

А.А. Шаймерденов^{1*}, А.М. Аханов¹, Д.С. Сайранбаев¹, М.Т. Айткулов¹,
К.С. Киселев¹, Ж.Т. Буғыбай¹, М.С. Мережко¹, А.Т. Мухамеджанова²

¹Институт ядерной физики, Казахстан, г.Алматы

²Казахский национальный университет им.аль-Фараби, Казахстан, г.Алматы

*email: ashaimerdenov@inp.kz

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОБЛУЧЕНИЮ ЛИТИЕВОЙ КЕРАМИКИ В РЕАКТОРЕ ВВР-К

Представлены результаты нейтронно-физических и теплофизических расчетов разных конструкций капсул с литиевой керамикой при облучении в реакторе ВВР-К. Описаны основные условия облучения литиевых керамик в активной области реактора ВВР-К. Показана возможность проведения двух типов реакторных экспериментов с литиевой керамикой: высокотемпературное облучение с регистрацией выделения трития в режиме реального времени и низкотемпературное облучение с пост-реакторными экспериментами по дегазации образцов. При облучении литиевой керамики в штатной капсуле, температура образцов не превышает 60°C, а при облучении в экспериментальном устройстве, температура образцов может быть повышена до 800 °С. Приведена зависимость температуры образцов в облучательной капсуле экспериментального устройства от мощности реактора. Приведены оценки по наработке трития в литиевой керамике (по отдельности для ядерных реакций ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ и ${}^7\text{Li}(n,\alpha n)\text{T}$) для разных плотностей потока нейтронов. Скорость образования трития в периферийном облучательном канале реактора ВВР-К составит $\sim 2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Эффект реактивности от загрузки капсулы с образцами в активную зону реактора ВВР-К составит минус 0,05 $\beta_{эфф}$ для штатной капсулы и минус 0,3 $\beta_{эфф}$ для экспериментального устройства.

Ключевые слова: литиевая керамика, ВВР-К, выделения трития, поток нейтронов

А.А. Шаймерденов^{1*}, А.М. Аханов¹, Д.С. Сайранбаев¹, М.Т. Айткулов¹,
К.С. Киселев¹, Ж.Т. Буғыбай¹, М.С. Мережко¹, А.Т. Мухамеджанова²

¹Ядролық физика институты, Қазақстан, Алматы қ.

² Әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

*email: ashaimerdenov@inp.kz

ССР-Қ реакторында литий керамикасын сәулелендіру эксперименттерінің есептік негіздемесі

Бұл жұмыста ССР-Қ реакторында литий керамикасы бар капсулалардың сәулелену кезіндегі әртүрлі конструкцияларының нейтрондық-физикалық және термофизикалық есептеулерінің нәтижелері ұсынылған. ССР-Қ реакторының белсенді аймағында литий керамикасының сәулеленуінің негізгі шарттары сипатталған. Литий керамикасымен өткізуге болатын реакторлық эксперименттердің екі түрін жүргізу мүмкіндігі көрсетілген: нақты уақыт режимінде тритий бөлінуін тіркей отырып, жоғары температуралы сәулелену және үлгілерді газсыздандыру бойынша реактордан кейінгі эксперименттермен төмен температуралы сәулелену көрсетілген. Литий керамикасы штаттық капсулада сәулеленген кезде үлгілердің температурасы 60 °С-тан аспайды, ал эксперименттік құрылғыда сәулеленген кезде үлгілердің температурасы 800 °С-қа дейін көтерілуі мүмкін. Эксперименттік құрылғының сәулелендіру капсуласындағы үлгілердің температурасының реактордың қуатына тәуелділігі келтірілген. Нейтрондар ағынының әртүрлі тығыздығы үшін литий керамикасындағы тритийдің (${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ және ${}^7\text{Li}(n,\alpha n)\text{T}$) ядролық реакциялары үшін жеке-жеке) өндірілуі яғни шығуы бойынша бағалау келтірілген. ССР-Қ реакторының перифериялық сәулелендіру каналындағы тритийдің түзілу жылдамдығы $\sim 2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ құрайды. ССР-Қ реакторының белсенді аймағына үлгілер салынған капсуланы тиеудің реактивтілік әсері штаттық капсула үшін минус 0,05 $\beta_{эфф}$ және эксперименттік құрылғы үшін минус 0,3 $\beta_{эфф}$ құрайды.

Түйін сөздер: литий керамикасы, ССР-Қ, тритийдің бөлінуі, нейтрондар ағыны

A.A. Shaimerdenov^{1*}, A.M. Akhanov¹, D.S. Sairanbayev¹, M.T. Aitkulov¹,
K.S. Kisselyov¹, Zh.T. Buggybay¹, M.S. Merezhko¹, A.T. Mukhamejanova²

¹Institute of Nuclear Physics, Kazakhstan, Almaty

²I-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

*email: ashaimerdenov@inp.kz

Computational justification of experiments on irradiation of lithium ceramics in the WWR-K reactor

The results of neutron-physical and thermophysical calculations of different designs of capsules with lithium ceramics under irradiation in the WWR-K reactor are presented. The main conditions for irradiation of lithium ceramics in the WWR-K reactor core are described. Two types of reactor experiments with lithium ceramics have been shown to be possible: high-temperature irradiation with in-situ registration of tritium release and low-temperature irradiation with post-reactor experiments on sample degassing. When lithium ceramics are irradiated in the standard capsule, the temperature of the samples does not exceed 60°C, but when irradiated in the experimental device, the temperature of the samples can be raised to 800°C. The dependence of the temperature of the samples in the irradiation capsule of the experimental device on the reactor power is given. Estimates are given for the tritium yield in lithium ceramics (separately for $6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ and $7\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ nuclear reactions) for different neutron flux densities. The rate of tritium generation in the peripheral irradiation channel of the WWR-K will be $\sim 2 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$. The reactivity effect from loading a sample capsule into the core of the WWR-K will be minus 0.05 β_{eff} for the standard capsule and minus 0.3 β_{eff} for the experimental device.

Key words: lithium ceramics, WWR-K, tritium precipitation, neutron flux

Введение

Исследования изменения основных физико-механических свойств перспективных материалов термоядерных реакторов (ТЯР) в процессе их эксплуатации, например, данные по водородному охрупчиванию, коррозии материалов (взаимодействию с химически активными газовыми средами), газовом набухании, о выделении газообразных продуктов ядерных реакций в условиях облучения являются важной задачей для обоснования безопасного использования этих материалов [1-8].

В термоядерной энергетике существенное влияние на механические свойства материала оказывает водород, где он и его изотопы (дейтерий, тритий) непосредственно участвуют в процессе производства энергии – термоядерный синтез. Материалы, используемые в конструкциях ТЯР, работают в нейтронных полях. Наличие этих полей приводит к многочисленным ядерным реакциям в материале, в том числе с легирующими элементами и примесями, наработке водорода и его изотопов (дейтерия и трития) в материале, а также вызывает радиационные изменения структуры и фазового состава материала. Комплексное воздействие факторов эксплуатации на

конструкционные и функциональные материалы ТЯР инициирует сложный процесс изменения свойств материалов, который может привести к внезапному их разрушению. Кроме того, отдельной важной причиной пристального внимания к водородопроницаемости конструкционных и функциональных материалов, является оценка тритиевой безопасности термоядерных установок. Утечки трития сквозь конструкционные материалы ТЯР определяют безопасность использования таких установок в будущем.

Развитие научно-технического прогресса приводит к разработке новых материалов с улучшенными свойствами, что делает необходимым проведение комплексных исследований. Кроме того, имеется недостаток в экспериментальных данных для уже разработанных и используемых материалов, который заключается в отсутствии или недостаточности данных при определенных условиях испытания. Следовательно, исследование материалов ТЯР в условиях близких к условиям их эксплуатации в ТЯР является важной и востребованной задачей.

Твердотельные бланкеты-бридеры, состоящие из пэбблов на основе литиевых керамик, широко рассматриваются как перспективная концепция бланкета для будущего

реактора DEMO (демонстрационного реактора) [9-11] и их испытания планируется провести в ITER (Международном термоядерном экспериментальном реакторе) [12-17]. Как известно, основными важными характеристиками литийсодержащих материалов blankets термоядерных реакторов являются их свойства по отношению к наработке и эффективности выделения трития, устойчивость к химическим, температурным и механическим нагрузкам.

Реактор ВВР-К является стационарным, исследовательским реактором с большим количеством облучательных каналов [18,19]. Исследования литиевых керамик можно проводить при разных условиях облучения (плотность потока нейтронов, температура, среда и давление). В настоящей работе приведено расчетное обоснование экспериментов по облучению литиевой керамики в реакторе ВВР-К. Описаны основные условия облучения и приведены результаты нейтронно-физических и теплофизических расчетов.

Материалы и методы

Исследуемые образцы представляют собой гранулы (пэбблы) из литиевой керамики. В настоящей работе рассмотрен только метатитанат лития. Основные характеристики рассмотренных образцов приведены в таблице 1, а внешний вид образцов показан на рисунке 1.

Таблица 1 – Характеристики исследуемых образцов

Параметр	Величина/значение
Тип образца	Метатитанат лития
Химическая формула образца	Li_2TiO_3
Плотность метатитаната лития, г/см ³	3,077
Обогащение метатитаната лития по литию-6, %	96
Геометрия образцов	Сфера (пэббл)
Диаметр образцов, мм	1
Сферичность образцов	1,05
Масса образцов, г	0,37



Рисунок 1 – Внешний вид метатитаната лития

Облучение образцов возможно при разных условиях: (1) в штатной капсуле; (2) в экспериментальном устройстве (ЭУ). При облучении в штатной капсуле (рис. 2), образцы размещаются в алюминиевых подкапсулах, которые охлаждаются водой первого контура реактора. Из-за чего температура образцов при облучении не превышает 60°C. Внутренний диаметр капсулы составляет 46 мм, а высоте 90 мм. Подкапсулы заполняются инертной средой. В одном облучательном канале можно установить до пяти штатных капсул. Регистрация трития осуществляется методом дегазации образцов (термодесорбционные эксперименты). При облучении в экспериментальном устройстве (рис. 3), образцы размещаются в загрузочной капсуле. Такая конструкция экспериментального устройства применяется для высокотемпературного облучения образцов, поэтому капсула и все ее элементы изготавливаются из нержавеющей стали. В работе рассмотрена загрузочная капсула с внешним диаметром 19 мм и толщиной стенки 0,5 мм. Высота капсулы составляет 45 мм. Загрузочная капсула устанавливается в ампулу, которая также изготавливается из нержавеющей стали. Внутри ампулы вакуумная среда. Регистрация трития осуществляется методом вакуумной экстракции (постоянная откачка рабочей камеры). Облучение образцов рассмотрено для периферийного канала в ячейке 2-6 активной зоны реактора ВВР-К (рис. 4). Подробное описание реактора ВВР-К приведено в [18].

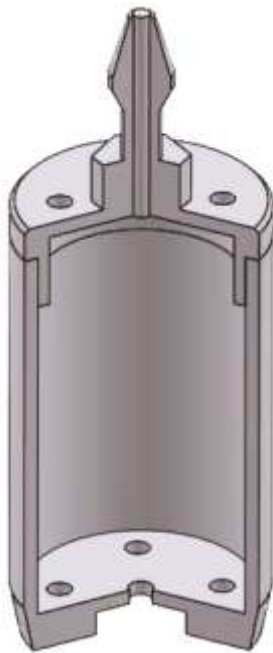


Рисунок 2 – 3D вид штатной облучательной капсулы

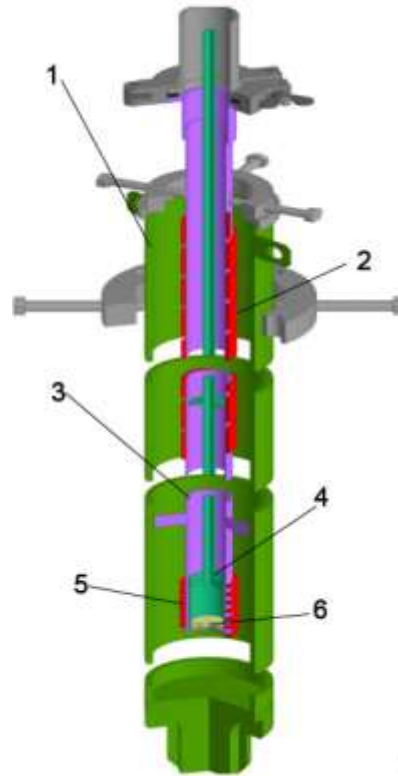


Рисунок 3 – 3D вид экспериментального устройства: 1 – внешняя ампула; 2 – ленточный нагреватель; 3 – внутренняя капсула; 4 – держатель образцов; 5 – электрический нагреватель; 6 – образцы литиевой керамики

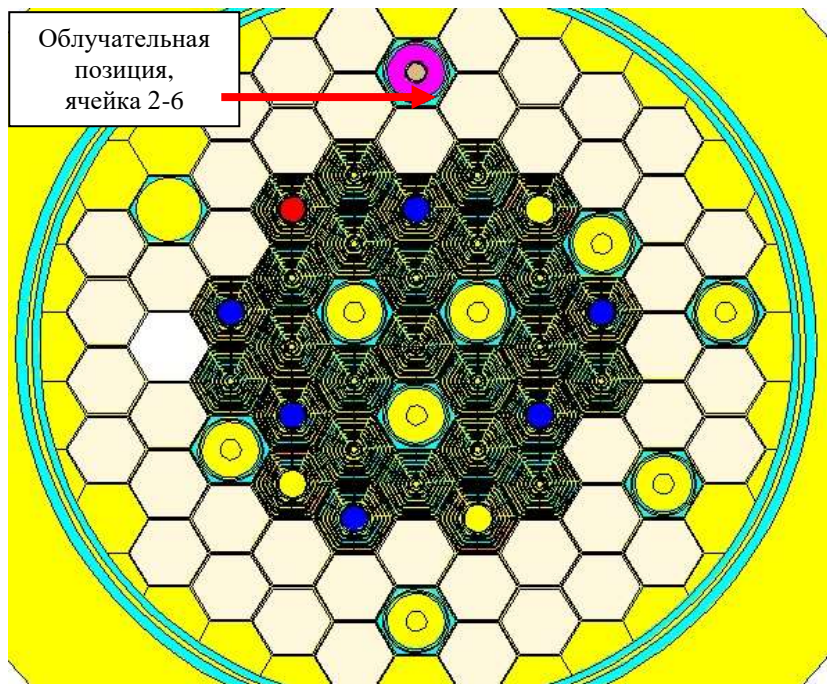


Рисунок 4 – Расчетная модель активной зоны реактора ВВР-К

Нейтронно-физические расчеты проведены с применением программного средства MCNP [20] и библиотеки ядерных констант ENDF/B-VII.1 [21]. Программное средство MCNP (Monte Carlo

N-Particle transport code) широко используются для моделирования процессов переноса различных частиц в сложных средах. MCNP разработан в США в Лос-Аламосской национальной лаборатории. Решение уравнения переноса нейтронов основано на методе Монте-Карло, что позволяет осуществлять прецизионные расчеты. Метод крайне полезен при решении сложных задач, которые невозможно смоделировать программой, основанной на детерминистском методе. Для каждой частицы моделируются случайные события. Совокупность отдельных событий, носящих статистический характер, составляет полную картину происходящего процесса. Точность расчетов методом Монте-Карло зависит от точности описанной модели (геометрия и материальный состав), а также от количества смоделированных историй взаимодействия частиц с веществом.

В расчетной модели были воспроизведены в деталях геометрия и материалы всех элементов активной зоны. При расчетах учитывались реальные выгорания в каждой ТВС и «отравление» бериллиевых блоков. Все это позволило создать точную расчетную модель активной зоны реактора ВВР-К.

При моделировании засыпка пэбблов в облучательной капсуле была описана как однородная среда, поэтому рассчитанные ядерные концентрации элементов пэбблов были пересчитаны для однородной среды. Следует отметить, что при расчете ядерной концентрации однородной среды было принято, что пространство между пэбблами заполнено вакуумом.

Теплофизические расчеты проведены комплексом COMSOL Multiphysics [22], предназначенного для моделирования комплексных физических задач. Для расчета использовалась аналитическая система фундаментальных уравнений теплопереноса, учитывающая теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение. Использовалась модель неизотермического потока воды (Nonisothermal Flow), объединяющая уравнения теплопроводности в твердой и жидкой среде с уравнением Навье-Стокса для ламинарного или турбулентного движения охлаждающих потоков воды.

Исходными условиями для задачи считалась температура всех материалов модели равная 40°C. Давление равно атмосферному с учетом гидростатической добавки на высоту водяного столба. Тепловые контакты идеальны и не нарушаются в ходе нагрева. Фазовые изменения

свойств воды других материалов в ходе нагрева не учитываются.

Результаты и обсуждение

Рассмотренный облучательный канал расположен на периферии активной зоны и окружен бериллиевыми блоками. Энергетический спектр нейтронов и фотонов в рассмотренном облучательном канале активной зоны реактора ВВР-К показан на рисунках 5 и 6, соответственно.

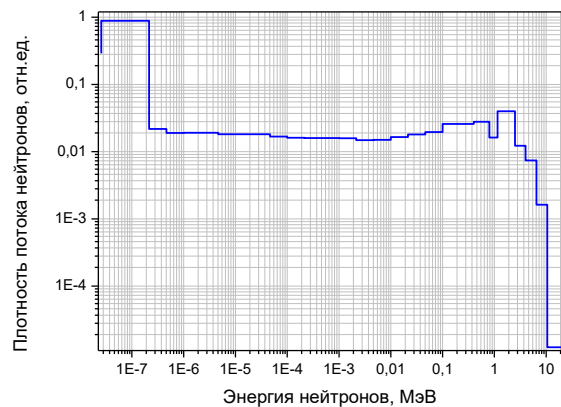


Рисунок 5 – Энергетическое распределение нейтронов в активной зоне реактора ВВР-К

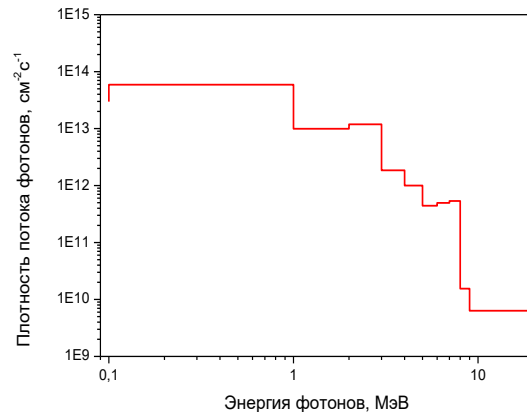
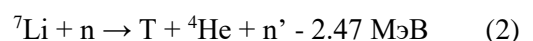
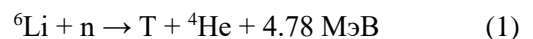


Рисунок 6 – Энергетический спектр фотонов в активной зоне реактора ВВР-К

Основные каналы ядерных реакций, протекающие на литии, следующие:



Микроскопическое сечение реакции (1) составляет порядка 940 барн, тогда как сечение ядерной реакции (2) не превышает 0.4 барн (пороговая реакция). Следовательно, литиевая керамика, особенно, высокообогащенная, будет вносить значительное возмущение в поле нейтронов. Кроме того, в реакторе ВВР-К

энергетический спектр нейтронов преимущественно тепловой, что приводит к интенсивному протеканию ядерной реакции (1) в литиевой керамике. Влияние экспериментального устройства с образцами литиевой керамики на возмущение поля нейтронов продемонстрировано в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Плотность потока нейтронов в облучательной позиции без ЭУ

Энергия нейтронов		Тип нейтронов	Плотность потока нейтронов, н/(см ² хс)	Доля нейтронов, %	
0	÷				
0	÷	0,625 эВ	Тепловые	$7,42 \times 10^{13}$	0,72
0.625 эВ	÷	0,1 МэВ	Эпитепловые	$1,92 \times 10^{13}$	0,19
0.1 МэВ	÷	20 МэВ	Быстрые	$9,27 \times 10^{12}$	0,09

Таблица 3 – Плотность потока нейтронов в облучательной позиции с установленным ЭУ

Энергия нейтронов		Тип нейтронов	Плотность потока нейтронов, н/(см ² хс)	Доля нейтронов, %	
0	÷				
0	÷	0,625 эВ	Тепловые	$9,85 \times 10^{12}$	0,18
0.625 эВ	÷	0,1 МэВ	Эпитепловые	$2,55 \times 10^{13}$	0,48
0.1 МэВ	÷	20 МэВ	Быстрые	$1,80 \times 10^{13}$	0,34

Доля тепловых нейтронов снижается с 72% до 18%, при этом увеличиваются доли эпитепловых и быстрых нейтронов.

При загрузке облучательной капсулы в активную зону важным характеристикой является эффект реактивности, который определяет ядерную безопасность данного процесса. Согласно правилам ядерной безопасности исследовательских реакторов, при внесении отрицательной реактивности более $0,7 \beta_{эфф}$ требуется применение дополнительных мер по обеспечению ядерной безопасности. Загрузка штатной капсулы с литиевой керамикой вносит отрицательную реактивность минус $0,05 \beta_{эфф}$, а загрузка экспериментального устройства вносит

отрицательную реактивность минус $0,3 \beta_{эфф}$. Из чего следует, что дополнительных мер при загрузке рассмотренных капсул не требуется.

В зависимости от задачи исследования, облучение литиевой керамики может быть, как низкотемпературным, так и высокотемпературным. С целью определения теплового режима облучения образцов литиевой керамики, в первую очередь, было рассчитано энерговыделение конструкционных материалов и образцов литиевой керамики. Причем, отдельно определена составляющая энерговыделения за счет нейтронного и фотонного излучений. Результаты расчетов приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 – Радиационный разогрев образцов и конструкционных материалов экспериментального устройства

Элемент	Материал	Энерговыделение, Вт/г		
		Нейтроны	Фотоны	Σ (сумма)
Образец	Li ₂ TiO ₃ (96%)	59,99	0,82	60,81
Загрузочный стакан	12X18H10T	$3,65 \cdot 10^{-3}$	1,03	1,03
Капсула	12X18H10T	0	1,09	1,09
Внешний канал	САВ-1	0,01	0,78	0,79

Таблица 5 – Радиационный разогрев образцов и конструкционных материалов штатной капсулы

Элемент	Материал	Энерговыведение, Вт/г		
		Нейтроны	Фотоны	Σ (сумма)
Образец	Li ₂ TiO ₃ (96%)	59,99	0,82	60,81
Внутренняя капсула	САВ-1	0,01	0,73	0,74
Внешний канал	САВ-1	0,01	0,73	0,74

Как видно из таблиц 4 и 5, основной вклад в радиационный разогрев вносит энерговыведение пэбблов литиевой керамики из-за активного протекания ядерной реакции (n,α) на литии-6.

Моделирование температурного поля внутри облучательных капсул показало, что температура образцов (на мощности реактора 6 МВт) для разработанной конструкции экспериментального устройства повышается до 800°C, тогда как в штатной капсуле, температура образцов не

превышает 60°C. 3D-распределение температуры внутри облучательных капсул, при мощности реактора 6МВт, показано на рисунке 7. Распределение стационарного значения температуры образцов при различных мощностях реактора для разработанной конструкции экспериментального устройства приведено на рисунке 8. Как видно из рисунка варьируя мощность реактора можно достигать различных температур образцов.

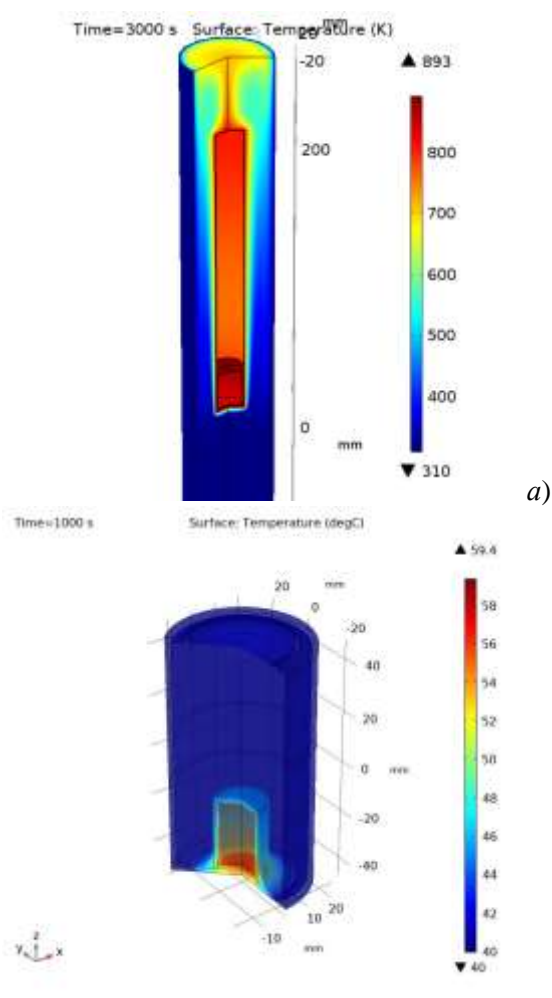


Рисунок 7 – Распределение температур в облучательной капсуле: а) – экспериментальное устройство; б) – штатная капсула

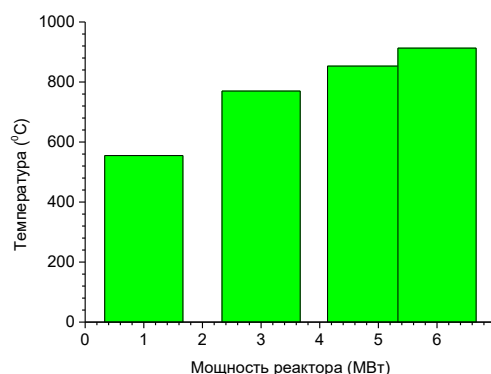


Рисунок 8 – Зависимость температуры образцов в облучательной капсуле экспериментального устройства от мощности реактора

Для экспериментального устройства, расчет проводился в режиме расчета временных изменений температуры в металлах и в воздухе, и дополнительно – скорости и давления воздуха. В качестве начальных значений было принято, что в момент времени $t = 0$ все тела в системе нагреты до 310К, при этом воздух не движется и находится под давлением 100 кПа по всей высоте экспериментального устройства (без учета гидростатической добавки).

Проведена оценка наработки трития для разных плотностей потока нейтронов. Нароботка трития оценена отдельно для каждой ядерной реакции. Результаты расчетов приведены в таблице 6. Данные в таблице 6 приведены за период облучения в одну рабочую кампанию, длительностью 21 сутки. Как видно из расчетов количество нарабатываемого трития в литиевой

керамике пропорционально плотности потока тепловых нейтронов, причем скорость наработки трития по каналу ядерной реакции (2) незначительна и составляет менее 0,1% от общей наработки. Сопоставление полученных значений скоростей наработки трития с чувствительностью системы регистрации трития показало, что при наступлении равновесного выделения трития система регистрации позволит проводить

измерение при выполнении неравенства φ^*m ($\text{н}^*\text{г}/(\text{см}^2*\text{с}) > 2,5*10^{10}$ ($\text{н}^*\text{г}/(\text{см}^2*\text{с})$) (где φ – плотность потока нейтронов, m – масса образцов). Этот критерий и другие полученные данные будут использованы для разработки программы реакторных экспериментов и правильного выбора методики регистрации и дальнейшей утилизации трития.

Таблица 6 – Активность нарабатываемого трития в литиевой керамике

Плотность потока нейтронов, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	Активность трития, Ки	
	По формуле (1)	По формуле (2)
1×10^{12}	0,11	$1,44 \times 10^{-6}$
1×10^{13}	1,09	$1,44 \times 10^{-5}$
5×10^{13}	5,29	$7,18 \times 10^{-5}$
1×10^{14}	10,26	$1,44 \times 10^{-4}$
2×10^{14}	19,29	$2,87 \times 10^{-4}$

Здесь следует отдельно отметить, что тритий после его генерации в литиевой керамике будет вступать в химические реакции с другими элементами и образовывать разные молекулы (например, НТО, НТ, Т₂О). Дальнейшее высвобождение тритиевых молекул из пэбблов зависит от многих факторов, поэтому в экспериментах, измеренные значения трития могут отличаться от тех, что приведены в таблице 6.

Выводы

Проведены нейтронно-физический и теплофизический анализы экспериментов по облучению высокообогащенной литиевой керамики в активной зоне реактора ВВР-К. Расчеты показали, что основной вклад в энерговыделение вносит радиационный разогрев образцов за счет ядерных реакций лития с нейтронами. Энерговыделение в образцах превышает энерговыделение в конструкционных материалах ЭУ в 60 раз. Такое энерговыделение в образцах приводит к сильному разогреву капсулы. При облучении литиевой керамики в штатной капсуле, температура образцов не превышает 60°C, что достигается за счет эффективного теплосъема водой первого контура реактора. При этом образцы облучаются в инертной среде. Тогда как облучение в экспериментальном устройстве позволяет достигать высоких температур в капсуле с

образцами (около 800 °С). В капсуле с образцами создается и постоянно поддерживается вакуумная среда ($\sim 10^{-4}$ торр).

Высокообогащенная литиевая керамика вносит значительное возмущение в нейтронное поле. Например, доля тепловых нейтронов уменьшается с 72% до 18%. При этом, эффект реактивности от загрузки капсулы с образцами в активную зону реактора составляет минус 0,05 $\beta_{эфф}$ для штатной капсулы и минус 0,3 $\beta_{эфф}$ для экспериментального устройства. Скорость наработки трития в периферийном канале реактора ВВР-К составляет $2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$.

Исходя из вышесказанного, можно констатировать, что на реакторе ВВР-К можно проводить два типа экспериментов с литиевой керамикой: первый – высокотемпературное облучение с регистрацией выделения трития в режиме реального времени; второй – низкотемпературное облучение с пост-реакторными экспериментами по дегазации образцов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант №AP13068172).

Литература

- 1 Lemmens K., González-Robles E., Kienzler B., Curti E., Serrano-Purroy D., Sureda R., Martínez-Torrents A., Roth O., Slonski E., Menecart T., Günther-Leopold I., Hózer Z. 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. – 2017. – Vol.484. – P.307-323.
- 2 Burkes D.E., Casella A.J., Casella A.M. Measurement of fission gas release from irradiated U-Mo dispersion fuel samples //Journal of Nuclear Materials. – 2016. – Vol.478. – P. 365-374.
- 3 Einerson J.J., Pham B.T., Scates D.M., Maki J.T., Petti D.A. Analysis of fission gas release-to-birth ratio data from the AGR irradiations //Nuclear Engineering and Design. – 2016. – Vol.306. – P.14-23.
- 4 Chakin V., Rolli R., Vladimirov P., Moeslang A. Tritium and helium release from beryllium pebbles neutron-irradiated up to 230 appm tritium and 3000 appm helium //Nuclear Materials and Energy. – 2016. – Vol.9. – P.207-215.
- 5 Kolb M.H.H., Rolli R., Knitter R. Tritium adsorption/release behaviour of advanced EU breeder pebbles //Journal of Nuclear Materials. – 2017. – Vol.489. – P.229-235.
- 6 Ran G., Xiao C., Chen X., Gong Y., Kang C., Wang X. Correlation between the processes of water desorption and tritium release from Li₄SiO₄ ceramic pebbles //Journal of Nuclear Materials. – 2015. – Vol.466. – P.316-321.
- 7 Ochiai K., Edao Y., Kawamura Y., Hoshino T., Ohta M., Sato S., Konno C. Experimental investigation on tritium release from lithium titanate pebble under high temperature of 1073 K //Fusion Engineering and Design. – 2015. – Vol.98-99. – P.1843-1846.
- 8 Til S., Magielsen A.J., Stijkel M.P., Cobussen H.L. Out of pile tritium release behaviour and microscopic investigation of lithium metatitanate irradiated in the High Flux Reactor in Petten //Fusion Engineering and Design. – 2010. – Vol.85, Iss. 7-9. – P.1143-1146.
- 9 Someya Y., Tobita K., Utoh H., Tokunaga S., Hoshino K., Asakura N., Nakamura M., Sakamoto Y. Design study of blanket structure based on a water-cooled solid breeder for DEMO //Fusion Engineering and Design. – 2015. – Vol.98-99. – P.1872-1875.
- 10 Federici G., Kemp R., Ward D., Bachmann C., Franke T., Gonzalez S., Lowry C., Gadomska M., Harman J., Meszaros B., Morlock C., Romanelli F., Wenninger R. Overview of EU DEMO design and R&D activities //Fusion Engineering and Design. – 2014. – Vol.89. – P.882-889.
- 11 Boccaccini L., Giancarli L., Janeschitz G., Hermsmeyer S., Poitevin Y., Cardella A., Diegele E. Materials and design of the European DEMO blankets //Journal of Nuclear Materials. – 2004. – Vol. 329-333. – P.148-155.
- 12 Cisondi F., Kecskés S., Ilic M., Légrádi G., Kiss B., Bitz O., Dolensky B., Neuberger H., Boccaccini L.V., Ihli T. Design update, thermal and fluid dynamic analyses of the EU-HCPB TBM in vertical arrangement //Fusion Engineering and Design. – 2009. – Vol. 4. – P.607-612.
- 13 Hernández F., Cisondi F., Kiss B. Thermo-mechanical analyses and assessment with respect to the design codes and standards of the HCPB-TBM breeder unit //Fusion Engineering and Design. – 2012. – Vol.87. – P.1111-1117.
- 14 Bhattacharyay R. Status of indian LLCB TBM program and R&D activities //Fusion Engineering and Design. – 2014. – Vol. 89. – P.1107-1112.
- 15 Cao Q., Zhao F., Zhao Z., Wu X., Li Z., Wang X., Feng K. Neutronic calculation analysis for CN HCCB TBM-Set //Plasma Science and Technology. – 2015. – Vol.17. – P.607-611.
- 16 Enoeda M., Tanigawa H., Hirose T., Nakajima M., Sato S., Ochiai K., Konno C., Kawamura Y., Hayashi T., Yamanishi T., Hoshino T., Nakamichi M., Tanigawa H., Nishi H., Suzuki S., Ezato K., Seki Y., Yokoyama K. R&D status on water cooled ceramic breeder blanket technology //Fusion Engineering and Design. – 2014. – Vol. 89. – P.1131-1136.
- 17 Lee D.W., Jin H.G., Lee E.H., Yoon J.S., Kim S.K., Lee C.W., Ahn M.-Y., Cho S. Integrated design and performance analysis of the KO HCCR TBM for ITER //Fusion Engineering and Design. – 2015. – Vol. 98-99. – P.1821-1824.
- 18 Shaimerdenov A.A., Nakipov D.A., Arinkin F.M., Gizatulin Sh.Kh., Chakrov P.V., Kenzhin Ye.A. The 50th Anniversary of the WWR-K Research Reactor //Physics of Atomic Nuclei. – 2018. – Vol.81. – P.1408-1411.
- 19 Shaimerdenov A., Gizatulin S., Dyussambayev D., Askerbekov S., Kenzhina I., The WWR-K reactor experimental base for studies of the tritium release from materials under irradiation //Fusion Science and Technology. – 2020. – Vol.76. – P.304-313.
- 20 Goorley J.T., et al., Initial MCNP6 Release Overview - MCNP6 version 1.0, LA-UR-13-22934. – 2013.
- 21 Brown D.A., Chadwick M.B., Capote R., Kahler A.C., Trkov A., Herman M.W. et. al., ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data //Nuclear Data Sheets. – 2011. – Vol.112. –P.2887-2996.
- 22 COMSOL Multiphysics, 2022. <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (accessed 25 April 2022).

References

- 1 K. Lemmens, E. González-Robles, et.al., J. Nucl. Mater., 484, 307-323 (2017).
- 2 D.E. Burkes, A.J. Casella, A.M. Casella., J. Nucl. Mater., 478, 365-374 (2016).
- 3 Jeffrey J. Einerson, et.al., Nucl. Eng. Des., 306, 14-23, (2016)

- 4 V. Chakin, R. Rolli, P. Vladimirov, A. Moeslang., Nucl. Mater. Energy, 9, 207-215 (2016).
- 5 Matthias H.H. Kolb, R. Rolli, R. Knitter, J. Nucl. Mater., 489, 229-235, (2017)
- 6 G. Ran, C. Xiao, et.al., J. Nucl. Mater., 466, 316-321 (2015).
- 7 K. Ochiai, Y. Edao, et.al., Fusion Eng. Des., 98-99, 1843-1846 (2015).
- 8 S. van Til, A.J. Magielsen, et.al., Fusion Eng. Des., 85, 1143-1146 (2010).
- 9 Y. Someya, K. Tobita, et.al., Fusion Eng. Des., 98-99, 1872-1875 (2015).
- 10 G. Federici, R. Kemp, et.al., Fusion Eng. Des., 89, 882-889 (2014).
- 11 L. Boccaccini, L. Giancarli, et.al., J. Nucl. Mater., 329-333, 148-155 (2004).
- 12 F. Cismondi, S. Kecskés, et.al., Fusion Eng. Des., 84, 607-612 (2009).
- 13 F. Hernández, F. Cismondi, B. Kiss, Fusion Eng. Des., 87, 1111-1117 (2012).
- 14 R. Bhattacharyay, Fusion Eng. Des., 89, 1107-1112 (2014).
- 15 Q. Cao, F. Zhao, et.al., Plasma Science and Technology, 17, 607-611 (2015).
- 16 M. Enoda, H. Tanigawa, et.al., Fusion Eng. Des., 89, 1131-1136 (2014).
- 17 D.W. Lee, H.G. Jin, et.al., Fusion Eng. Des., 98-99, 1821-1824 (2015).
- 18 A. Shaimerdenov, D. Nakipov, et.al., Physics of Atomic Nuclei, 81, 1408-1411 (2018).
- 19 A. Shaimerdenov, S. Gizatulin, et.al., Fusion Science and Technology, 76, 304-313 (2020).
- 20 J.T. Goorley, et al., Initial MCNP6 Release Overview - MCNP6 version 1.0, LA-UR-13-22934, (2013).
- 21 D.A. Brown, M.B. Chadwick, et.al., Nuclear Data Sheets. 112, 2887-2996, (2011).
- 22 COMSOL Multiphysics, 2022. <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (accessed 25 April 2022).