

УДК 621.039.63

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ВОСПРОИЗВОДСТВА ТРИТИЯ ДЛЯ ЭВТЕКТИКО-КЕРАМИЧЕСКОГО ГЕЛИЙОХЛАЖДАЕМОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ ИТЭР

Н.К. Владимирова, И.В. Данилов, В.К. Капышев, И.А. Карташев, В.Г. Коваленко, А.Ю. Лешуков, В.В. Поликша, М.Н. Свириденко, Ю.С. Стребков, Н.М. Юхнов (ОАО «НИКИЭТ», Москва, Россия), А.А. Джанелидзе, С.А. Животов, Е.В. Толстикова (ОАО «ИРМ», Заречный, Россия)

При разработке тритиевых технологических процессов для реакторов ИТЭР и ДЕМО важную роль играют операции по сведению тритиевого баланса в системах тритиевого цикла. Для их выполнения необходимо определение величин его основных показателей — скорости наработки трития и величины коэффициента тритиевого воспроизводства (КТВ). Работы по её экспериментальному определению выполнялись на начальном этапе разработок для российского испытательного модуля бланкета (ИМБ) [1]. В статье предлагается система, позволяющая проводить изменение КТВ в термоядерных реакторах. Одним из основных узлов такой системы является канал мониторинга наработки трития (КМНТ) в зоне воспроизводства трития (ЗВТ) бланкета. Рассмотрено два варианта доставки детекторов наработки трития и нейтронного излучения в ЗВТ и их транспортировки обратно после облучения нейтронами реактора — пневматический и механический. В настоящее время в отличие от первоначального варианта российского ИМБ с бериллиево-керамическим бридером рассматривается модуль на основе индийского предложения: эвтектика литий—свинец с литийсодержащей керамикой и гелиевым теплоносителем [2]. В статье рассматривается возможность мониторинга наработки трития в керамико-эвтектическом ИМБ, используя канал КМНТ с пневматическим методом транспортировки детекторов для модуля с эвтектикой литий—свинец, литийсодержащей керамикой и гелиевым теплоносителем.

Ключевые слова: ИТЭР, тритий, бланкет, испытательный модуль.

DEVELOPMENT OF TRITIUM BREEDING MONITORING FOR HELIUM COOLED LEAD-LITHIUM CERAMIC TEST MODULE OF ITER. N.K. VLADIMIROVA, I.V. DANILOV, V.K. KAPYSHEV, I.A. KARTASHEV, V.G. KOVALENKO, A.Yu. LESHUKOV, V.V. POLIKSHA, M.N. SVIRIDENKO, Yu.C. STREBKOV, N.M. YUKHNOV, A.A. DZHANELIDZE, S.A. ZHIVOTOV, E.V. TOLSTIKOVA. Tritium balance is an important parameter for tritium technology of ITER and DEMO reactors. Tritium-breeding monitoring in the reactors is necessary to define the tritium-breeding ratio (TBR), the tritium-breeding dynamics and tritium balance. An activity for experimental estimation of the TBR in Russia has begun on initial stage of Test Blanket Module (TBM) development [1] and system for the TBR estimation is presented. One of the main parts of this system is tritium breeder monitor channel (TBMC) located in tritium breeding zone (TBZ) of blanket. Two methods have been discussed to deliver tritium breeder samples and neutron detectors to TBZ and return to a laboratory for tritium and activated material measurements: pneumatic and mechanical. At present a module based on Indian variant is considered [2]. In the paper possibility of tritium breeding monitoring in a Lead-Lithium cooled Ceramic Breeder (LLCB) TBM using pneumatic method is discussed.

Key words: ITER, tritium, blanket, test module.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА КТВ (КМКТВ) ДЛЯ РЕАКТОРОВ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

В общем виде величина КТВ равна отношению [3]

$$\text{КТВ} = \frac{Q_{\text{реактор}}}{Q_{\text{плазма}}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{реактор}}$ — количество трития, нарабатываемого в бланкете и плазме реактора; $Q_{\text{плазма}}$ — количество трития, «сгоревшего» в плазме.

Основные параметры, необходимые для определения величины КТВ и пригодные для любой системы управляемого термоядерного синтеза, в которой происходит наработка трития, могут быть описаны с помощью концептуальной схемы экспериментального термоядерного реактора (рис. 1).

На рисунке приведены основные компоненты реактора, имеющие прямое или косвенное отношение к наработке трития.

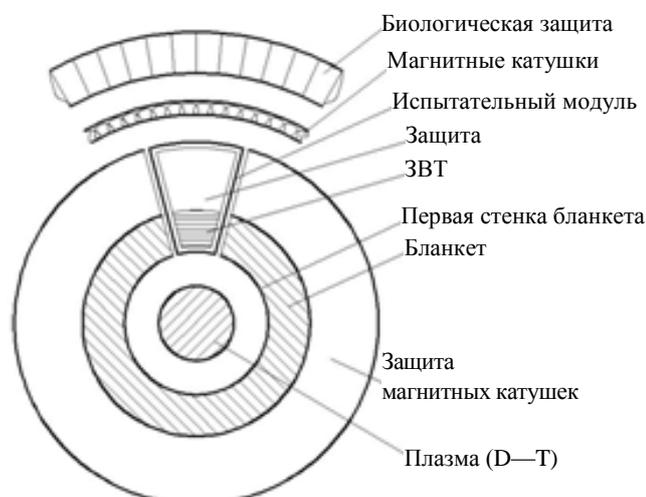


Рис. 1. Схема экспериментального термоядерного реактора, работающего на дейтерий-тритиевой плазме

В рамках проводимых в настоящее время разработок керамико-эвтектического бланкета ТЯР с гелиевым теплоносителем предполагаем, что тритий в зоне воспроизводства трития (ЗВТ) бланкета нарабатывается на изотопах лития и в плазме по реакции D—D. В плазме тритий «сгорает» по реакции D—T.

Тогда $Q_{\text{реактор}} = Q_{\text{ЗВТ}} + Q_{\text{D-D}}$; $Q_{\text{ЗВТ}} = Q_{^6\text{Li}} + Q_{^7\text{Li}}$; $Q_{\text{плазма}} = Q_{\text{D-T}}$, где $Q_{^6\text{Li}}$, $Q_{^7\text{Li}}$ — количество трития, наработанного в ЗВТ на ядрах ^6Li , ^7Li в литиевой части ЗВТ; $Q_{\text{D-D}}$ — количество трития, наработанного в плазме по реакции D—D; $Q_{\text{D-T}}$ — количество трития, «сгоревшего» в плазме.

Таким образом, величина КТВ за один импульс согласно формуле (1) будет равна

$$\text{КТВ} = \frac{Q_{^6\text{Li}} + Q_{^7\text{Li}} + Q_{\text{D-D}}}{Q_{\text{D-T}}}. \quad (2)$$

Предположение о величине КТВ за один импульс согласно формуле (1) означает стационарность процесса, т.е., в частности, не учитывается выгорание лития в ЗВТ реактора.

Кроме того, выражение $Q_{\text{D-D}}$ в формуле (2) предполагает полное поглощение в плазме образующихся ядер ^3He нейтронами.

Концепция мониторинга КТВ термоядерного реактора ДЕМО предполагает как измерение величин числителя и знаменателя в (1), так и их вычисление. Экспериментальное определение величины знаменателя предполагается осуществить измерением нейтронов, возникающих в результате термоядерной реакции дейтерия и трития. Числитель показывает наработку трития в бланкете реактора при взаимодействии нейтронов с изотопами лития и бериллием, причём в дальнейшем предполагается учитывать не только нейтроны от D—T-реакции, но и нейтроны от возможных ускорительных процессов по реакции (γ, n) .

Достаточно точное экспериментальное определение количества наработанного в модуле трития (числитель в (1)) может быть выполнено размещением образцов тритийвоспроизводящих материалов и детекторов нейтронного излучения в ЗВТ бланкета на время плазменного импульса с последующим извлечением их из реактора и доставкой образцов в лабораторию для анализа непосредственно после окончания импульса.

Вычисление величин, входящих в числитель формулы (2), осуществляется с помощью нейтронно-физических компьютерных программ.

В общем виде количество трития, нарабатываемого в ЗВТ модуля, вычисляется по формуле

$$Q_{\text{ЗВТ}} = \iint \left(\sum Q_{^6\text{Li}} + \sum Q_{^7\text{Li}} \varphi(r, E) \right) dr dE,$$

где $\sum Q_{^6\text{Li}}$, $\sum Q_{^7\text{Li}}$ — макроскопические сечения реакций образования трития при взаимодействии нейтронов с ядрами ^6Li и ^7Li ; $\varphi(r, E)$ — плотность потока нейтронов; E — энергетический интервал нейтронов от тепловой энергии до 14,06 МэВ; r — координаты вектора потока нейтронов; $V_{\text{ЗВТ}}$ — объём ЗВТ бланкета реактора.

Корректировку получаемых в эксперименте величин предполагается выполнить с помощью результатов анализа содержания трития в газеносителе, выходящем из ЗВТ бланкета. Величина знаменателя вычисляется на основе теории плазменно-физических процессов в термоядерном реакторе.

Предлагаемая концепция может быть реализована с помощью КМКТВ, блок-схема которого показана на рис. 2.

Комплекс включает:

— систему контроля наработки трития (СМНТ) в ЗВТ бланкета ТЯР, состоящую из канала мониторинга наработки трития (КМНТ), газовой тритиевой системы, обеспечивающей выполнение всех операций с тритийсодержа-



Рис. 2. Блок-схема КМКТВ термоядерного реактора

щими веществами, и транспортной системы, обеспечивающей подачу детекторов в КМНТ, их выгрузку после облучения и транспортировку в тритиевую лабораторию;

— систему измерений нейтронов (СИН), образующихся в разрядной камере ТЯР в результате термоядерных реакций $D-T$ и $D-D$;

— информационно-вычислительный и аналитический комплекс (ИВАК), включающий тритиевую аналитическую лабораторию и предназначенный для обработки экспериментальных данных, поступающих из систем КМКТВ, тритиевых систем ИМБ, и расчёта нейтронно-физических процессов в ТЯР. Результатом выполненных операций является экспериментальное и расчётное определение величины КТВ реактора.

Варианты рассматриваемого комплекса определяются прежде всего способами измерения трития и экстраполяцией измеренных величин с целью определения скорости и количества наработанного трития в ЗВТ реактора.

Существуют несколько вариантов решения этой проблемы:

— использование результатов измерений концентрации трития в газе-носителе или в любой другой системе, служащей для выделения трития из ЗВТ. Измерение количества трития в ЗВТ после завершения программы испытаний ИМБ;

— использование камер деления для регистрации изменения нейтронных потоков методом on-line в ЗВТ в процессе проведения плазменных импульсов в реакторе;

— измерение нейтронных потоков и спектра нейтронов в ЗВТ, используя активационные детекторы;

— использование всего спектра существующих литийсодержащих материалов для измерения трития, нарабатываемого в ЗВТ во время проведения термоядерного импульса.

Первые три способа требуют расчёта нарабатываемого трития на основании выполненных измерений и экстраполяции измеренных значений на всю ЗВТ.

Однако последний способ не требует расчёта нарабатываемого трития, а только выполнения экстраполяции.

Учитывая незначительное превышение величины КТВ над единицей в термоядерном реакторе, очевидна необходимость как можно более точного экспериментального измерения её составляющих.

Согласно формуле (1) экспериментальное определение величины КТВ будет иметь погрешность $\Delta_{КТВ}$, равную сумме погрешностей числителя $\Delta_{\text{реактор}}$ и знаменателя $\Delta_{\text{плазма}}$:

$$\Delta_{КТВ} = \Delta_{\text{реактор}} + \Delta_{\text{плазма}}$$

Погрешность числителя, в свою очередь, равна сумме погрешностей при определении количества трития, наработанного в ЗВТ на ядрах ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ в литиевой части ЗВТ ($\Delta_{\text{ЗВТ}}$) и количества трития, наработанного в плазме по реакции $D-D$. Таким образом,

$$\Delta_{\text{реактор}} = \Delta_{\text{ЗВТ}} + \Delta_{d-d}$$

Погрешность $\Delta_{\text{ЗВТ}}$ определяется, с одной стороны, погрешностью при измерении трития, наработанного в литийсодержащих детекторах, с другой стороны, дополнительной погрешностью при вычислении распределения нейтронных потоков в ЗВТ, которые являются основой для экстраполяции распределения тритиевой наработки в ЗВТ и последующего расчёта $Q_{\text{ЗВТ}}$.

На данном этапе исследований определение погрешности Δ_{d-d} предполагается выполнить пересчётом погрешности $\Delta_{\text{плазма}}$ при определении количества трития, «сгоревшего» в плазме (Q_{D-T}):

$$\Delta_{d-d} = \Delta_{d-t} S_{d-d}(T_{\text{плазма}}) / S_{d-t}(T_{\text{плазма}}),$$

где $S_{d-d}(T_{\text{плазма}})$ и $S_{d-t}(T_{\text{плазма}})$ — усреднённые по температуре плазмы сечения термоядерных реакций $D-D$ и $D-T$.

Принимая во внимание, что величины Δ_{d-t} и $\Delta_{\text{реактор}}$ на уровне существующих разработок в лучшем случае могут быть порядка 10 и 5% соответственно, получаем погрешность $\Delta_{КТВ} \sim 15\%$. Учитывая, что КТВ реактора ДЕМО не будет превышать 1,05, видны важность и необходимость разработок по уменьшению погрешностей при определении величин, входящих в КТВ.

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА НАРАБОТКИ ТРИТИЯ В ИБМ РЕАКТОРА ИТЭР

Работы по экспериментальной проверке величины КТВ были начаты ещё в 1970-е годы практически одновременно с началом работ по системам тритиевых циклов термоядерных реакторов. В качестве

источника нейтронов был выбран изотоп калифорния (^{252}Cf), в качестве тритийвоспроизводящего материала — карбонат лития [4]. Сфера, заполненная карбонатом, с нейтронным источником в её центре размещалась в баке, заполненном парафином.

Работы по наработке трития были продолжены в рамках проводимых в 1980-е годы реакторных экспериментов по исследованию влияния реакторного облучения на свойства литийсодержащих керамик и сведению тритиевого баланса [4, 5].

В выполненных исследованиях использовалась достаточно сложная методика измерения малых концентраций трития в облучённых на нейтронных источниках материалах и были продемонстрированы трудности экспериментального определения КТВ в реакторных условиях.

Предлагаемую в настоящее время схему мониторинга КТВ для термоядерного реактора можно испытать, используя совместный индийско-российский ИМБ. Соответствующая схема размещения КМНТ и СИН для реактора ИТЭР показана на рис. 3.

В экспериментальном термоядерном реакторе ИТЭР наработка трития может проходить только в ЗВТ испытательных бланкетов, которые могут занимать сравнительно небольшую часть объёма бланкета. В этом случае для грубых оценок, как первое приближение, величина КТВ может быть вычислена по формуле $\text{КТВ} = S_{\text{ИБМ}}/S_{\text{бланкет}}$, где $S_{\text{ИБМ}}$ — площадь поверхности ИБМ, обращённой к плазме; $S_{\text{бланкет}}$ — площадь поверхности бланкета, обращённой к плазме.

Образцы литийсодержащей керамики и эвтектики, предполагаемой для использования в бланкете термоядерного реактора, и датчики для определения флюенса нейтронов в бланкете, помещённые в контейнеры, предполагается размещать в каналах КМНТ [1]. Транспортировку контейнеров в модуль и обратно предлагается осуществлять пневматическим способом, а охлаждение канала — газом.

Система КМНТ состоит из собственно канала, обслуживающего оборудования и коммуникаций, обеспечивающих требуемые режимы работы: охлаждение элементов канала КМНТ, транспортировку тритиевых датчиков и продувку канала. При этом режимы загрузки, выгрузки и транспортировки тритиевых датчиков, а также продувка канала осуществляются только во время паузы между импульсами горения плазмы. Продувка контуров системы необходима после загрузки датчиков для удаления из системы воздуха и перед выгрузкой датчиков для удаления теплоносителя, который может быть загрязнён тритием. Блок-схема газовой системы, обеспечивающей работу КМНТ при всех режимах работы, приведена на рис. 4.

На настоящем этапе разработки мониторинга КТВ ведётся разработка канала, создаются стендовая база для исследования процессов, протекающих в канале при выполнении транспортных операций с детекторами, и технологии измерения нарабатываемого в детекторах трития.

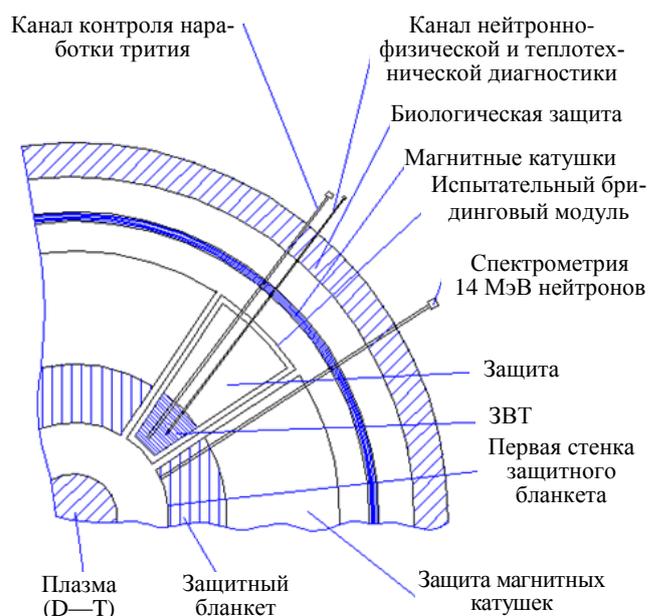


Рис. 3. Схема мониторинга наработки трития в ИМБ реактора ИТЭР

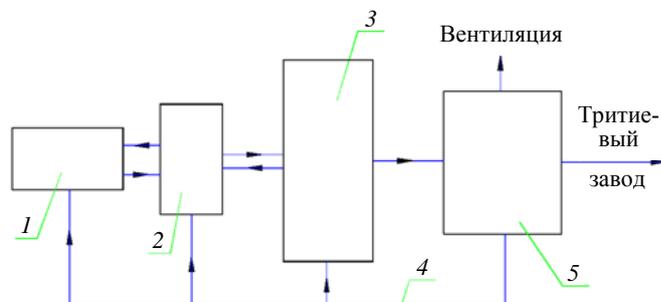


Рис. 4. Блок-схема газовой системы КМНТ, использующей пневматический метод транспортировки детекторов в ИМБ: 1 — канал контроля наработки трития (КМНТ); 2 — коммутатор газовых потоков; 3 — система газовой циркуляции и пневматической подачи детекторов в КМНТ; 4 — технологическая линия системы тритиевой дезактивации; 5 — система радиационной безопасности (РБС)

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ НАРАБОТКИ ТРИТИЯ В ДЕТЕКТОРАХ КМНТ КЕРАМИКО-ЭВТЕКТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ

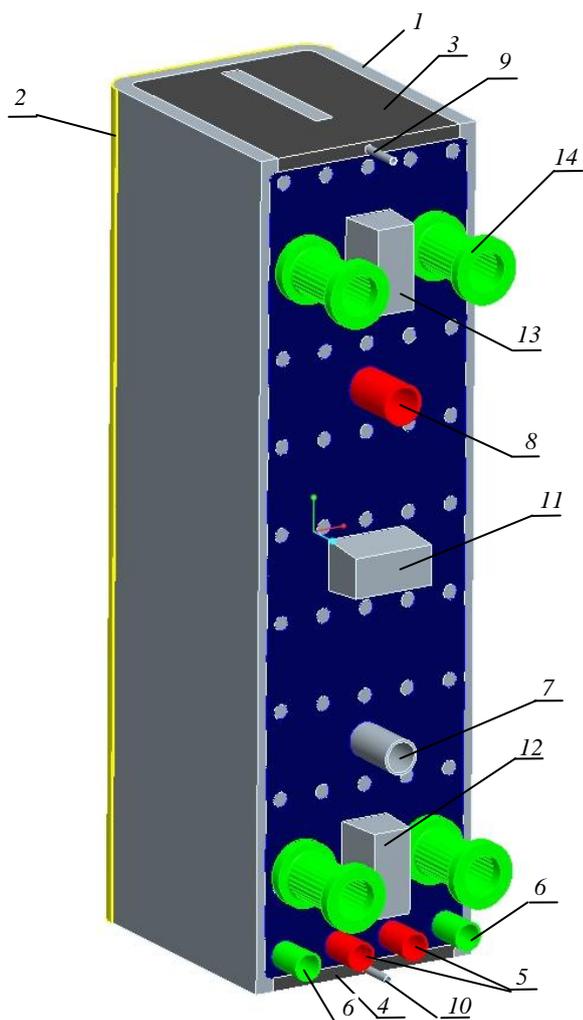


Рис. 5. Общий вид ИМБ проекта РФ: 1 — скоба ПС; 2 — защитное покрытие ПС; 3 — верхняя крышка корпуса ИМБ; 4 — нижняя крышка корпуса ИМБ; 5 — выходные патрубки RbLi-эвтектики; 6 — входные патрубки RbLi-эвтектики; 7 — входной патрубок He-теплоносителя; 8 — выходной патрубок He-теплоносителя; 9 — входной патрубок газа-носителя; 10 — выходной патрубок газа-носителя; 11 — центральный противомоментный ключ; 12 — нижний противомоментный ключ; 13 — верхний противомоментный ключ; 14 — гибкая механическая опора

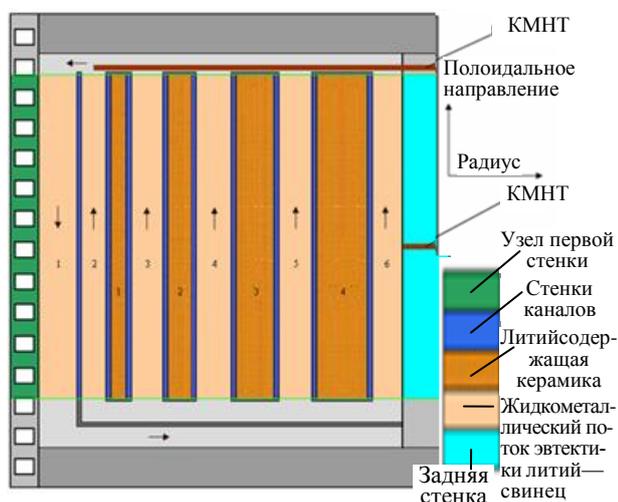


Рис. 6. Размещение КМНТ в керамико-эвтектическом ИМБ

Общий вид задней стенки российского керамико-эвтектического модуля с местами входов каналов КМНТ показан на рис. 5. В отличие от российского керамического варианта модуля размещение КМНТ в центре индийско-российского практически невозможно по конструктивным соображениям. Поэтому каналы размещались за пределами ЗВТ модуля в системе охлаждения крышки корпуса ИМБ и в его боковом корпусе.

Для выполнения нейтронно-физических и теплотехнических расчётов была принята модель ИМБ, приведённая в [5]. Схема поперечного сечения модуля показана на рис. 6. Размеры каналов модуля для двух вариантов приведены в табл. 1.

Контейнеры с детекторами располагаются непосредственно за керамическими бериллиевыми вставками. Величина расстояния до первой стенки также приведена в табл. 1.

Нейтронно-физический расчёт двух вариантов был проведён для 3-D простой геометрической конфигурации ИМБ, размещённого в горизонтальном порту ИТЭР. Расчётные исследования проводились с помощью программы MCNP, реализующей метод Монте-Карло, с библиотекой констант FENDL-2 для 3-D-моделей модулей.

Нормировка источника выбрана таким образом, чтобы обеспечить ток термоядерных нейтронов на первой стенке и, следовательно, нейтронную нагрузку, соответствующую условиям нейтронной нагрузки на первую стенку экваториального порта ИТЭР — $0,8 \text{ МВт/м}^2$ при полной термоядерной мощности 500 МВт.

Рассчитывалась скорость наработки трития в детекторах, размещённых в контейнерах. Каждый контейнер содержит пять цилиндрических капсул-детекторов с образцами тритийвоспроизводящих материалов, имеет длину 30 мм и наружный диаметр 9 мм. Ближе к первой стенке (ПС) модуля расположены три детектора, содержащие свинцово-литиевую эвтектику с различным обогащением по ${}^6\text{Li}$, четвёртый содержит ортосиликат лития, пятый — карбонат лития. Диаметр детекторов, облучаемых в канале, 5 мм. Пространство канала между контейнерами и ПС заполнено керамическим бериллием.

Для теплотехнического анализа работы КМНТ (рис. 6) и возможности измерения наработанного трития в табл. 2, 3 приведены удельная скорость наработки трития ($1/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$) и скорость наработки трития в детекторах (Бк/с) для двух случаев размещения КМНТ во втором варианте конструкции ИМБ — в

центральном канале охлаждения крышки корпуса ИМБ и в его боковом канале. Эти варианты размещения детекторов являются наиболее неблагоприятными с точки зрения величины наработанного трития в литийсодержащих материалах детекторов, и поэтому эти варианты были выбраны для дальнейшего анализа возможности её измерения.

Т а б л и ц а 1. Размеры каналов и распределение материалов в ЗВТ ИМБ в радиальном направлении

Вариант 1			Вариант 2		
Зона	Положение границ, м		Зона	Положение границ, м	
	Левая	Правая		Левая	Правая
Первая стенка	0	0,028	Первая стенка	0	0,030
Канал 1 (жидкий металл)	0,028	0,076	Канал 1 (жидкий металл)	0,030	0,071
Стенка канала	0,076	0,079	Стенка канала	0,071	0,074
Канал 2 (жидкий металл)	0,079	0,120	Канал 2 (жидкий металл)	0,074	0,104
Стенка канала	0,120	0,123	Стенка канала	0,104	0,107
Канал 3 (жидкий металл)	0,123	0,174	Керамическая вставка 1	0,107	0,137
Стенка канала	0,174	0,177	Стенка канала	0,137	0,140
Керамическая вставка 1	0,177	0,203	Канал 3 (жидкий металл)	0,140	0,172
Стенка канала	0,203	0,206	Стенка канала	0,172	0,175
Канал 4 (жидкий металл)	0,206	0,263	Керамическая вставка 2	0,175	0,212
Стенка канала	0,263	0,266	Стенка канала	0,212	0,215
Керамическая вставка 2	0,266	0,297	Канал 4 (жидкий металл)	0,215	0,253
Стенка канала	0,297	0,300	Стенка канала	0,253	0,256
Канал 5 (жидкий металл)	0,300	0,358	Керамическая вставка 3	0,256	0,307
Стенка канала	0,358	0,361	Стенка канала	0,307	0,310
Керамическая вставка 3	0,361	0,400	Канал 5 (жидкий металл)	0,310	0,345
Стенка канала	0,400	0,403	Стенка канала	0,345	0,348
Канал 6 (жидкий металл)	0,403	0,450	Керамическая вставка 4	0,348	0,420
Первая плита задней стенки	0,450	0,470	Стенка канала	0,420	0,423
			Канал 6 (жидкий металл)	0,423	0,450
			Первая плита задней стенки	0,450	0,470

Т а б л и ц а 2. Удельная скорость наработки трития, $1/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$ и скорость наработки трития в детекторах, Бк/с, задней стенки ИМБ

Вариант 2, $1/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$, Бк/с	Материал и число ядер $N \text{ } ^6\text{Li}$ в $1 \cdot 10^{22} \text{ см}^3$	Обогащение по ^6Li , %
$1,55 \cdot 10^{10}$, $2,77 \cdot 10^1$	Эвтектика, $N = 0,0346$	7,4
$4,40 \cdot 10^{10}$, $7,88 \cdot 10^1$	Эвтектика, $N = 0,234$	50
$9,60 \cdot 10^{10}$, $1,72 \cdot 10^2$	Эвтектика, $N = 0,421$	90
$6,55 \cdot 10^{10}$, $1,17 \cdot 10^2$	Ортосиликат лития, $N = 0,277$	7,4
$6,69 \cdot 10^{10}$, $1,20 \cdot 10^2$	Карбонат лития, $N = 0,255$	7,4

Т а б л и ц а 3. Удельная скорость наработки трития, $1/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$, и скорость наработки трития в детекторах, Бк/с, бокового канала крышки ИМБ

Вариант 2	Материал и число ядер $N \text{ } ^6\text{Li}$ в $1 \cdot 10^{22} \text{ см}^3$	Обогащение по ^6Li , %
$4,95 \cdot 10^{10}$, $8,86 \cdot 10^1$	Эвтектика, $N = 0,0346$	7,4
$3,22 \cdot 10^{11}$, $5,76 \cdot 10^2$	Эвтектика, $N = 0,234$	50
$4,44 \cdot 10^{11}$, $7,95 \cdot 10^2$	Эвтектика, $N = 0,421$	90
$3,46 \cdot 10^{11}$, $6,19 \cdot 10^2$	Ортосиликат лития, $N = 0,277$	7,4
$4,32 \cdot 10^{11}$, $7,73 \cdot 10^2$	Карбонат лития, $N = 0,255$	7,4

Результаты расчёта количества наработанного трития в детекторах КМНТ, размещённых в центре крышки ИМБ, в течение импульса $3 \cdot 10^3 \text{ с}$ приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Наробка трития в детекторах КМНТ, размещённого в центре крышки ИМБ ($t = 3 \cdot 10^3 \text{ с}$)

Бк/детектор	Детектор	^6Li , %
$9,24 \cdot 10^4$	Эвтектика	7,4
$3,62 \cdot 10^6$	Эвтектика	50
$3,12 \cdot 10^4$	Эвтектика	90
$2,60 \cdot 10^4$	Li_4SiO_4	7,4
$3,02 \cdot 10^4$	Li_2CO_3	7,4

Так как длительность импульса в реакторе ИТЭР будет не меньше 400 с, то даже для самого неблагоприятного варианта (эвтектика с обогащением по ${}^6\text{Li}$ 7,4%) наработка трития за импульс будет достигать $\sim 10^4$ Бк, что позволит обеспечить погрешность при измерении трития в керамике не более 5%.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТРИТИЯ В ТАБЛЕТКАХ КАРБОНАТА И ОРТОСИЛИКАТА ЛИТИЯ, ОБЛУЧЁННЫХ НЕЙТРОНАМИ В РЕАКТОРЕ ИВВ-2М

Измерения активности трития проводили жидкосцинтилляционным методом с использованием счётчика Triathler (Hidex Oy) и сцинтилляционной жидкости Ultima Gold AB (PerkinElmer).

Для измерения активности трития, образующегося в образцах карбоната лития при облучении нейтронами, за основу были взяты две методики — Диркса [6, 7] и Верзилова [8]. В ходе исследований ставилась задача адаптировать эти методики под реальные задачи, провести сравнительные оценки и выбрать оптимальную методику. При сравнительной оценке методик в качестве основных рассматривались следующие критерии: точность измерений, сложность и длительность процедуры пробоподготовки. Для оценки эффективности счёта в обеих методиках использовали метод внутреннего стандарта.

Расчётная активность образцов карбоната лития, облучённых в реакторе ИВВ-2М, известна с погрешностью около $\pm 14\%$. Поэтому для тестирования погрешности измерения методик использовали модельные образцы, подготовленные с помощью необлучённого карбоната бария и стандартных образцов тритиевой воды (СОТВ). Для этого после растворения необлучённого образца карбоната лития и измерения фона в раствор добавляли известное количество трития в виде СОТВ объёмом несколько десятков микролитров. Активность СОТВ (производства ФГУП «ВНИИФТРИ») известна с погрешностью $\pm 3\%$, погрешность разбавления СОТВ составляет $\pm 0,5\%$. Это позволяет сравнить измеренное значение активности трития с его реальной активностью, известной с погрешностью около $\pm 3\%$.

Экспериментально показано, что обе методики при времени счёта 1200 с позволяют измерять активность трития в образцах карбоната лития массой 0,1—1 г с погрешностью $\pm 6—7\%$ (без учёта неопределённостей, связанных с оценкой доли трития, переходящего в газовую фазу при облучении). С целью повышения достоверности измерений для обеих методик рекомендовано:

- проведение серии из 5—10 измерений длительностью 1200 с для каждого образца карбоната лития;
- использование СОТВ с меньшей погрешностью, например, производства NIST;
- использование низкофоновое жидкосцинтилляционного счётчика с электронной дискриминацией фона и эффективной пассивной защитой детектора (связано с высоким и нестабильным уровнем фона на площадке ОАО «ИРМ»).

При сравнении обеих методик можно отметить следующее:

- близкая погрешность измерения активности трития в образцах карбоната лития;
- в отличие от методики Диркса, где процедура пробоподготовки занимает около 24 ч, методика Верзилова позволяет выполнять экспресс-анализ облучённых образцов карбоната лития;
- методика Верзилова очень чувствительна к точности дозирования кислот, используемых для растворения образцов карбоната лития.

В литературе информация об использовании ортосиликата лития (Li_4SiO_4) в качестве детектора наработки трития отсутствует. Растворение Li_4SiO_4 в азотной и уксусной кислотах (НА) происходит по реакции



Особенностью реакции является то, что в процессе растворения ортосиликата лития образуется осадок SiO_2 , который может оказывать существенное влияние на погрешность измерений трития. Для минимизации этого влияния осадок необходимо удалить из раствора.

В процессе отработки методики были выполнены следующие работы:

- в качестве растворителя выбрана смесь азотной (71%) и уксусной (100%) кислот в объёмном соотношении 1,8. Подобранный состав кислот позволяет растворять Li_4SiO_4 в минимальном объёме и оказывает незначительное влияние на эффективность счёта трития. Полученные растворы содержат

легко фильтруемые осадки. Для растворения 1 г ортосиликата лития используется 2,12 мл HNO_3 и 1,18 мл CH_3COOH ;

— для удаления осадка SiO_2 из раствора апробированы операции фильтрации, центрифугирования и вакуумной дистилляции.

В процессе отработки методики было установлено, что во всех случаях погрешность измерения активности трития в образцах ортосиликата лития превышает 10%. Таким образом, отработанная методика не может быть рекомендована для измерения КТВ с помощью облучённых образцов ортосиликата лития.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, ПРИНИМАЕМЫХ ПРИ СОЗДАНИИ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА НАРАБОТКИ ТРИТИЯ

Для проверки правильности конструктивных и технологических решений, принимаемых при создании СМНТ, в ОАО «ИРМ» планируются разработка и создание прототипа канала для ИМБ ИТЭР на исследовательском реакторе ИВВ-2М. Размещение прототипа КМНТ предполагается осуществить в горизонтальном экспериментальном канале реактора ИВВ-2М.

В настоящее время изготовлен макет СМНТ, предназначенный для решения следующих задач:

- выбор способа регистрации положения контейнера в крайних точках КМНТ;
- разработка технических решений, исключающих деформацию контейнера с бридерным материалом при его торможении в крайних точках КМНТ;
- отработка конструкции транспортного контейнера и технологии извлечения из него бридерного материала для проведения жидкосцинтилляционного анализа активности трития;
- автоматизация системы контроля и управления СМНТ;
- разработка практических рекомендаций по конструкции КМНТ.

На фотографиях рис. 7 показан макет СМНТ: входной участок макета КМНТ, включающий приёмный контейнер, байонетный разъём, узел оптического датчика контроля прохождения транспортного контейнера, штуцеры подачи газа, запорные шаровые вентили (справа), и газовый стенд, скомпонованный в единую стойку с блоком первичных преобразователей сигналов контроля и управления автоматизированной системы контроля и управления работой стенда (слева).

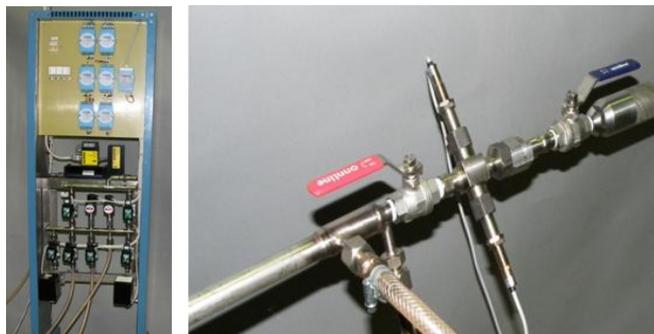


Рис. 7. Внешний вид макета СМНТ

Технические характеристики макета КМНТ:

Длина, м ...	8
Диаметр внутренней трубы транспортировки контейнера, мм ...	12
Диаметр внешней трубы рабочего участка, мм ...	30
Рабочее давление, МПа, не более ...	1
Рабочая температура в РУ (без контейнера), °С, не более ...	600
Максимальный расход азота при давлении на входе в КМНТ 0,5 МПа, н·м ³ /ч ...	21

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана КМНТ в зоне воспроизводства трития ИМБ с эвтектикой литий—свинец, литийсодержащей керамикой и гелиевым теплоносителем.

Разработаны технические предложения по размещению канала КМНТ в эвтектико-керамическом ИМБ и выполнены теплотехнические и нейтронно-физические расчёты скоростей наработки трития в детекторах и ЗВТ ИМБ.

Выполненные расчёты показали, что даже при длительности импульса в реакторе ИТЭР 400 с и для самого неблагоприятного варианта использования детекторов (эвтектика с обогащением по ${}^6\text{Li}$ 7,4%) наработка трития за импульс будет достигать $\sim 10^4$ Бк, что позволит обеспечить погрешность при измерении трития в керамике не более 5%.

Созданный пневматический стенд макета системы мониторинга наработки трития позволяет проводить гидродинамические и механические исследования режимов пневматической транспортировки детекторов в КМНТ.

REFERENCES

1. **Капышев В.К., Yukhnov N.M., Poliksha V.V., Sidorov A.M.** Experimental estimate of tritium production parameters for the RF test submodules of the ITER blanket. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2005, issue 4, pp. 19—29 (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. **Капышев В.К., Kartashev I.A., Kovalenko V.G., Leshukov A.Yu., Poliksha V.V., Sviridenko M.N., Strebkov Yu.C., Yukhnov N.M.** On monitoring the tritium breeder in DEMO and ITER — VANT. Ser. Termoyadernyy sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2010, issue 3, pp. 19—29 (in Russian).
4. **Evgrafova D.I., Ershova Z.V., Капышев В.К., Sakharov V.I.** Determination of the tritium quantity, produced under irradiation of lithium by neutrons of fission spectrum on the source Cf-252. — In book: Reports of All-Union conference on engineering problems of fusion reactors. Leningrad, 28—30 June 1977, vol. 2. SCUAE USSR, D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus, 309 p. (in Russian).
5. **Капышев В. К., Starshin E. P., Frolov V.N.** Radiation of lithium aluminate, ortho- and metasilicate tablets in thermonuclear reactor and study of their gas emission and strength properties. — Plasma Devices and Operations, 1994, vol. 3, pp. 287—292.

AUTHORS

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.

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

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.

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.

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

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

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

Dzhanelidze A.A. Open Joint-Stock Company «Institute of Reactors Materials», P.O. Box 29, 624250 Zarechnyi, Sverdlovsk region, Russia.

Zhivotov S.A. Open Joint-Stock Company «Institute of Reactors Materials», P.O. Box 29, 624250 Zarechnyi, Sverdlovsk region, Russia.

Tolstikova E.V. Open Joint-Stock Company «Institute of Reactors Materials», P.O. Box 29, 624250 Zarechnyi, Sverdlovsk region, Russia.

Received 15 August 2011

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2011, issue 4, pp. 40—49.