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 | • | | |
| Инженер | подпись, дата | А.М. Аханов | | |
| Инженер | подпись, дата | С.Қ. Әскербеков | | |

РЕФЕРАТ

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

Объект исследования: литиевая керамика Li₂TiO₃.

Цель работы: Исследование выделения трития из литиевой керамики Li_2TiO_3 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 ВВР-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-K.

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, \mathbb{N}^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

12X18H10T – марка стали

АЗ – активная зона

ТМН – турбомолекулярный насос

МС – масс-спектрометр

ДД – датчик давления

ЦАЗ – центр активной зоны

СОДЕРЖАНИЕ

| ВВЕДЕНИЕ | 7 |
|---|-----|
| 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ | |
| 1.1 Исследуемый материал | 7 |
| 1.2 Экспериментальная установка | |
| 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 (Li_2TiO_3) 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:

$$Li^6 + n = He^4 + T + 4,78 M g B$$
 (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 Li_2TiO_3) 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 Li_2TiO_3 в форме гальки с обогащением лития 6Li 96%. Всего было изучено 177 шариков со средним диаметром $\sim 1 \pm 0.5$ мм с параметром сферичности ~ 1.05 . Плотность образцов составила ~ 1.37 г / см³, пористость $\sim 7\%$. Элементный состав представлен в таблице 1.

Таблица 1. Элементный состав исследуемых образцов

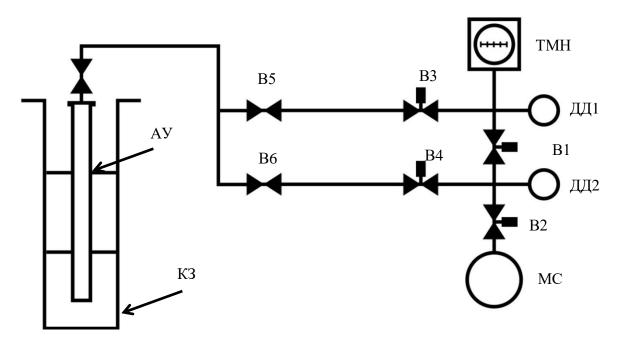
| Элементы | Li | Ti | 0 | Ca | Na | K | Mg | В | Co | Al | Zr | Fe |
|----------------|------|------|------|--------|-------|----------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|
| Состав (ω%) | 11.4 | 44.4 | 44.1 | < 0.01 | 0.012 | < 0.0001 | 0.0006 | < 0.01 | 0.0030 | 0.009 | 0.0003 | 0.007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

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 KF-соединительных элементов от 1 атм до $1\cdot 10^{-8}$ 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 (MC) для анализа остаточных газов в полости установки во время реакторного эксперимента; датчик давления (Р); термопары. Во время реакторных экспериментов весь вакуумный тракт прогревается ленточными нагревателями ЭНГЛУ-400, и поддерживается при температуре 100 °C. 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

Рисунок 1. Схема установки для проведения исследования газовыделения из материалов ЯР и ТЯР на реакторе ВВР–К

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 \sim 1 час, на 3 МВт \sim 1,5 часа, на 4.8 МВт \sim 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 (HT и T_2) наблюдалось начиная с мощности реактора 1 МВт, причем значение пика M4 (He или HT) было где—то на порядок выше чем значение пика M6 (T_2).

Для мощностей реактора 1, 3 МВт квазиравновесное состояние для потока газовыделения молекул (He+HT) и (T_2) 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 (T_2). Для мощности 6 МВт квазиравновесное состояние для потока газовыделения молекул (He+HT) и (T_2) характеризовалось снижением значений потока (после первоначального роста при увеличении мощности) (см. рис. 4).

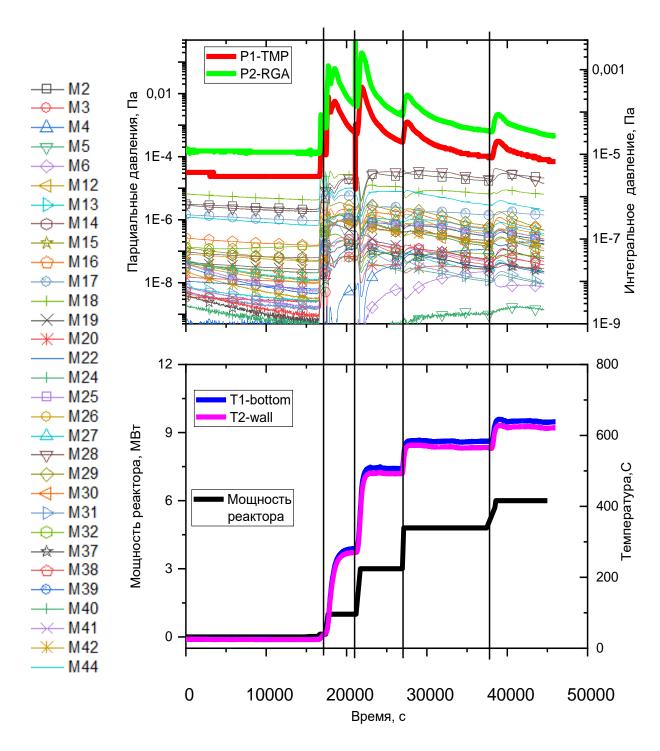
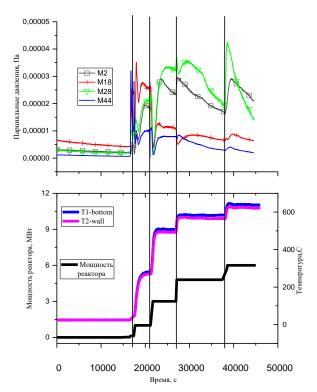


Рисунок 2. Диаграмма реакторного эксперимента



2,0E-07 —— He+HT давления Не+НТ, Па 1,5E-0 1,0E-07 Парциальные 5,0E-08 —— T₂ 12 800 T1-botton 600 Мощность реактора, МВт 00 Температура,С Мощность 200 0 10000 20000 30000 40000 50000 Время, с

Рисунок 3. Газовыделение основных газов 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 (HT и T_2), 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 (В); выход атомов из объема на поверхность(J); ассоциация атомов на поверхности и десорбция (A). (см. рис. 5).

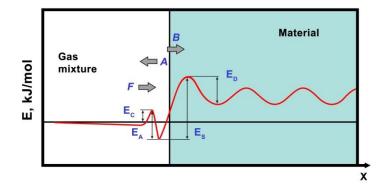


Рисунок 5 – Диаграмма взаимодействия газа с поверхностью

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

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

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

Далее определим компоненты в уравнении баланса. Исходя из уравнения состояния для идеального газа, G (моль/(м 2 с) падающий поток молекул газа из смеси на поверхность твердого тела записывается как

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

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:

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

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

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)

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

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

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

где B0 — константа процесса растворения в объем образца; $E_{S,}$ — 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 6 Li + $n \rightarrow$ T + 4 He + 4,78 MэB.

Для каждого этапа эксперимента существует квазиравновесное состояние выделения молекул HT и T_2 . Данному состоянию соответствует некоторые квазиравновесные концентрации атомов H 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 $b1\sim b2\sim b3$, 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 Т₂ 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.

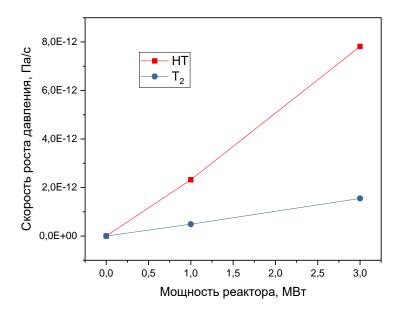


Рисунок 6. Зависимость скорости изменения давления молекул HT и T_2 в камере установки от мощности реактора

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 (HT и T2) наблюдалось начиная с мощности реактора 1 МВт, причем значение пика M4 (He или HT) было где—то на порядок выше, чем значение пика M6 (T2).

Проведен качественный анализ результатов длительного облучательного эксперимента на реакторе ВВР–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.