

пользуемых составных частей общего гидравлического сопротивления коаксиальной сборки. Были разработаны конструктивные рекомендации по модернизации проточной части модуля бланкета, которые способствуют улучшению распределения расходов теплоносителя по параллельным коаксиальным каналам. Рекомендации были переданы в центральную проектную группу ИТЭР и нашли свое воплощение в конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Решетов В.А., Смирнов В.П., ПикULEVA Т.А.** Гидравлика кругового раздаточного коллектора. — ВАНТ. Сер. Реакторостроение, 1976, вып. 2(13).
2. **Новосельский О.Ю., Решетов В.А., Смирнов В.П.** Оценка коллекторного эффекта в гидравлическом расчете реактора. — ВАНТ. Сер. Реакторостроение, 1976, вып. 2(13), с. 75—76.
3. **Фомичев М.С.** Экспериментальная гидродинамика ЯЭУ. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. **Шарп Дж.** Гидравлическое моделирование. — М.: Мир, 1984.

Статья поступила в редакцию 5 октября 2003 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2003, вып. 4, с. 52—55.

УДК 621.039

ВЛИЯНИЕ ДОЗЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЛУЧЕНИЯ НА ВЫХОД ТРИТИЯ ИЗ ОБЛУЧЕННОГО БЕРИЛЛИЯ

И.Б. Куприянов, В.А. Горохов, В.В. Власов, А.М. Ковалев, В.П. Чакин

В данной статье рассмотрено влияние условий нейтронного облучения на выход трития из бериллия. Бериллиевые образцы облучали в реакторе СМ до флюенса $(0,37—2,0)10^{22} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) при 70—100 и 650—700 °С. Масс-спектрометрическая техника была использована для послереакторных экспериментов по изучению выхода трития в процессе ступенчатого отжига в интервале температур 250—1300 °С. Содержание гелия в образцах находилось в диапазоне от 521 до 3061 ат. млн⁻¹. Первые следы выхода трития выявлялись при температурах 406—553 °С. Показано, что температура облучения и уровень наработки гелия оказывают значительное влияние на выход трития. От 44 до 74% трития, содержащегося в образцах после низкотемпературного облучения (70—100 °С), выделяется из бериллия при температуре отжига до 800 °С, тогда как для образцов после высокотемпературного облучения (650—700 °С) эта величина не превышала 14%, а большая часть трития (68%) выделялась в температурном диапазоне от 800 до 920 °С. Увеличение наработки гелия от 521 до 3061 ат. млн⁻¹ приводит к уменьшению температуры максимальной скорости выхода трития и температуры завершения выхода трития из бериллия на 100—130 и 200—240 °С соответственно. На основе полученных данных были рассчитаны коэффициенты диффузии трития в бериллии.

THE EFFECT OF HELIUM GENERATION AND IRRADIATION TEMPERATURE ON TRITIUM RELEASE FROM NEUTRON IRRADIATED BERYLLIUM. I.B. KUPRIYANOV, V.A. GOROKHOV, V.V. VLASOV, A.M. KOVALEV, V.P. CHAKIN. The effect of neutron irradiation condition on tritium release from beryllium is described in this paper. Beryllium samples were irradiated in the SM reactor with neutron fluence ($E > 0.1 \text{ MeV}$) of $(0.37—2.0) 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ at 70—100 °C and 650—700 °C. Masspectrometry

technique was used in out of pile tritium release experiments during stepped-temperature anneal within a temperature range from 250 to 1300 °C. The total amount of helium accumulated in irradiated beryllium samples varied from 521 appm to 3061 appm. The first signs of tritium release were detected at temperature of 406—553 °C. It was shown that irradiation temperature and helium generation level significantly affect the tritium release. A fraction of 44—74% of tritium content in samples irradiated at low temperature (70—100 °C) is released from beryllium at an annealing temperature below 800 °C, whereas for samples after high temperature irradiation (650—700 °C) tritium release did not exceed 14%. Majority of tritium (~68%) is released within a temperature range from 800 to 920 °C. The increase of helium generation from 521 appm to 3061 appm results in lowering the temperature of maximal tritium release rate and the upper temperature of tritium release from beryllium by 100—130 °C and 200—240 °C, correspondingly. On the basis of data obtained, the diffusion coefficients of tritium in beryllium were calculated.

ВВЕДЕНИЕ

Знание параметров кинетики выхода трития из облученного бериллия является важным аспектом при использовании бериллия в будущих термоядерных реакторах. Поведение трития в облученном бериллии является сложной функцией, зависящей как от условий облучения (доза, температура, длительность и др.), так и от свойств бериллия (плотность, размер зерна, содержание оксида и др.). Несмотря на то, что за последние годы был достигнут определенный прогресс в понимании указанной проблемы [1—8], тем не менее многие стороны поведения трития и гелия изучены слабо. В статье представлены последние результаты экспериментов, осуществленных по исследованию влияния наработки гелия и температуры облучения на выход трития из бериллия [9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объектов исследования использовались образцы бериллия сортов ТВ-56 и ТШГ-56, облученные в высокопоточных каналах реактора СМ. Данные по параметрам облучения и исходным характеристикам образцов представлены в табл. 1 и 2.

Т а б л и ц а 1. Характеристики бериллия

Сорт материала	Плотность, г/см ³	Средний размер зерна, мкм	Чистота по Be, % вес.	Содержание BeO, % вес.
ТВ-56	1,856	22—25	98,63	1,48
ТШГ-56	1,85	22—25	99,10	0,95

Т а б л и ц а 2. Параметры облучения бериллия

Образец (сорт)	Форма образца	Флюенс нейтронов, н/см ² , E > 0,1 МэВ	Температура облучения, °C
№ 1 (ТВ-56)	неправ. геом. формы	0,5 · 10 ²²	70
№ 2 (ТШГ-56)	диск d=6 мм, h=0,5 мм	(0,37—0,59)10 ²²	650—700
№ 3 (ТВ-56)	диск d=6 мм, h=0,5 мм	0,9 · 10 ²²	70
№ 4 (ТВ-56)	неправ. геом. формы	2 · 10 ²²	70—100

Анализ кинетики выхода трития осуществлялся в процессе ступенчатых изотермических отжигов. Выделяющиеся при нагреве газы собирались в замкнутом объеме с подсоединенным к нему омегатронным масс-спектрометром (ОМС). ОМС калибровался по стандартным течам Н₂, ⁴Не. Количество вышедшего гелия рассчитывалось из чтения сигнала на массе 4. Для оценки вышедшего трития использовалась только масса 6, так как было найдено, что количество вышедшего трития в форме НТ- молекул было незначительно в наших экспериментальных условиях.

Подъем температуры при многоступенчатых отжигах осуществлялся через 20—170 °С с выдержкой на каждой ступени от 0,6 до 4 ч. Отжиги проводились в интервале температур от 250 °С до температуры плавления бериллия. На последней стадии ступенчатого отжига образцы доводились до плавления и определялось суммарное количество гелия и трития. По кинетическим кривым газовой выделения на основе решения дифференциального уравнения для тонкой пластины были рассчитаны коэффициенты диффузии трития на всех температурных ступенях отжига.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Кинетика выхода трития. Результаты измерения выхода фракции трития в зависимости от температуры и продолжительности отжига представлены на рис. 1, табл. 3, скорости выхода трития представлены на рис. 2.

Т а б л и ц а 3. Параметры выхода трития

Образец	Содержание гелия, ат. млн ⁻¹	Содержание трития, ат. млн ⁻¹	$T_{\text{нач}}$, °С	$T_{\text{завер}}$, °С	$T_{\text{макс. скорости выхода}}$, °С	Распухание, %
№ 1	521	6,5	553	1000	850	0
№ 2	601	12	406	1080	920	2
№ 3	1161	20	472	905	830	0,1
№ 4	3061	203	450	760	760	0,5—0,9

У образца № 1 наблюдалась самая высокая температура начала выхода трития $T_{\text{нач}} = 553$ °С. При повышении температуры до 600 °С скорость выхода трития увеличивалась более чем в 30 раз и оставалась на этом уровне вплоть до температуры отжига 700 °С. При $T = 760$ °С скорость выхода трития увеличивалась еще в 2,5 раза, а при 850 °С — еще в 2,2 раза, достигнув максимального уровня ($V_{\text{макс}}$). При последующих ступенях отжига и до завершения выхода трития ($T_{\text{завер}}$) при 1000 °С скорость выхода последовательно снижалась, хотя и оставалась высокой. Полная детритизация бериллия происходила при $T = 1000$ °С.

У образца № 2 выход трития начинался при $T_{\text{нач}} = 406$ °С. На последующих ступенях отжига скорость выхода трития возрастала в 1,4—4,3 раза на каждой температурной ступени, достигнув максимальной величины при 920 °С. При дальнейшем повышении температуры скорость выхода трития падала и полная детритизация бериллия происходила при $T_{\text{завер}} = 1080$ °С. Большая часть трития, содержащегося в образце (~68%), выделялась в области температур от 800 до 920 °С. 90%-ный выход трития происходил по достижении $T = 1010$ °С.

У образца № 3 выход трития начинался при $T_{\text{нач}} = 472$ °С. При температуре отжига 588 °С из образца № 3 выходило более 10% трития, а при температуре отжига 800 °С из образца № 3 выходило около 37% трития после четырехчасовой выдержки. Интегральный выход трития составил при этом 74%. ~90%-ный выход трития из образца происходил по достижении температуры отжига 830 °С, и при этой же температуре наблюдалась и максимальная скорость выхода трития из бериллия (табл. 3). Полная детритизация бериллия происходила при $T_{\text{завер}} = 905$ °С.

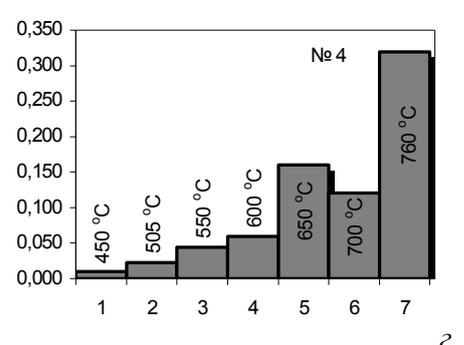
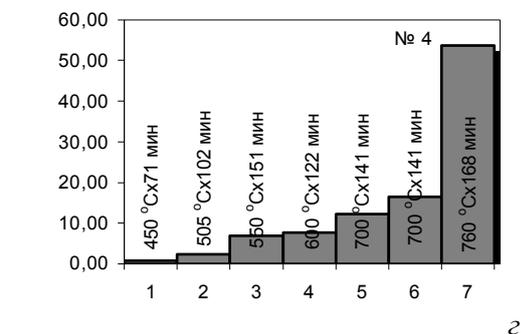
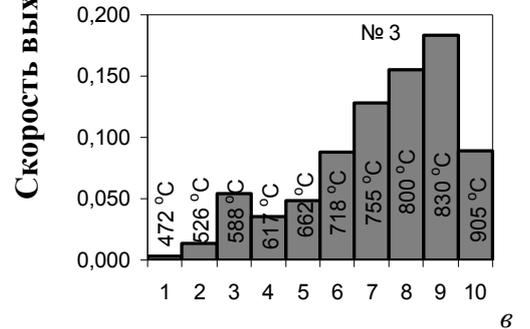
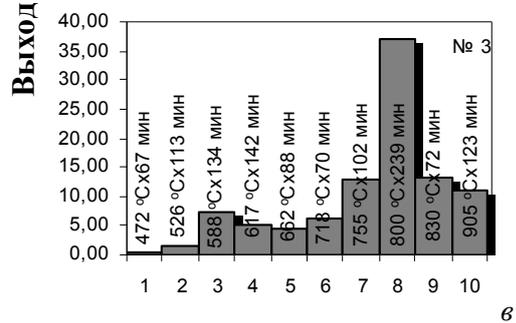
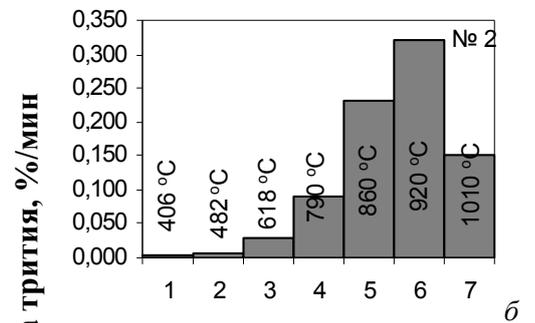
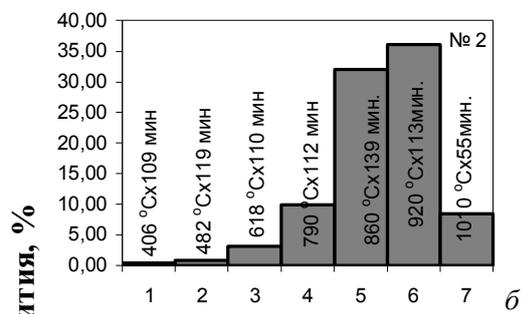
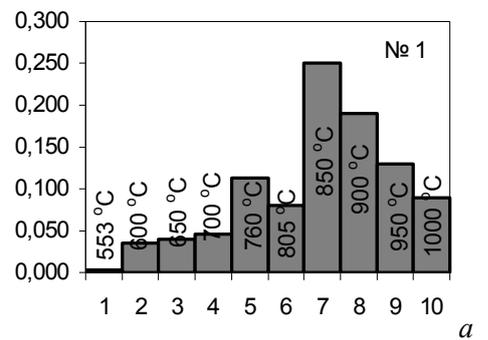
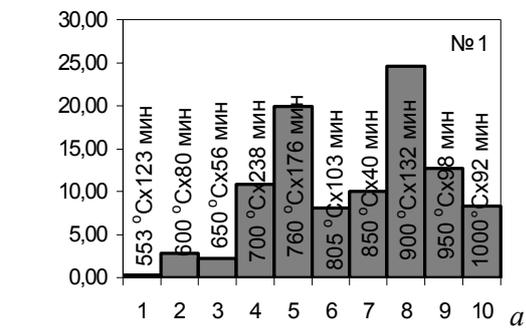


Рис. 1. Выход тритика

Рис. 2. Скорость выхода тритика

У образца № 4 интенсивный выход трития наблюдался уже при температуре 450 °С. На последующих ступенях отжига скорость выхода трития возрастала в 1,5—2,5 раза на каждой температурной ступени и достигла максимума при температуре 760 °С, что совпало с максимальной скоростью его выхода из образца (760 °С). За три часа выдержки при $T = 760$ °С из бериллия выделилось ~ 54% трития, содержащегося в образце.

Диффузия трития. Результаты расчета коэффициентов диффузии трития в образцах бериллия № 2 и 3 представлены на рис. 3. Представленные данные показывают, что при $T < 900$ °С диффузионная подвижность трития в образцах № 2 ниже, чем в образцах № 3. Они указывают, что при послереакторных отжигах бериллия степень удержания трития выше у образцов бериллия после высокотемпературного (650—700 °С) облучения, чем у образцов после облучения при низких (50—100 °С) температурах.

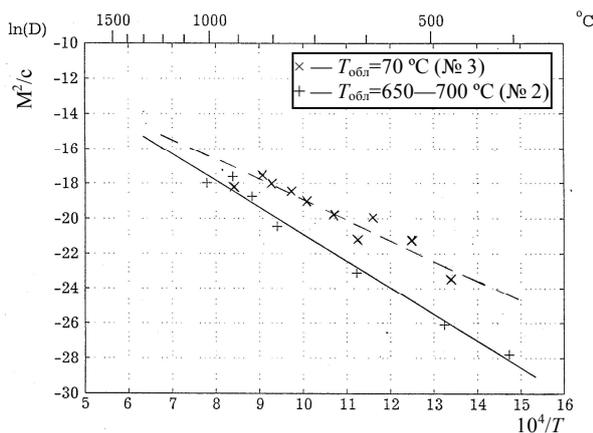


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициентов диффузии трития

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Среди факторов, которые могут оказывать значительное влияние на удержание и выход трития из бериллия, одними из важнейших являются факторы, обусловленные влиянием условий эксплуатации бериллия в будущих термоядерных реакторах, из которых наиболее значимыми являются температура, доза облучения и их влияние на характер изменения целостности структуры бериллия (растрескивание, распухание и т.п.) в процессе облучения и при последующих отжигах.

Результаты данного исследования показывают, что при $T < 400$ °С в области наработок гелия от 500 до 3100 ат. млн⁻¹ тритий полностью захватывается в облученном бериллии. Сравнение образцов, облученных в одинаковых температурных условиях (№ 1, 3 и 4) показывает, что увеличение наработки гелия от 521 до 3061 ат. млн⁻¹ приводит к уменьшению температуры:

- начала выхода трития из бериллия ($T_{\text{нач}}$) с 553 до 450 °С;
- завершения выхода трития из образцов ($T_{\text{завер}}$) с 1000 до 760 °С;
- максимальной скорости выхода трития из образцов ($T_{\text{макс скор. вых}}$) с 850 до 760 °С.

Для образца с максимальной наработкой гелия (№ 4, 3061 ат. млн⁻¹) температура максимальной скорости выхода трития и температура завершения выхода трития совпали с температурой начала выхода гелия ($T_{\text{нач}}^{\text{He}}$) из образца (760 °С). Для остальных образцов $T_{\text{завер}} > T_{\text{макс. скор. вых}} > T_{\text{нач}}^{\text{He}}$

Данный эффект, по-видимому, обусловлен различием в кинетике структурных изменений в бериллии (распухание, микрорастрескивание) в процессе облучения и послереакторного отжига.

Полученные данные также подтверждают предположение работы [7] о том, что температура облучения оказывает влияние на кинетику выхода и диффузионную подвижность трития. От 44 до 74% трития, содержащегося в бериллии после низкотемпературного (~70 °С) облучения, выходит из бериллия при температуре ниже 800 °С, тогда как после высокотемпературного облучения (650—700 °С) эта величина не превышала 14%, а большая часть трития (~68%) выделялась в температурном диапазоне от 800 до 920 °С. Аналогичное влияние температура облучения оказывает и на температуру завершения выхода трития. У образцов после низкотемпературного облучения полная детритизация бериллия происходила при более низких температурах отжига (~905—1018 °С), чем после высокотемпературного облучения (>1050 °С). Эти различия могут быть объяснены следующими причинами. У плотного бериллия, облученного при низких температурах (70—100 °С), практически весь тритий, образующийся в процессе облучения, остается в бериллии, а при высокотемпературном облучении часть образующегося трития выходит из бериллия в процессе облучения. Это происходит как за счет более высокой диффузионной подвижности трития при высоких температурах, так и в результате нарушения целостности структуры бериллия за счет распухания (см. табл. 3) и образования гелиевой пористости. Чем выше температура облучения и распухание бериллия, тем больше трития выходит из бериллия в процессе облучения [7]. Однако остающийся после высокотемпературного облучения тритий, по-видимому, находится в бериллии в более стабильном энергетическом состоянии, чем после низкотемпературного облучения [7]. Поэтому при отжиге бериллия, облученного при высоких температурах, в области температур $T_{отж} < T_{обл}$ из бериллия выделялась относительно небольшая часть трития (<15%), а большая его часть выделялась из бериллия при $T_{отж} > T_{обл}$. Можно ожидать, что степень удержания трития в бериллии при послереакторных отжигах будет тем выше, чем выше $T_{обл}$ и меньше величина распухания материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование влияния наработки гелия и температуры облучения на выход трития из бериллия. Основные результаты следующие:

— показано, что уровень наработки гелия и температура облучения оказывают значительное влияние на кинетику выхода трития из бериллия при ступенчатых изотермических отжигах;

— увеличение наработки гелия от 521 до 3061 ат. млн⁻¹ приводит к уменьшению: температуры начала выхода трития из бериллия на ~ 100 °С ($T_{нач}$ снижается с 553 до 450 °С); температуры завершения выхода трития из образцов на ~ 240 °С ($T_{завер}$ снижается с 1000 до 760 °С); температуры максимальной скорости выхода трития из образцов на ~ 90 °С ($T_{макс. скор. вых}$ снижается с 850 до 760 °С);

— температурный режим облучения оказывает значительное влияние на кинетику выхода и диффузионную подвижность трития. 44—74% трития, содержащегося

ся в бериллии после низкотемпературного (~70 °С) облучения, выделялось из бериллия при температурах ниже 800 °С, тогда как после высокотемпературного облучения (650—700 °С) эта величина не превышала 14%, а большая часть трития (~68%) выделялась в температурном диапазоне от 800 до 920 °С. Полная детритизация образцов после низкотемпературного облучения происходила в температурном диапазоне от ~905 до 1018 °С, а после высокотемпературного облучения — при температурах ~ 1080 °С;

— рассчитаны коэффициенты диффузии трития в бериллии после облучения в области температур от 400 до 1000 °С. При $T < 900$ °С диффузионная подвижность трития в образцах бериллия после высокотемпературного (650—700 °С) облучения ниже, чем в образцах после облучения при низких (50—100 °С) температурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Baldwin D.L., Billone M.C.** Diffusion/desorption of tritium from irradiated beryllium. — J. Nucl. Mater., 1994, vol. 212—215, p. 948—953.
2. **Ishitsuka E., Kawamura H., Terai T.** Effect of Oxide Layer on Tritium Release from Beryllium Pebbles. — Proc. of 18th SOFT. Fus. Techn., 1994, vol. 2, p. 1345—1348.
3. **Scaffidi-Argentina F., Werle H.** Tritium release from neutron irradiated beryllium: kinetics, long-time annealing and effect crack formation. — Proc. 2nd IEA Intern. Workshop on Beryllium Technology for Fusion, Jackson Lake Lodge, Wyoming, USA, Sept. 6—8, 1995, p. 235—248.
4. **Anderl R.A., Longhurst G.R., Oates M.A., Pawelko R.J.** Tritium and helium retention and release from irradiated beryllium. — Proc. Third IEA Intern. Workshop on Beryllium Technology for Fusion, Mito, Japan, JAERI-Conf. 98-001, Oct. 22—24, 1997, p. 307—315.
5. **Dalle-Donne M., Baldwin D.L., Gelles D.S., Greenwood L.R. et al.** Behavior of beryllium pebbles under irradiation. — Ibid., p. 296—306.
6. **Rolli R., Rubel S., Werle H., Wu C.H.** Influence of neutron irradiation on the tritium retention in beryllium. — Ibid., p. 228—233.
7. **Kupriyanov I.B., Vlasov V.V.** Helium and tritium behavior in neutron irradiation beryllium. — Proc. 4th Intern. Workshop on Beryllium Technology for Fusion, Karlsruhe, Germany, Sept. 14—16, 1999, p. 264—271.
8. **Kupriyanov I.B., Gorokhov V.A., Vlasov V.V., Kovalev A.M., Chakin V.P.** The effect of irradiation dose on tritium and helium release from neutron irradiated beryllium. — Proc. 5th Intern. Workshop on Beryllium Technology for Fusion, Oct. 10—12, 2001, Moscow, Russia. Перспективные материалы. Спец. вып., 2002, с. 85—89.
9. **Власов В.В. и др.** Вычисление коэффициентов диффузии газа в материалах при изотермическом отжиге испаряющегося образца. Отчет ИАЭ № 35/1-96-88, 1988.

Статья поступила в редакцию 22 сентября 2003 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2003, вып. 4, с. 55—61.