РЕСПУБЛИКАНСКОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ НА ПРАВЕ ХОЗЯЙСТВЕННОГО ВЕДЕНИЯ «ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ» (РГП ИЯФ)

УДК: 621.039.633

Әскербеков Саулет Қаныбекұлы

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ТРИТИЯ ИЗ МЕТАТИТАНАТА ЛИТИЯ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ОБЛУЧАТЕЛЬНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА РЕАКТОРЕ ВВР–К

Работа, представленная на XIX конференцию-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов Национального ядерного центра Республики Казахстан

(прикладные исследования)

Руководитель: Зав. лабораторией ПБАЭ

А.А. Шаймерденов

ABTOP

Әскербеков Саулет Қаныбекұлы

Инженер лаборатории проблем безопасности атомной энергии РГП «Институт ядерной физики», PhD докторант 2-го курса Евразийского Национального Университета имени Л.Н. Гумилева Физико-технический факультет 1993 года рождения, специальность – ядерная физика, работает в лаб. проблем безопасности атомной энергий (ЛПБАЭ) с 2018 г.,

общий стаж работы 8 лет

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Зав. лабораторией

А.А. Шаймерденов

подпись, дата

А.М. Аханов

подпись, дата

Инженер

Инженер

С.Қ. Әскербеков

подпись, дата

РЕФЕРАТ

Работа состоит из 15 страниц, 6 рисунков, 1 таблицы, 14 источников.

Объект исследования: литиевая керамика Li₂TiO_{3.}

Цель работы: Исследование выделения трития из литиевой керамики Li₂TiO₃ при различных температурах и мощности реактора.

Задачи исследований:

1) Разработка методики реакторного эксперимента.

2) Подготовка систем установки по внутриреакторному исследованию газовыделения к длительному облучению.

3) Исследовать выделение трития из метатитаната лития при стационарном режиме и переходных процессах в реакторе BBP-К.

4) Получение экспериментальных данных о параметрах установки при проведении облучательных экспериментов.

Методика исследований: Метод вакуумной экстракции.

Результат работ: Предложена модель для качественного описания процессов генерации и выделения трития из литиевой керамики.

Актуальность: Связано с выяснением механизмов и моделей, позволяющих описать процессы генерации, наработки, диффузии и выделения трития из литийсодержащих материалов в условиях нейтронного облучения.

Научная новизна: Состоит в получении новых экспериментальных данных о выделении тритийсодержащих молекул в условиях реакторного облучения литиевой керамики.

Практическая ценность: Построена модель выделения трития из метатитаната лития. Определены оптимальные режимы и методические процедуры проведения длительных облучательных экспериментов на реакторе BBP-К.

Личный вклад автора: Участие в научной работе на всех стадиях исследований: подготовка и проведение экспериментов; теплофизические расчеты; анализ и обработка экспериментальных данных.

Публикации:

1. Аскербеков С.К. Исследования высокотемпературной коррозии графита марки IG-110 интегральным масс- спектрометрическим методом/ Аскербеков С.К., Чихрай Е.В., Шестаков В.П., Кульсартов Т.В., Кенжина И.Е., Немкаева Р.Р. // Вестник НЯЦ РК. Курчатов, - 2015. - С. 9.

2. Аскербеков С. К. Высокотемпературная коррозия реакторных графитов марок РГТ И IG–110/ Аскербеков С. К., Кенжина И. Е., Чихрай Е. В., Шестаков В. П., Кульсартов Т. В., Муканова А. О. // Ядерная физика и инжиниринг. – 2015. – Т. 6, № 1–2. – С.25–36.

3. **Askerbekov S.** Early evaluation of hydrogen isotopes separation by V4Cr4Ti-based sorbents at low temperatures / Kulsartov T., Shestakov V., Chikhray Y., Kenzhina I., Askerbekov S., Gordienko Y., Ponkratov Y., Zaurbekova Zh. // Fusion Engineering and Design. – V. 113. – 2016. – P. 303–307.

4. **Askerbekov S.** "Isotope effect" of hydrogen and deuterium interaction with vanadium alloys VCrTi/ Kenzhina I., Kulsartov T., Chikhray Y., Shestakov V., Tolebay A., Askerbekov S., Tazhibayeva I., Gordienko Y., Ponkratov Y., Zaurbekova Zh., Mukanova A. // Materials Today: Proceedings. – V. 4. – 2017. – P. 4582-4588.

5. Аскербеков С. К. Исследование высокотемпературной коррозии графита с SiC-покрытием/ Кенжина И.Е., Аскербеков С.К., Чихрай Е.В., Шестаков В.П., Кульсартов Т.В., Каликулов О.А., Жолдыбаев Т.К. // Қазақ университеті, Вестник Серия физическая, №2 (61), – 2017. 37–43 с.

6. Аскербеков С. К. Экспериментальные исследования по высокотемпературному окислению прототипа топлива ВТГР / Аскербеков С.К., Чихрай Е.В., Кульсартов Т.В., Шестаков В.П., Заурбекова Ж.А., Кенжина И.Е., Гордиенко Ю.Н., Понкратов Ю.В. // Вестник НЯЦ РК. – 2018. – вып.4 (76). – С. 118–121.

7. **Askerbekov S.** Hydrogen isotopic effect during the graphite high-temperature corrosion in water vapours/ Chikhray Y., Askerbekov S., Kenzhina I., Gordienko Y., Bochkov V., Nesterov E., Varlamova N. // International Journal of Hydrogen Energy. – V. 44. – 2019. – P. 29365-29370.

8. Аскербеков С.К. Теплофизические расчеты реакторной ампулы для исследования газовыделения из литийсодержащих материалов при проведении экспериментов на реакторе ВВР-К / Чихрай Е.В., Аскербеков С.К., Шаймерденов А.А., Гизатулин Ш.Х., Аханов А.М., Кенжин Е.А., Кабулбек Е.Б // Вестник НЯЦ РК. – 2019. – вып.1 (77). – С. 52–59.

9. **Askerbekov S.** Methodology of Corrosion Testing of Nuclear and Fusion Reactors Materials Using TGA/DSC and MS Complex Techniques/ Ponkratov Yu., Bochkov V., Samarkhanov K., Karambayeva I., Askerbekov S. // Eurasian Chem. Tech. J. – V. 21. – 2019. – P. 35-40.

10. Аскербеков С.К. Исследования высокотемпературной коррозии SiC-покрытия на графите/ Аскербеков С.К., Чихрай Е.В., Понкратов Ю.В., Никитенков Н.Н. // Известия Томского политехнического университета. – 2019. – Т. 330. No 6. – Р. 98–108.

11. **Askerbekov S.** Reactor studies of hydrogen isotopes interaction with lithium CPS using dynamic sorption technique/ Tazhibayeva I., Ponkratov Y., Kulsartov T., Gordienko Y., Zaurbekova Zh., Gnyrya V., Chikhray Y., Askerbekov S., Vertkov A., Lyublinski I., Mazzitelli G. // Fusion Engineering and Design. – V. 146. – 2019. – P. 402-405.

12. **Askerbekov S.** The WWR-K Reactor Experimental Base for Studies of the Tritium Release from Materials Under Irradiation/ Shaimerdenov A., Gizatulin Sh., Dyussambayev D., Askerbekov S., Kenzhina I. // Fusion Science and Technology. ISSN: 1536-1055 (Print) 1943-7641 (Online) Journal homepage: https://www.tandfonline.com/loi/ufst20.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ И ТЕРМИНОВ

- ЯР ядерный реактор
- ТЯР термоядерный реактор
- ВВР-К водо-водяной реактор Казахстанец
- ЗК загрузочная капсула
- АУ ампульное устройство
- ХА хромель-алюмель
- ЭК экспериментальный канал
- 12X18H10Т марка стали
- АЗ активная зона
- ТМН турбомолекулярный насос
- МС масс-спектрометр
- ДД датчик давления
- ЦАЗ центр активной зоны

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	7
1.1 Исследуемый материал	7
1.2 Экспериментальная установка	8
1.3 Результаты реакторного эксперимента и их анализ	9
2. Модель выделения трития из литиевой керамики	11
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	14
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	15

введение

В настоящее время литий и соединения на его основе рассматриваются в качестве тритийвоспроизводящих материалов бридерного бланкета разрабатываемых термоядерных установок (ТЯУ). Литийсодержащие материалы подразделяются на два основных класса — жидкие литийсодержащие материалы (Li₂BeF₄, LiBeF₃, FLiNaBe, PbLi) и твёрдые литийсодержащие материалы (литиевые керамики) [1–3].

Материал бридера должен обеспечивать не только высокий выход трития по соответствующим ядерным реакциям, но и легкое высвобождение последнего для передачи в систему подготовки топлива. Анализ докладов, представленных на международной конференции [4] по материалам для термоядерного реактора, показывает, что наиболее часто в качестве бридерного материала предлагаются литиевые керамики, такие как Li₄SiO₄ и Li₂TiO₃.

Метатитанат лития (Li₂TiO₃) привлекает к себе внимание благодаря высокой скорости высвобождения трития при сравнительно низких температурах (от 200 до 400 °C) и химической стабильности.

Общей характеристикой для данных материалов является возможность осуществления ядерной реакции на изотопах лития с образованием трития:

$$Li^{6} + n = He^{4} + T + 4,78 M \Im B$$
(1)

Для обеспечения эффективной наработки трития и решения проблем, связанных с экологическими ограничениями при работе с ним, необходимо исследовать его взаимодействие с элементами предлагаемых систем энергетических ТЯУ и, в первую очередь, с самим материалом, в котором будет происходить наработка трития. Исследования, связанные с определением параметров наработки и выделения трития из литийсодержащих материалов непосредственно в условиях облучения, немногочисленны и имеют ряд противоречивых допущений [5-12]. Таким образом, существует проблема, связанная с выяснением механизмов и разработкой моделей, позволяющих описать процессы наработки, диффузии и выделения трития из данных материалов в условиях нейтронного облучения.

В настоящей статье представлены результаты реакторного эксперимента по изучению выделения тритийсодержащих молекул из метатитаната лития (литиевая керамика Li₂TiO₃) при различных температурах и мощности реактора. Метод регистрации трития представлял собой метод вакуумной экстракции с масс–спектрометрическим контролем, позволяющий провести полный анализ состава газовой фазы в камере с образцами за все время эксперимента.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1.1 Исследуемый материал

В данной работе изучалась литиевая керамика Li₂TiO₃ в форме гальки с обогащением лития 6Li 96%. Всего было изучено 177 шариков со средним диаметром ~ 1 \pm 0,5 мм с параметром сферичности ~ 1,05. Плотность образцов составила ~ 1,37 г / см³, пористость ~ 7%. Элементный состав представлен в таблице 1.

Элементы	Li	Ti	0	Ca	Na	K	Mg	В	Co	Al	Zr	Fe
Состав (ю%)	11.4	44.4	44.1	< 0.01	0.012	< 0.0001	0.0006	< 0.01	0.0030	0.009	0.0003	0.007

Таблица 1. Элементный состав исследуемых образцов

- 1.2 Экспериментальная установка
- В состав установки входят такие основные элементы как:
- ампульное устройство;
- вакуумная система откачки установки;
- информационно измерительная система.

На рисунке Рисунок 1 приведена принципиальная схема установки. Основная часть установки – это экспериментальное ампульное устройство (АУ), выполненное из стальной трубы. АУ устанавливается в канале загрузки, обеспечивая размещение исследуемого образца на уровне центра активной зоны реактора ВВР-К. Дизайн ампульного устройства позволяет загружать и отгружать капсулу с образцом через верхний загрузочный фланец, что дает возможность многоразового использования АУ. Соединения элементов всей высоковакумной системы выполнены через вакуумные зажимы стандарта KF (Kwik-Flange). Рабочий диапазон давлений КF-соединительных элементов от 1 атм до 1·10⁻⁸ торр и выдерживают нагрев до 150 °C. Имеется пост высоковакуумной без масляной откачки TPS-Flexy на базе турбомолекулярного насоса TV-301 и сухого спирального насоса IDP-7 (Agilent Technologies), который откачивает всю систему и создает необходимый вакуум в ней. Измерительное оборудование обеспечивает управление, измерение и регистрацию параметров систем установки. В него входят: квадрупольный масс-спектрометр RGA 100 (МС) для анализа остаточных газов в полости установки во время реакторного эксперимента; датчик давления (P); термопары. Во время реакторных экспериментов весь вакуумный тракт прогревается ленточными нагревателями ЭНГЛУ-400, и поддерживается при температуре 100 °С. Электроприборы установки, в том числе откачной пост и масс-спектрометр, установлены в экспериментальном помещении в максимальной близости к АУ и управляются удаленно по сети (ІР-протокол), обеспечивая безопасную работу оператора установки во время эксперимента.



АУ – ампульное устройство; КЗ – канал загрузки; В – клапан вакуумный; ДД – датчик давления; ТМН – турбомолекулярный насос; МС – масс–спектрометр



1.3 Результаты реакторного эксперимента и их анализ

Основные особенности проведенных исследований описаны далее, по пунктам.

- 1) Во время всего эксперимента проводилась регистрация:
 - температуры реакторной ампулы: на дне ампулы (T1–bottom) и на ее стенке (T2–wall) в области капсулы с исследуемыми образцами;
 - давления в различных частях экспериментальной установки: в области турбомолекулярного насоса (P1–TMH) и в области масс–спектрометра (P2– RGA);
 - парциальных давлений газов в камере установки с образцами: регистрировались газы с массовыми числами от M2 до M44;
 - тепловая мощность реактора.
- 2) Выход реактора на мощность 6 МВт проходил последовательно: первоначально достигались уровни мощности в 18 кВт, 120 кВт, 1 МВт, 3 МВт, 4,8 МВт и 6 МВт. Выдержка на уровне мощности 1 МВт составляла ~ 1 час, на 3 МВт ~ 1,5 часа, на 4.8 МВт ~ 3 часа.
- 3) В процессе увеличения мощности реактора наблюдалось увеличение температуры ампулы до некоторых стационарных значений и увеличивалось газовыделение из материалов реакторной ампулы, которое со временем снижалось. Происходил радиационный отжиг ампулы.

Общая диаграмма реакторного эксперимента приведена на рисунке Рисунок 2. Во время увеличения газовыделения до общего давления в области масс–спектрометра выше 0,1 Па, масс–спектрометр переключался в защищенный режим, во время которого существенно снижался ток ионизации в камере масс–спектрометра. Поэтому во время таких выбросов газа наблюдалось общее снижение значений во всем диапазоне масс–спектра. Такие участки в дальнейшем не анализировались. Основной анализ выполнялся для участков, где общее давление в камере масс–спектрометра было менее 0,1 Па, что соответствует его рабочему режиму.

Основными газами, которые выделялись при повышении температуры и мощности были водород, углекислый и угарный газ, а также пары воды (см. рис. 3).

Выделение гелия и тритий содержащих молекул (НТ и T₂) наблюдалось начиная с мощности реактора 1 МВт, причем значение пика M4 (Не или НТ) было где-то на порядок выше чем значение пика M6 (T₂).

Для мощностей реактора 1, 3 МВт квазиравновесное состояние для потока газовыделения молекул (He+HT) и (T₂) в камеру установки характеризовалось линейным ростом; для мощности 4,8 МВт наблюдался постепенный выход на стационарное значение потока газовыделения молекул (He+HT) и снижающийся линейный рост потока газовыделения молекулы (T₂). Для мощности 6 МВт квазиравновесное состояние для потока газовыделения молекул (He+HT) и (T₂) характеризовалось снижением значений потока (после первоначального роста при увеличении мощности) (см. рис. 4).



Рисунок 2. Диаграмма реакторного эксперимента



при увеличении мощности реактора и температуры ампулы

Рисунок 4. Газовыделения молекул (He+HT) и (T₂) в камеру установки на разных этапах эксперимента

2. Модель выделения трития из литиевой керамики

Построена общая модель и описана особенность выделения трития из образцов литиевой керамики в условиях реакторного облучения. Как показали результаты экспериментов выделение трития происходит в виде двух молекул (НТ и Т₂), поэтому модель должна учитывать процессы взаимодействия атомов водорода и трития на поверхности керамики.

В общем случае, процесс взаимодействия газовой смеси изотопов водорода с твердым телом или жидкостью описывается следующими процессами: адсорбция и диссоциация молекул на поверхности (F); растворение атомов с поверхности в объем (B); выход атомов из объема на поверхность(J); ассоциация атомов на поверхности и десорбция (A). (см. рис. 5).



Рисунок 5 – Диаграмма взаимодействия газа с поверхностью

Общее выражение для баланса атомов водорода и трития приведено ниже (с учетом принятых обозначений):

$$\frac{dH}{dt} = F_{HT} + F_{H2} + J_H - A_{HT} - A_{H2} - B_H$$
(2)

$$\frac{dT}{dt} = F_{HT} + F_{T2} + J_T - A_{HT} - A_{T2} - B_T$$
(3)

Далее определим компоненты в уравнении баланса. Исходя из уравнения состояния для идеального газа, *G* (моль/(м²с) падающий поток молекул газа из смеси на поверхность твердого тела записывается как

$$G = \frac{1}{4}n \quad \widehat{v} = \frac{H}{4} \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot T \cdot k_B}{\pi \cdot m}} = \frac{2 \cdot p \quad (Pa)}{\sqrt{8 \cdot \pi \cdot T \cdot k_B \cdot m}}$$
(4)

где m – масса падающей молекулы (кг), n, v, p – концентрация (моль/м³), средняя скорость (м/с) и парциальное давление молекул газа (Па), соответственно, T – абсолютная температура газовой смеси, К k_B – постоянная Больцмана.

Тогда поток атомов на поверхность тогда можно записать следующим образом:

$$F_{HT} = G_{HT} \cdot s_{HT} \left(1 - \theta\right)^2 \tag{5}$$

$$F_{T2} = 2 \cdot G_{T2} \cdot s_{T2} (1 - \theta)^2 \tag{6}$$

где Θ-общая степень заполненности центров адсорбции на поверхности материала;

$$s = s0 \exp(-\frac{E_C}{R \cdot T}) \tag{7}$$

где s — Аррениусовское выражение для коэффициента прилипания газа к поверхности; здесь E_C kJ/mol — энергия активации адсорбции, для молекулы газа, R — универсальная газовая постоянная).

Поток атомов с поверхности возникающий за счет десорбции *H_{i,j}* компоненты смеси из поверхности обратно в газовую фазу равен:

$$A_{HT} = A0 \cdot \Theta_H \cdot \Theta_T \cdot \exp(-\frac{E_{AHT}}{R \cdot T})$$
(8)

$$A_{T2} = 2 \cdot A0 \cdot \Theta_T^2 \cdot \exp(-\frac{E_{AT2}}{R \cdot T})$$
(9)

где A0 – константа десорбции (здесь сделаем предположение что константа десорбции одинакова для всех процессов десорбции) ; *E*_A – энергия активации десорбции kJ/mol.

Поток атомов с поверхности в объем материала (поток растворения) определяется как

$$B = B0 \cdot \Theta \quad \cdot \exp(-\frac{E_S}{R \cdot T}) \tag{10}$$

где B0 – константа процесса растворения в объем образца; E_{S_c} – энергия активации растворения с поверхности в объем, для атома *H*. kJ/mol.

Поток выхода растворенного атома газа из объема твердого тела обратно на поверхность равен

$$J = J0 \cdot (1 - \Theta) \cdot H_{sol} \cdot \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right), \tag{11}$$

где J0 — константа процесса выхода из объема образца на поверхность, E_D — энергия активации диффузии атома в материале. kJ/mol; H_{sol} приповерхностная концентрация атомов (моль/м³).

Полное моделирование с помощью такой модели будет выполнено по результатам всех реакторных испытаний и запланировано согласно календарному плану в следующем году.

Пока же просто проведем оценку из следующих соображений:

Как известно, атомы лития 6 (в керамике с обогащением по литию шесть 96%) при ядерной реакции с тепловыми нейтронами образует гелий и тритий ⁶Li + $n \rightarrow$ T + ⁴He + 4,78 МэВ.

Для каждого этапа эксперимента существует квазиравновесное состояние выделения молекул НТ и T₂. Данному состоянию соответствует некоторые квазиравновесные концентрации атомов Н и T (C_H, C_T) на поверхности керамики.

Квазиравновесные потоки газов в систему (согласно закону Полани–Вигнера [14]) будут следующими:

$$\varphi(H_2) = b_1 \cdot C_H^2 \tag{12}$$

$$\varphi(HT) = b_2 \cdot C_H \cdot C_T \tag{13}$$

$$\varphi(T_2) = b_3 \cdot C_T^2 \tag{14}$$

Сделав еще предположение, что b1~b2~b3, нами были оценены зависимости квазиравновесной концентрации трития на поверхности керамики и определены абсолютные значения потоков газов из керамики.

По полученным значениям был проанализированы результаты выделения трития при мощностях реактора 1, 3 МВт: на рисунке 6 приведены значения скорости изменения давления молекул НТ и T_2 в камере установки. Как видно для этой стадии эксперимента наблюдается линейная зависимость этих параметров от мощности. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что в рассматриваемом интервале идет накопление атомов трития в образце (при малых потоках его выделения) практически линейно. А поверхностная концентрация атомов трития пропорциональна его объемной концентрации.



Рисунок 6. Зависимость скорости изменения давления молекул HT и T₂ в камере установки от мощности реактора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований были получены временные зависимости выделения трития из литиевой керамики в условиях реакторного облучения при различной мощности реактора и температуре образцов.

Длительность облучения образцов литиевой керамики в реакторе BBP-К составило 21 эффективных суток. Температура образцов, во время облучения, не превышала 650°С.

Основными газами, которые выделялись при повышении температуры и мощности реактора были водород, углекислый и угарный газ, а также пары воды, что характерно для не отожжённой капсулы.

Выделение гелия и тритий содержащих молекул (НТ и Т2) наблюдалось начиная с мощности реактора 1 МВт, причем значение пика М4 (Не или НТ) было где-то на порядок выше, чем значение пика М6 (Т2).

Проведен качественный анализ результатов длительного облучательного эксперимента на реакторе BBP–К по исследованию выделения трития из метатитаната лития, по результатам которого:

- получены данные об особенностях газовыделения из материалов ячейки при ее нагреве в условиях реакторного облучения;
- определены квазиравновесные временные зависимости потоков выделения молекул гелия и трития из литиевой керамики, по которым сделан вывод о том, что на начальной стадии облучения поверхностная концентрация атомов трития пропорциональна его объемной концентрации и линейно увеличивается от времени облучения;
- предложена модель для качественного описания процессов генерации и выделения трития из литиевой керамики. На базе предложенной модели можно будет прогнозировать наработку трития в последующих экспериментах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. M. Nishikawa, A. Baba, S. Odoi, H. Kawamura. Tritium inventory estimation in solid blanket system // Fusion Engineering and Design. – V. 39–40. – 1998. – P. 615–625.

2. M. Nishikawa, N. Nakashima, K. Hashimoto, S. Beloglazov. Isotope exchange capacity on Li4SiO4 and comparison of tritium inventory in various solid breeder blankets // Journal of Nuclear Science and Technology. – V. 38. – 2001. – P. 944–951.

3. H. Kudo, K. Okuno. Tritium behavior in blanket system // Journal of Nuclear Materials.-105 1988. – V. 155–157. – P. 524–529

4. Fusion Reactor materials. Proceedings of the 13th International Conference on Fusion Reactor materials (ICFRM-13), Nice, France, 10-14 December, 2007 // Journal of Nuclear Materials. – V. 386-388. – 2009. – P. 1-1110.

5. K. Lemmens, E. González–Robles, B. Kienzler, E. Curti, D. Serrano–Purroy, R. Sureda, A. Martínez–Torrents, O. Roth, E. Slonszki, T. Mennecart, I. Günther–Leopold, Z. Hózer. Instant release of fission products in leaching experiments with high burn–up nuclear fuels in the framework of the Euratom project FIRST– Nuclides // Journal of Nuclear Materials. – V. 484. – 2017. –P. 307–323.

6. E.B. Douglas, J.C. Amanda, M.C. Andrew. Measurement of fission gas release from irradiated U–Mo dispersion fuel samples // Journal of Nuclear Materials. – V. 478. – 2016. –P. 365–374.

7. J.E. Jeffrey, T.P. Binh, M.S. Dawn, T.M. John, A.P. David. Analysis of fission gas release-to-birth ratio data from the AGR irradiations // Nuclear Engineering and Design. – V. 306. – 2016. –P. 14–23.

8. C. Vladimir, R. Rolf, P. Vladimirov, A. Moeslang. Tritium and helium release from beryllium pebbles neutron–irradiated up to 230 appm tritium and 3000 appm helium // Nuclear Materials and Energy. – V. 9. – 2016. – P. 207–215.

9. H. Matthias, R. Kolb, R. Knitter. Tritium adsorption/release behaviour of advanced EU breeder pebbles // Journal of Nuclear Materials. – V. 489. – 2017. – P. 229–235.

10. G. Ran, C. Xiao, X. Chen, Y. Gong, C. Kang, X. Wang. Correlation between the processes of water desorption and tritium release from Li4SiO4 ceramic pebbles // Journal of Nuclear Materials. -V. 466. -2015. -P. 316–321.

11. O. Kentaro, E. Yuki, K. Yoshinori, H. Tsuyoshi. Masayuki O. Satoshi S. Chikara K. Experimental investigation on tritium release from lithium titanate pebble under high temperature of 1073 K // Fusion Engineering and Design. – V. 98–99. – 2015. – P. 1843–1846.

12. S. Til, A. Magielsen, M. Stijkel, H. Cobussen. Out of pile tritium release behaviour and microscopic investigation of lithium metatitanate irradiated in the High Flux Reactor in Petten // Fusion Engineering and Design. – V. 85. Issues 7-9. – 2010. – P. 1143–1146.

13. V. Chakin, R. Rolli, P. Vladimirov, A. Moeslang. Tritium and helium release from beryllium pebbles neutron–irradiated up to 230 appm tritium and 3000 appm helium // Nuclear Materials and Energy. – V. 9. – 2016. – P. 207–215.

14. J.A.W. Elliott, C. A. Ward. Temperature programmed desorption // Journal of Chemical Physics. – V. 106. – 1997– P. 13–18.