

УДК 621.039.633

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ТРИТИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ МОДУЛЕ БЛАНКЕТА С ГЕЛИЕВЫМ И Li—Pb-ЭВТЕКТИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

*В.К. Капышев¹, Н.К. Владимирова¹, И.В. Данилов¹, И.А. Карташев¹, В.Г. Коваленко¹, А.Ю. Лешуков¹,
В.В. Поликша¹, А.В. Размеров¹, М.Н. Свириденко¹, Ю.С. Стребков¹, Е.А. Трусова¹, А.Н. Калашников²*

¹ Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежалы, Москва, Россия

² Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Москва, Россия

Демонстрация тритиевой технологии является одной из главных целей разработки и создания экспериментальных модулей blankets (ЭМБ) для испытаний в Международном термоядерном экспериментальном реакторе (ИТЭР). Разработана концепция мониторинга трития в охлаждаемом Li—Pb-эвтектикой ЭМБ, содержащем керамический материал для увеличения наработки трития. Нарботка трития будет происходить в зоне воспроизводства трития (ЗВТ) ЭМБ, а моделирование начальной технологической стадии его сбора перед транспортировкой в тритиевый завод осуществляться в системе тритиевого цикла — ЭМБ. Концепция основана на измерениях количества трития, нарабатываемого в детекторах из карбоната лития во время D—T-экспериментов. Загрузка изготовленных из малоактивируемого алюминиевого сплава контейнеров, в которые помещаются детекторы, в ЗВТ ЭМБ перед началом плазменного импульса и извлечение их из ЗВТ во время паузы осуществляются пневматическим и механическим оборудованием через канал, соединяющий ЭМБ с рабочей зоной реактора ИТЭР. В статье описываются пневматическое оборудование и модификации контейнеров для нейтронных и содержащих литий детекторов, а также сами детекторы. Реакторные испытания, выполненные с контейнерами, продемонстрировали возможность работы с ними через 30 мин после набора нейтронного флюенса, соответствующего режиму работы ЭМБ в ИТЭР. Моделирование процесса доставки детекторов в ЗВТ пневматическим способом и измерение его гидродинамических параметров осуществляли на специально созданном лабораторном стенде. В статье приводятся предварительные результаты измерений. Проведены нейтронно-физические расчёты накопления трития в литиевых детекторах под облучением.

Ключевые слова: ИТЭР, тритий, blanket, экспериментальный модуль, система мониторинга трития.

DEVELOPMENT AND TESTING OF TRITIUM MONITORING SYSTEMS IN THE HELIUM AND LEAD-LITHIUM COOLED TEST BLANKET MODULE

*V.K. Kapyshev¹, N.K. Vladimirova¹, I.V. Danilov¹, I.A. Kartashev¹, V.G. Kovalenko¹, A.Yu. Leshukov¹,
V.V. Poliksha¹, A.V. Razmerov¹, M.N. Sviridenko¹, Yu.S. Strebkov¹, E.A. Trusova¹, A.N. Kalaschnikov²*

¹N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, Moscow, Russia

²State Atomic Corporation "Rosatom", Moscow, Russia

Demonstration of tritium breeding is one of the main goals under the development and creation of the test blanket modules (TBM) to be installed in ITER. The tritium production takes place in the TBM tritium breeding zone (TBZ), and the simulation of the initial technological operations with tritium before its transfer to the tritium plant occurs in the tritium cycle system. A concept of the experimental estimation of the tritium-breeding dynamics in the lead-lithium cooled ceramic breeder (LLCB) TBM has been developed. It is based on the tritium breeding and neutron flux measurements under ITER plasma D-T experiments. The lithium carbonate sensors for the tritium breeding estimation and the neutron detectors are placed in the containers made of a low-activation aluminium alloy. Pneumatic and mechanical equipment is used to deliver the containers to the TBM TBZ and to extract the containers from the module after a plasma pulse. A channel connects the TBM and the ITER operating zone for container transportation during plasma-operational pauses. The pneumatic equipment and modifications of the containers and sensors are presented in the paper. Low-activated structural materials for the detectors are used to provide a manual operation with the samples. Nuclear reactor tests have demonstrated that the transportation of the detectors can be performed in 30 min after nuclear irradiation. The laboratory facility for investigation of the pneumatic parameters and the container transportation through the channel was produced and results of initial tests are discussed. Neutron calculations of the tritium accumulation in the lithium carbonate detectors under reactor irradiation were performed.

Key words: ITER, tritium, blanket, test module, the tritium cycle system.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из целей разработки и создания экспериментального модуля blankets для испытаний в ИТЭР является демонстрация наработки трития и технологии его подготовки для дальнейшего использования в качестве топлива термоядерных реакторов (ТЯР). Нарботка трития происходит в зоне воспроизводства

ва трития ЭМБ, начальная стадия его переработки осуществляется в системе тритиевого цикла (СТЦ), являющейся частью обеспечивающих систем (ОС) модуля, которая включает в себя теплотехнические системы.

В рамках решения тритиевой проблемы управляемого термоядерного синтеза (УТС) разрабатываемая СТЦ ЭМБ должна обеспечить выполнение необходимых исследований по тритиевой технологии, связанных с наработкой трития и подготовкой к его утилизации. Это прежде всего моделирование процесса наработки трития в прототипе ЗВТ бланкета реактора ДЕМО при испытании ЭМБ в ИТЭР, обеспечение исследований поведения трития в ЭМБ, а также проверка технологических режимов извлечения трития из ЗВТ ЭМБ и теплоносителя ОС. Кроме того, предполагается, что СТЦ ЭМБ будет выполнять первичную переработку образующихся при испытаниях ЭМБ в ИТЭР тритийсодержащих газовых смесей с целью их передачи в тритиевый завод.

Проведение технологических процессов в СТЦ и выполнение операций по сведению баланса по тритию в процессе испытаний ЭМБ в ИТЭР возможны только при наличии в них системы мониторинга трития (СМТ).

В статье описывается система мониторинга трития, которая позволяет выполнить оценку коэффициента наработки трития в ЗВТ ЭМБ при испытаниях в ИТЭР, а также представлены предварительные результаты испытаний элементов макета СМТ.

СИСТЕМЫ ТРИТИЕВОГО ЦИКЛА ЭМБ

Российская сторона, как участник проекта ИТЭР, принимает участие в разработке ЭМБ с керамическим бридером (КБ) и жидкометаллическим теплоносителем. В этом модуле в качестве бридера используются литийсодержащая керамика и литий-свинцовая эвтектика (ЛСЭ), которая также выполняет функции теплоносителя и размножителя/замедлителя нейтронов [1, 2]. Блок-схема СТЦ для этого модуля представлена на рис. 1.

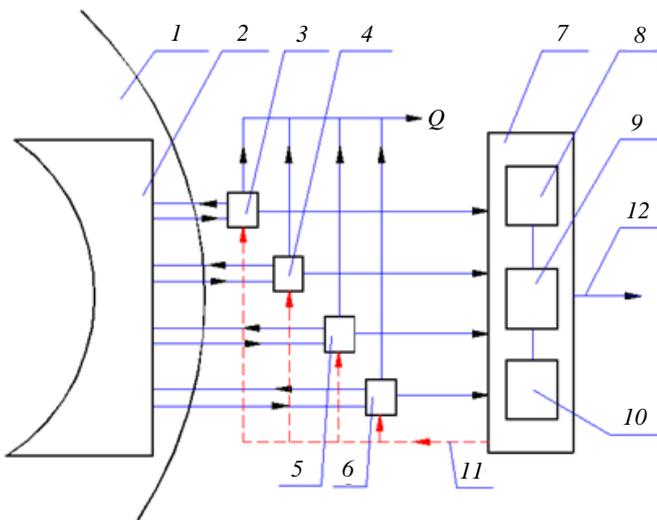


Рис. 1. Блок-схема системы тритиевого цикла ЭМБ: 1 — ИТЭР; 2 — ЭМБ; 3 — система отвода тепла и выделения трития из газового теплоносителя; 4 — система отвода тепла и выделения трития из эвтектического теплоносителя; 5 — система отвода тепла и выделения трития из газа-носителя; 6 — система мониторинга наработки трития; 7 — система радиационной безопасности; 8 — система сбора тритийсодержащих газовых смесей; 9 — система контроля содержания трития в газовых смесях; 10 — система тритиевой дезактивации; 11 — линия подпитки гелием; 12 — линия транспортировки в тритиевый завод; Q — сброс тепла

В разрабатываемом модуле имеются два теплоносителя — эвтектика литий—свинец и гелий. Поэтому в рамках разрабатываемой СТЦ учитывается как наличие систем выделения трития из двух теплоносителей 3 и 4, газа-носителя 5 и устройств, контактирующих с тритием 6, так и систем теплосъёма и сброса тепла Q .

Часть теплотехнических систем, обеспечивающих охлаждение ЭМБ, работают при высоких температурах и будут в своём составе содержать тритий. Поэтому на настоящем этапе разработки ЭМБ эти системы целесообразно включить в СТЦ.

Система радиационной безопасности (СРБ) состоит из систем сбора тритийсодержащих газовых смесей 8, контроля за содержанием трития в газовых смесях 9 и тритиевой дезактивации 10. Последняя важна как при выполнении ремонтных работ, так и при ликвидации последствий аварийных ситуаций. Технологический гелий, очищенный от трития в СРБ, возвращается в ОС по линии 11.

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТРИТИЯ ЭМБ

СМТ термоядерного реактора, являющаяся частью СТЦ реактора, в полном объеме описана в работе [3]. В предлагаемой статье рассматривается только СМТ ЭМБ (рис. 2), у которой канал с датчиками регистрации трития размещается в ЗВТ ЭМБ.

Доставка контейнера с датчиками в ЗВТ ЭМБ 2 и обратно осуществляется по каналу СМТ 5. Рассматривались два способа доставки — пневматический и механический [4]. В настоящей статье приводятся результаты исследований по пневматическому варианту доставки.

В качестве материала, нарабатывающего тритий на начальном этапе исследований, предполагалось использовать карбонат и ортосиликат лития с различным обогащением по изотопу ${}^6\text{Li}$. Каждый образец материала вместе с детекторами нейтронного излучения помещался в капсулу наружным диаметром 6 и длиной 21 мм. Длина контейнера, содержащего шесть капсул, равна 147 мм. Однако выполненные нейтронно-физические расчеты показали незначительные отличия в точности получаемых результатов скорости наработки трития в эвтектике при использовании карбоната и ортосиликата лития, а учитывая, что точность измерения трития сцинтилляционным методом в карбонате лития выше, чем в ортосиликате, было решено использовать в качестве материала тритиевого детектора только карбонат лития [5]. Было показано, что обе методики позволяют измерять активность трития в образцах карбоната лития массой 0,1—1 г с погрешностью ± 6 —7%.

Для повышения точности пересчета от скорости наработки трития в детекторах к скорости наработки трития в эвтектике ЭМБ необходимо было уменьшить количество капсул и объем контейнера. Сокращение объема уменьшает возмущение, вносимое контейнером в распределение нейтронного потока в ЗВТ, и, соответственно, повышается точность измерения наработки трития в ней. Для одновременного измерения наработки трития в большем количестве точек ЗВТ возможно одновременное использование двух или трех контейнеров.

Конструкция контейнера уменьшенного размера, содержащая три капсулы, в каждой из которых за таблеткой из соли Li_2CO_3 размещается чашка с детекторами нейтронного излучения, показана на рис. 3.

Поперечное сечение ЭМБ с каналом СМТ на уровне эвтектических патрубков показано на рис. 4.

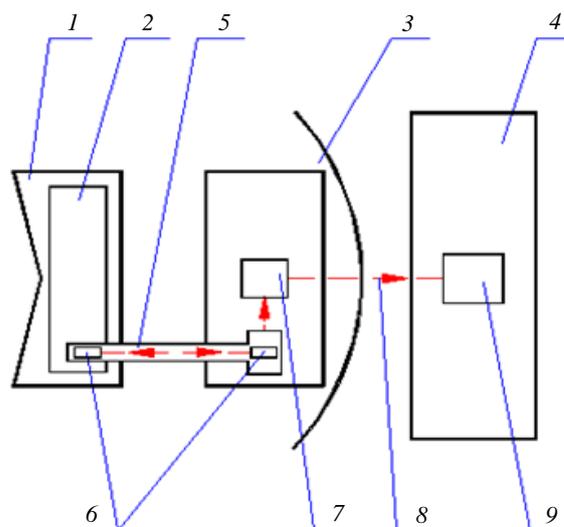


Рис. 2. Блок-схема системы мониторинга трития ЭМБ в ИТЭР: 1 — ЭМБ; 2 — ЗВТ ЭМБ; 3 — ИТЭР; 4 — тритиевый завод; 5 — канал СМТ; 6 — контейнер с датчиками; 7 — транспортный контейнер; 8 — доставка транспортного контейнера в тритиевую лабораторию; 9 — тритиевая лаборатория

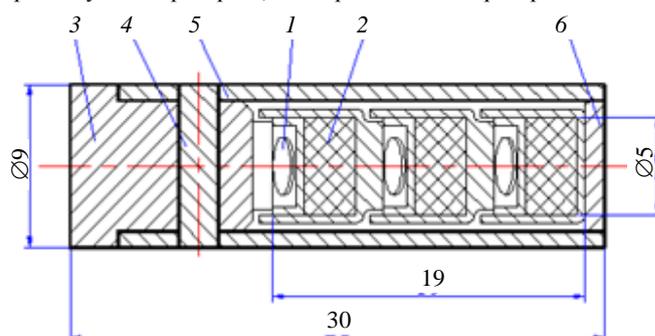


Рис. 3. Контейнер для канала СМТ: 1 — детектор нейтронный; 2 — материал, нарабатывающий тритий; 3 — заглушка; 4 — штифт; 5 — корпус канала СМТ; 6 — днище контейнера

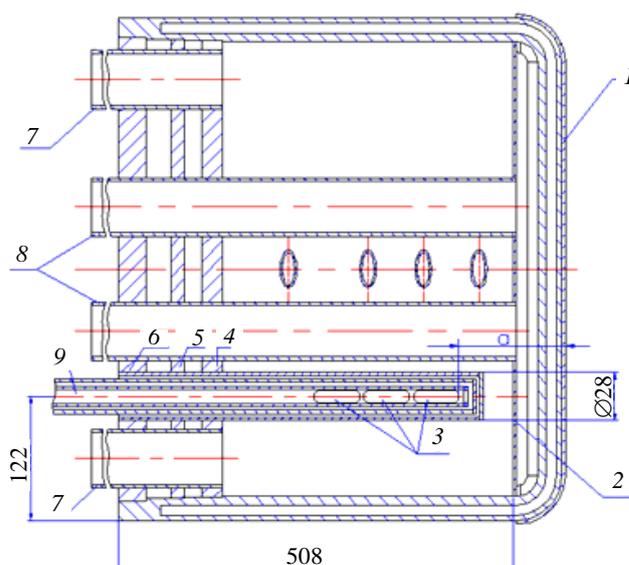


Рис. 4. Поперечное сечение ЭМБ с каналом СМТ: 1 — первая стенка; 2 — разделительная перегородка зон течения литий-свинцовой эвтектики (ЛСЭ); 3 — контейнер с детекторами; 4, 5 — перегородки; 6 — задняя стенка ЭМБ; 7 — входной патрубок ЛСЭ; 8 — выходной патрубок ЛСЭ; 9 — канал СМТ

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРОВ ТРИТИЯ В КАНАЛЕ СМТ ЭМБ

Для подготовки исходных данных для анализа температурных полей в канале СМТ был проведён цикл нейтронно-физических расчётов распределения удельного энерговыделения по материалам и элементам канала. Принципиальная схема расчётной модели ЭМБ для 3D-анализа методом Монте-Карло, реализованным в коде MCNP5 с рекомендованной для использования в процессе проектирования ИТЭР системой ядерных констант FENDL, и радиальные размеры материальных зон модели приведены в [6]. В ходе выполнения расчётов было детально оценено распределение радиационного энерговыделения в материалах конструкций элементов модуля и опорной рамы экспериментального порта, а также скорости наработки атомов трития в материалах ЗВТ ЭМБ. Также были оценены удельная скорость наработки трития и активность детекторов трития в канале СМТ.

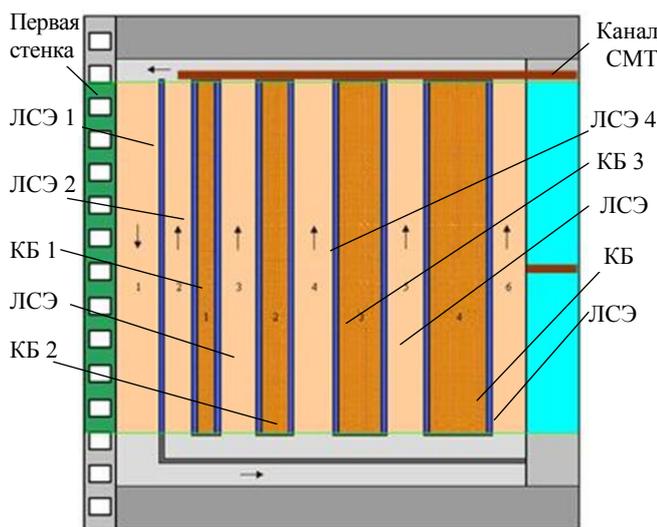


Рис. 5. Модель ЭМБ для нейтронных расчётов

При проведении нейтронно-физического расчёта были рассмотрены два возможных положения контейнеров по глубине канала СМТ вблизи первой стенки ЭМБ (у перегородки первого канала эвтектики, $a = 80$ мм) и в центре ЗВТ модуля ($a = 270$ мм) (см. рис. 4). В каждом из этих вариантов находятся по три идентичных контейнера с детекторами наработки трития.

На рис. 5 представлена модель ЭМБ для нейтронных расчётов, в табл. 1 приведены результаты расчётов нейтронно-физических характеристик детекторов трития канала СМТ с их содержанием по изотопу ${}^6\text{Li}$ и размещением относительно рядов КБ и ЛСЭ.

Т а б л и ц а 1. Расчётные нейтронно-физические характеристики детекторов трития канала СМТ

№ варианта	№ контейнера	№ детектора	Содержание ${}^6\text{Li}$, %	Размещение	Групповые плотности потоков нейтронов, $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$			Вклад ${}^6\text{Li}$ в скорость наработки трития в детекторах, %	Удельная скорость наработки трития, $1/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$	Активность детекторов, Бк	Отношение скорости наработки трития в детекторе к скорости наработки в ЗВТ
					МэВ		Доля промежуточных нейтронов, %				
					$6,25 \cdot 10^{-7} < E < 0,1$	$0,1 \leq E < 14$					
1	1	1	Природное	ЛСЭ 2	$1,92 \cdot 10^{13}$	$9,12 \cdot 10^{13}$	17	63	$4,39 \cdot 10^{11}$	46	1,23
		2	10	ЛСЭ 2	$1,91 \cdot 10^{13}$	$1,13 \cdot 10^{14}$	14	91	$1,57 \cdot 10^{12}$	160	1,18
		3	90	ЛСЭ 2	$2,56 \cdot 10^{13}$	$9,74 \cdot 10^{13}$	21	99	$2,85 \cdot 10^{12}$	300	0,655
	2	1	Природное	КБ 1	$2,07 \cdot 10^{13}$	$9,49 \cdot 10^{13}$	18	62	$4,13 \cdot 10^{11}$	43	1,46
		2	10	КБ 1	$1,18 \cdot 10^{13}$	$7,34 \cdot 10^{13}$	14	88	$6,70 \cdot 10^{11}$	70	1,11
		3	90	КБ 1	$2,28 \cdot 10^{13}$	$6,98 \cdot 10^{13}$	25	99	$2,13 \cdot 10^{12}$	220	0,616
	3	1	Природное	КБ 1	$1,36 \cdot 10^{13}$	$7,23 \cdot 10^{13}$	16	64	$1,72 \cdot 10^{11}$	18	0,607
		2	10	ЛСЭ 3	$1,90 \cdot 10^{13}$	$7,37 \cdot 10^{13}$	20	99	$1,63 \cdot 10^{12}$	170	1,96
		3	90	ЛСЭ 3	$9,69 \cdot 10^{12}$	$7,40 \cdot 10^{13}$	12	99	$3,06 \cdot 10^{12}$	320	1,09
2	1	1	Природное	КБ 3	$7,34 \cdot 10^{12}$	$4,07 \cdot 10^{13}$	15	99	$1,22 \cdot 10^{11}$	12	1,05
		2	10	КБ 3	$4,54 \cdot 10^{12}$	$3,53 \cdot 10^{13}$	11	99	$3,48 \cdot 10^{11}$	34	0,913
		3	90	КБ 3	$9,29 \cdot 10^{12}$	$2,32 \cdot 10^{13}$	29	99	$7,18 \cdot 10^{11}$	70	0,508
	2	1	Природное	КБ 3	$3,18 \cdot 10^{12}$	$3,97 \cdot 10^{13}$	7	99	$1,00 \cdot 10^{11}$	10	0,861
		2	10	КБ 3	$1,04 \cdot 10^{13}$	$1,75 \cdot 10^{13}$	37	99	$8,35 \cdot 10^{11}$	80	1,12
		3	90	ЛСЭ 5	$1,43 \cdot 10^{13}$	$2,31 \cdot 10^{13}$	38	99	$8,80 \cdot 10^{11}$	87	0,819
	3	1	Природное	ЛСЭ 5	$1,17 \cdot 10^{13}$	$2,49 \cdot 10^{13}$	32	99	$8,64 \cdot 10^{10}$	8	0,983
		2	10	ЛСЭ 5	$1,27 \cdot 10^{13}$	$1,30 \cdot 10^{13}$	49	99	$9,49 \cdot 10^{11}$	90	1,86
		3	90	КБ 4	$5,77 \cdot 10^{12}$	$1,95 \cdot 10^{13}$	23	99	$1,11 \cdot 10^{12}$	110	1,36

Также были проанализированы распределения плотности потока быстрых нейтронов с энергией выше 0,1 МэВ и промежуточных нейтронов в местах размещения детекторов трития, что дало возможность оценить вклад изотопов лития в скорость наработки трития. Видно, что основная наработка трития в материале происходит на быстрых и промежуточных нейтронах и определяется изотопом ${}^6\text{Li}$.

В табл. 1 приводятся абсолютные величины удельной скорости наработки трития в таблетках карбоната лития и их активность. Эти данные были использованы для оценки степени корреляции показаний детекторов трития в канале СМТ и соответствующих величин, характеризующих скорость наработки трития в тех или иных элементах ЗВТ. Из данных табл. 1 следует, что показания детекторов трития в канале СМТ при их расположении непосредственно в активной части ЗВТ достаточно удовлетворительно согласуются с относительным распределением скорости наработки на ядро ${}^6\text{Li}$ в нижнем коллекторе. Исключением является только детектор с естественным содержанием ${}^6\text{Li}$, расположенный непосредственно у перегородки первого канала эвтектики, активность которого примерно на ~40% обуславливается ${}^7\text{Li}$.

Так как длительность импульса в реакторе ИТЭР будет не меньше 400 с, то для самого неблагоприятного варианта (карбонат лития с природным содержанием ${}^6\text{Li}$) наработка трития за импульс будет достигать $\sim 10^3$ Бк, что позволит согласно [5] обеспечить погрешность при измерении трития в карбонате лития порядка 8%.

Степень корреляции между значениями удельной наработки трития в детекторах трития канала СМТ и ЗВТ ЭМБ определяется в значительной степени не только местоположением самого контейнера с детекторами (около первой стенки или в центре ЗВТ), но конкретным размещением детектора трития относительно каналов ЛСЭ и блоков КБ.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МАКЕТА КОНТЕЙНЕРА СМТ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ В РЕАКТОРЕ ИВВ-2М

Одним из основных требований, предъявляемых к конструкции контейнера СМТ, является обеспечение возможности работы с контейнером после облучения в ИТЭР в обычных радиохимических шкафах без использования горячих камер. Поэтому в качестве конструкционного материала были выбраны малоактивируемые алюминиевые сплавы АД1 и АД31.

Для облучения в реакторе деления из перечисленных сплавов был изготовлен макет контейнера длиной 40 мм, в котором были размещены три капсулы с карбонатом лития и кобальтовые активационные детекторы [5].

Для кобальтовых детекторов был выполнен расчёт нейтронных характеристик, причём потоки тепловых нейтронов были рассчитаны для значения сечения активации атома ${}^{59}\text{Co}$ 36 барн. Характеристики кобальтовых детекторов и результаты расчёта нейтронных потоков при облучении макета контейнера СМТ в горизонтальном канале реактора ИВВ-2М приведены в табл. 2, на рис. 6 показан график изменения мощности дозы от сборки после облучения в зависимости от времени выдержки.

Т а б л и ц а 2. Характеристики кобальтовых детекторов и потоки тепловых нейтронов

Номер детектора	Масса, мг	Активность, Бк	Поток тепловых нейтронов, $\text{н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}) \cdot 10^{-12}$
3—1	27,5	4231	1,254
3—2	27,6	4244	1,253
3—3	23,9	2968	0,879

Результаты расчёта мощности дозы (мкГр/ч) от контейнеров, изготовленных из алюминиевых сплавов АД1 и АД31, на расстоянии 10 см приведены в табл. 3.

Таким образом, уже через 30 мин после окончания облучения можно осуществлять транспортировку контейнеров, изготовленных из сплава АД1.

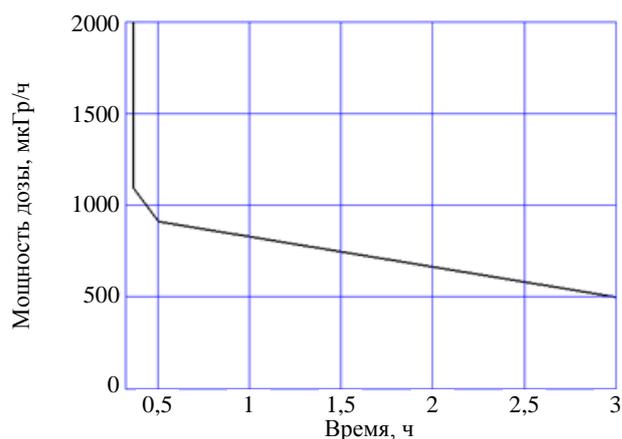


Рис. 6. Изменение мощности дозы от сборки после облучения

Т а б л и ц а 3. Мощность дозы (мкГр/ч) от контейнеров на расстоянии 10 см

Материал контейнера	Время выдержки, мин				
	0	1	10	30	60
Сплав АД31	$2,2 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^4$	772	139	91
Сплав АД1	$2,2 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^4$	639	6,9	0,45

ГАЗОВАЯ СИСТЕМА СМТ

Газовая система СМТ используется в дополнение к существующей системе газовой циркуляции, приведённой в статье [3], и обеспечивает пневматическую доставку контейнеров с детекторами в ЗВТ ЭМБ для мониторинга наработки трития в нём и поддерживает требуемый температурный режим их работы.

Целями разработки этой системы являются предотвращение газовых выбросов с тритийсодержащими веществами в атмосферу и устранение необходимости использования невозполняемых баллонов со сжатыми газами [7].

На рис. 7 изображена головная часть канала СМТ, по которому осуществляются транспортировка контейнера с датчиками 1 в «активную» часть канала, находящуюся в ЗВТ модуля, и доставка обратно в головную часть.

Канал СМТ представляет собой две коаксиальные трубы (наружная 2 и внутренняя 3), соединяющие головную часть канала с «активной» частью, находящейся в ЗВТ, где и происходит облучение контейнеров с детекторами. Загрузка и выгрузка контейнеров с датчиками в канал СМТ происходят в головной части канала и осуществляются через загрузочную камеру 4, присоединённую к каналу через шаровой вентиль 5. Доставка контейнера в ЗВТ осуществляется с помощью пневматической системы.

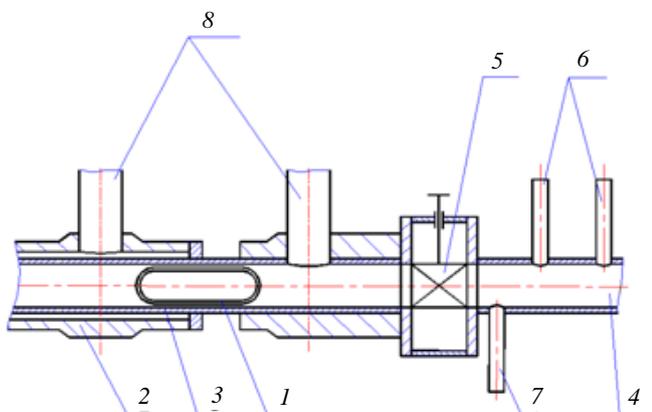


Рис. 7. Головная часть канала СМТ: 1 — контейнер с датчиками; 2 и 3 — наружная и внутренняя стенки канала СМТ; 4 — загрузочная камера; 5 — шаровой вентиль; 6 — патрубки технологической системы; 7 — линия откачки атмосферных газов; 8 — патрубки подвода и отвода газовой системы СМТ

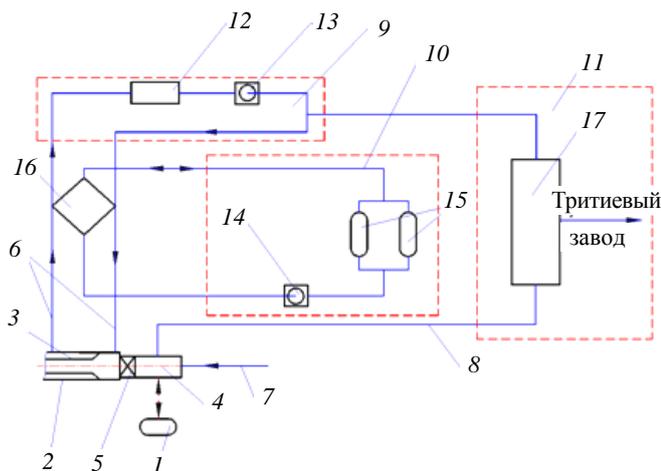


Рис. 8. Блок-схема газовой системы СМТ: 1 — контейнер с датчиками; 2 и 3 — наружная и внутренняя стенки канала СМТ; 4 — загрузочная камера; 5 — шаровой вентиль; 6 — технологические линии первого контура; 7 — линия заполнения загрузочной камеры воздухом; 8 — линии технологической системы; 9 — первый контур; 10 — второй контур; 11 — третий контур; 12 — теплообменник; 13 — газодувка; 14 — компрессор; 15 — ресивер; 16 — коммутационное устройство; 17 — тритиевая технологическая система

На рис. 8 представлена блок-схема газовой системы СМТ, обеспечивающей пневматическую доставку контейнера в ЗВТ и поддерживающей требуемый температурный режим работы канала и контейнера при горении плазмы.

Система состоит из трёх контуров:

— первый контур 9, содержащий теплообменник 12 и газодувку 13, служит для поддержания требуемого температурного режима работы контейнера 1 с детекторами в канале СМТ во время горения термоядерной плазмы;

— второй контур 10 обеспечивает пневматическую доставку и извлечение контейнера 1 с датчиками посредством импульсной подачи газа из ресиверов 15 по газовым линиям 6. Поддержание в них необходимого для этой цели давления обеспечивается компрессором 14, а коммутационное устройство 16 осуществляет изменение направления течения газа в канале;

— третий контур 11 выполняет контроль содержания трития в первом и втором контурах, который обеспечивается тритиевой технологической системой 17.

Работа газовой системы выполняется в следующей последовательности: контейнер 1 с датчиками через загрузочную камеру 4 помещается во внутреннюю трубу 3 канала. С использованием технологической системы 17 третьего контура 11 по линии 8 выполняется откачка загрузочной камеры, и газ после радиометрического контроля и очистки от трития выбрасывается в атмосферу или, если это невозможно, направляется в систему тритиевого цикла для дальнейшей переработки. После герметизации канала и заполнения теплоносителем загрузочной камеры контейнер 1 газовым импульсом, подаваемым из ресиверов 15 системы второго

В ходе испытаний рассматриваемой подсистемы была проведена серия экспериментов по доставке контейнера (алюминиевый цилиндр диаметром 10 мм, длиной 30 мм) в рабочий участок канала, выдержке в течение заданного времени и возврату контейнера во входной участок канала. Алгоритм проведения каждого эксперимента был следующий:

- загрузка контейнера через байонетный разъём в приёмное устройство;
- разогрев канала в полости печи до требуемой температуры с последующим отключением питания печи и её остыванием для имитации теплового режима в ЗВТ ЭМБ;
- подача требуемого расхода газа по линии контроллер расхода, клапаны В1, В8, В4, регулируемый клапан В6 (см. рис. 9);
- поддержание расхода газа в течение времени, достаточного для протекания переходных процессов: изменения температуры и перепада давления в рабочем участке канала;
- доставка контейнера в РУ канала потоком газа-носителя путём открытия клапана В7, закрытия клапана В8. Обратное переключение клапанов В7, В8 после прихода контейнера в РУ канала;
- поддержание расхода газа в течение времени, достаточного для протекания переходных процессов: изменения температуры и перепада давления в РУ канала;
- доставка контейнера во входной участок канала потоком газа-носителя по линии контроллер расхода, клапаны В2, В8, В3, регулируемый клапан В5.

На рис. 10 в качестве примера представлен график изменения контролируемых параметров во время эксперимента с одним контейнером. В этом эксперименте расход газа составлял $12 \text{ м}^3/\text{ч}$ при давлении на входе в канал $\sim 0,3 \text{ МПа}$.

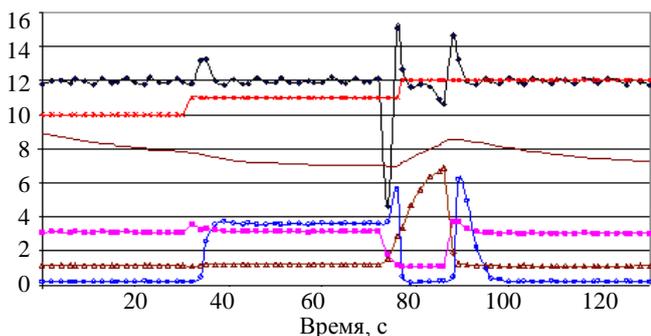


Рис. 10. Изменение контролируемых параметров во время перемещения контейнера: • — расход, $\text{м}^3/\text{ч}$; ■ — P1, бар; ▲ — P2, бар; ◆ — ΔP , кПа; ■ — номер импульса; — $T/10$, $^{\circ}\text{C}$

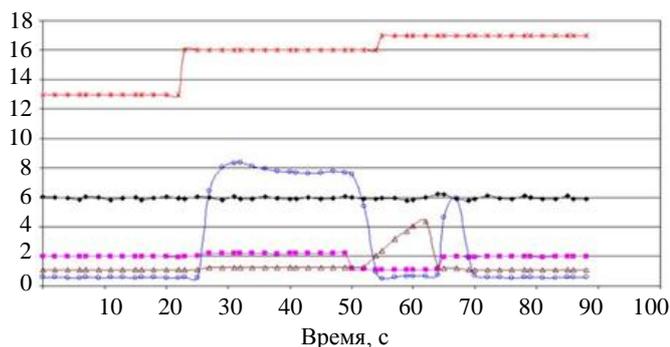


Рис. 11. Изменение контролируемых параметров во время перемещения трёх контейнеров: • — расход, $\text{м}^3/\text{ч}$; ■ — P1, бар; ▲ — P2, бар; ◆ — ΔP , кПа; ■ — номер импульса

импульсов изменились на три единицы при движении контейнеров в прямом направлении и только на одну единицу при движении в обратном направлении, хотя все контейнеры достигли входного участка. По-видимому, это обусловлено тем, что в обратном направлении контейнеры двигались без зазоров между ними.

Проведённые испытания газовой системы пневматического стенда позволяют выполнять гидродинамические исследования режимов пневматической транспортировки контейнеров в канале СМТ.

На рис. 10 видно, что:

- в момент времени, соответствующий $\sim 30 \text{ с}$, открыли клапан В8 и закрыли клапан В7. Перемещение контейнера зафиксировал датчик пересечения светового луча ST, и показания счётчика импульсов увеличились на единицу;
- с 32-й по 39-ю с произошло нарастание перепада давления на РУ с 0,2 до 3,6 кПа. На графике показаний термопары в момент времени ~ 34 —35 с наблюдается ступенька, наличие которой свидетельствует о прибытии контейнера в конечную точку внутренней трубы РУ, на поверхности которой установлена термопара;
- в момент времени 72 с направление потока газа сменили на обратный. Датчик пересечения светового луча зафиксировал прохождение контейнера в момент времени с 76-й по 77-ю с, при этом показания его счётчика импульсов увеличились на единицу.

На рис. 11 представлен график изменения контролируемых параметров во время эксперимента по транспортировке трёх контейнеров при давлении на входе в канал 0,2 МПа и расходе газа $6 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Из графика видно, что показания счётчика

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана конструкция контейнера с тритиевыми и нейтронными детекторами, обеспечивающая уменьшение воздействия на нейтронные потоки при размещении контейнера в месте мониторинга трития ЗВТ ЭМБ.

Выполнены расчёты нейтронно-физических характеристик канала СМТ ЭМБ (удельные и полные энерговыделения в материалах, а также скорости наработки трития). Полученные результаты будут использованы при выполнении дальнейшей детальной разработки обеспечивающих систем ЭМБ.

Для сравнения полученных результатов по скорости наработки трития в детекторах канала СМТ были выполнены расчёты при размещении контейнеров в центре ЗВТ модуля.

Выполненные расчёты показали, что погрешность измерений трития в детекторах из карбоната лития (Li_2CO_3) будет составлять порядка 10% при длительности импульса горения плазмы в ИТЭР 400 с и наработке трития $\sim 10^3$ Бк в литий-свинцовой эвтектике с природным содержанием ^6Li .

Разработана схема газовой системы канала СМТ, обеспечивающая пневматическую доставку контейнера в ЗВТ ЭМБ и поддержание температурного режима работы канала и контейнера с датчиками мониторинга.

Замкнутый цикл газовой системы СМТ исключает выброс радиоактивных веществ в атмосферу и не требует использования дополнительных баллонов со сжатым газом.

Газовая система пневматического стенда макета канала СМТ позволяет проводить контроль режимов доставки и регистрации положения контейнера с датчиками и поддержание требуемого уровня рабочих температур элементов конструкции СМТ ЭМБ.

Расчёты показали возможность проведения замеров характеристик облучённых датчиков контейнера СМТ вне горячих камер через 30 мин после извлечения контейнера.

REFERENCES

1. **Leshukov A.Yu., Danilov I.V. et al.** Results of calculations and design activities on the lithium-lead test blanket module with ceramic breeder. — VANT. Ser. Termoyadernyi Sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2013, vol. 36, issue 3, pp 3—25 (in Russian).
2. **Kirillov I.R., Pertsev D.A.** Investigation of alternative configurations of the LLCB TBM to increase neutronic and thermo-hydraulic performances. — Fusion Engineering and Design, 2010, vol. 85, pp. 1054—1058.
3. **Kapyshev V., Kovalenko V., Poliksha V., Sidorov A., Strebkov Yu., Yukhnov N.** On monitoring the tritium-breeding ratio in a fusion reactor. — Plasma Devices and Operations, 2008, vol. 16, pp. 135—145.
4. **Kapyshev V., Kartashev I., Kovalenko V., Poliksha V., Strebkov Yu., Yukhnov N.** On monitoring the tritium breeder in ITER test blanket module. — In: Proc. of the Fifteenth Intern. Workshop on Ceramic Breeder Blanket Interactions. Sapporo, Japan, 3—4 Sept. 2009.
5. **Kapyshev V., Danilov I., Kartashev I., Kovalenko V., Leshukov A., Poliksha V., Razmerov A., Strebkov Yu., Sviridenko M., Trusova E., Vladimirova N., Kalashnikov A.** Initial design and test of the tritium breeder monitoring system for the lead-lithium cooled ceramic breeder (LLCB) module of the ITER. — Fusion Engineering and Design, 2013, vol. 88, pp. 2293—2297.
6. **Kapyshev V., Kartashev I., Kovalenko V., Leshukov A., Poliksha V., Rasmerov A., Strebkov Yu., Yukhnov N.** On monitoring the tritium breeder in a lead-lithium cooled ceramic breeder (LLCB) module of the ITER. — Fusion Engineering and Design, 2012, vol. 87, pp. 712—717.
7. **Kapyshev V.K., Kovalenko V.G., Kartashev I.A., Leshukov A.Yu., Yukhnov N.M., Poliksha V.V., Vladimirova N.K.** System for pneumatic transportation of the tritium reproducing detectors in the tritium production channel of the fusion reactor blanket. Patent of JSC «RDIPE (N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering)» on invention № 2011148895, priority of 18.01.2013 (in Russian).

AUTHORS

Kapyshev V.K. N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia.

Vladimirova N.K. N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia.

Danilov I.V. N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia

Kartashev I.A. N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia.

Kovalenko V.G. N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; koval@nikiet.ru

Leshukov A.Yu. N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; leshu@nikiet.ru

Poliksha V.V. N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia.

Razmerov A.V. N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; razmerov@nikiet.ru

Sviridenko M.N. N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; sviridenko@nikiet.ru

Strebkov Yu.S. N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; styri@nikiet.ru

Trusova E.A. N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia.

Kalaschnikov A.N. State Atomic Corporation "Rosatom", 24 Bolshaya Ordynka St. 119017, Moscow, Russia

Received 5 November 2013

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2014, vol. 37, issue 2, pp. 17—26.