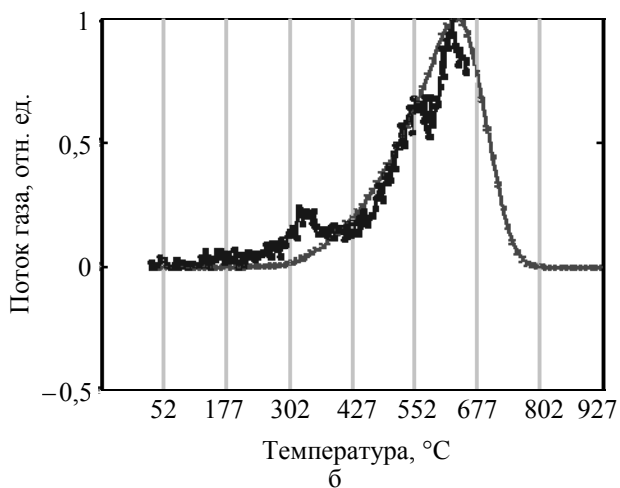
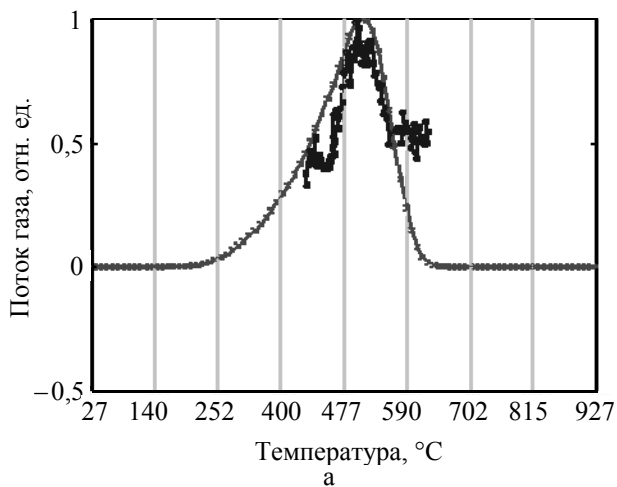


Рис. 14. Результаты моделирования диффузионных пиков выделения трития из образцов бериллия партии Б-3: а – образец толщиной 1,3 мм, скорость нагрева 10 °C/мин; б – образец толщиной 1,3 мм, скорость нагрева 20 °C/мин

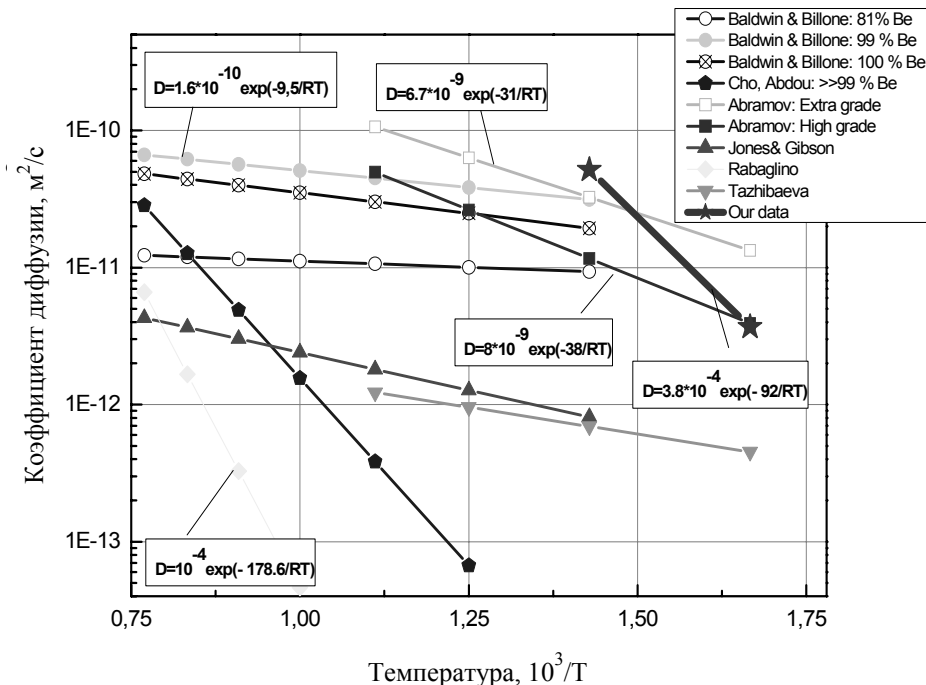


Рис. 15. Температурные зависимости коэффициентов диффузии изотопов водорода в бериллии

Заключение

В результате проведенных ТДС исследований облученного бериллия различных марок было показано, что при газовыделении существенная часть трития выделяется в виде тритиевой воды, причем для бериллия с общим количеством наработанного трития ~ 0,1 ppm его доля составляет более 95 % в общем выделении трития. Для облученного бериллия с общим количеством наработанного трития ~ 10 ppm основное выделение трития происходит в виде молекулы T₂.

Моделирование температурных зависимостей выделения молекул T₂ из различных образцов (по степени облучения и по марке бериллия) позволило определить эффективные коэффициенты диффузии трития в бериллии, которые удовлетворительно совпали между собой и с некоторыми литературными данными.

Список литературы

1. Baldwin D. L., Billone M. C. Diffusion/Desorption of tritium from irradiated beryllium. Journal of the Nuclear Materials. Vol. 948. 1991. P. 212–215.

2. Cho S., Abdou M. A. Analysis of tritium kinetics of SIBELIUS beryllium. *Fusion Engineering and Design*. Vol. 51. 2000. P. 85–91.
3. Abramov E., Riehm M. P., Thomson D. A. Deuterium Permeation and Diffusion in High Purity Beryllium. *Journal of the Nuclear Materials*. Vol. 175. 1990. P. 90–95.
4. Jones P., Gibson R. Hydrogen in beryllium. *Journal of the Nuclear Materials*. Vol. 21. 1967. P. 353–354.
5. Rabaglino E., Ronchi C., Cardella A. Recent progress in the modeling of helium and tritium behavior in irradiated beryllium pebbles. *Fusion Engineering and Design*. Vol. 69. 2001. P. 455–461.
6. Tazhibayeva I. L., Kenzhin E. A., Shestakov V., Chikhray E. V., Klepikov A., Romanenko O. Hydrogen release from reactor irradiated beryllium. *Journal of the Nuclear Materials*. Vol. 233–237. 1996. P. 837–840.
7. Ronchi C. On diffusion and precipitation of gas-in-solid. *Journal of the Nuclear Materials*. Vol. 148. 1987. P. 316.
8. Rabaglino E., Hiernaut J. P., Ronchi C., Scaffidi-Argentina F. Helium and tritium kinetics in irradiated beryllium pebbles. *Journal of the Nuclear Materials*. Vol. 307–311. 2002. P. 1424–1429.