

УДК 621.039

**РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДУЛЯ  
ЛИТИЕВОГО БЛАНКЕТА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ  
В РЕАКТОРЕ ИТЭР  
И ЕГО ВНЕШНИЕ  
ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

*В.А. Евтихин, И.Е. Люблинский, А.В. Вертков, А.Н. Чуманов, Ю.В. Бобков,  
В.Н. Шполянский, Н.М. Афанасьев, Н.И. Ежов*

Концепция охлаждаемого литием тритийвоспроизводящего blankets демонстрационного термоядерного реактора является одной из наиболее привлекательных и технологически проработанных в настоящее время. Испытательные самоохлаждаемые литиевые модули для экспериментальной проверки этой концепции на ИТЭР разрабатываются в России и США. В работе кратко изложены основные принципы и подходы к выбору конструкции модуля, схемы и основного оборудования его жидкометаллических и вспомогательных систем. Нейтронно-физические, теплофизические расчеты, конструкторские работы, схемные проработки, проводимые с учетом формирования концепции и эволюции проекта ИТЭР, позволили разработать вариант проектного предложения литиевого модуля с обеспечивающими системами, удовлетворяющего основным требованиям на сегодняшний день.

DEVELOPMENT OF THE SELF-COOLED Li—Li BLANKET TEST MODULE FOR ITER AND ITS EXTERNAL LIQUID METAL SYSTEMS. V.A. EVTIKHIN, I.E. LYUBLINSKI, A.V. VERTKOV, A.N. CHUMANOV, Yu.V. BOBKOV, V.N. SHPOLIANSKIY, N.M. AFANASIEV, N.I. EZHOV. At present the lithium cooled tritium breeding blanket concept for demonstration fusion reactor is thought to be one of the most efficient and worked out in terms of technology. Li—Li self-cooled module for this concept test on ITER are being developed in the Russia and USA. The basic principles and approaches to module design, its liquid metal and auxiliary system development are briefly presented in the paper. Neutron-physical, thermo-physical analyses, design work and schematic development conducted with regard to the concept forming and ITER design evolution made it possible to develop an original design concept of lithium module with support systems which would satisfy the present requirements.

**ВВЕДЕНИЕ**

При выработке концепции, а затем при работе над проектом термоядерного реактора ИТЭР и его современного варианта как неотъемлемая задача рассматривалась разработка испытательного модуля blankets — прототипа blankets демонстрационного энергетического реактора следующего поколения [1—4]. В таком модуле в максимальной степени должны пройти экспериментальную отработку в процессе реализации технологической фазы работы ИТЭР все основные материаловедческие, физические и технические принципы, которые должны послужить базой для разработки и создания тритийвоспроизводящего blankets энергетического термоядерного реактора.

Из существующих концепций тритийвоспроизводящего blankets (с твердым и жидким бридером) авторы считают наиболее перспективной и технологически продвинутой концепцию жидкометаллического самоохлаждаемого ванадий-литиевого blankets [5, 6].

Основные принципы разработки конструкции литиевого самоохлаждаемого модуля были заложены авторами еще в 1989 г. и в последующем конкретизировались и развивались [6—11]. Аналогичные подходы рассматриваются и в других проектах [12]. В настоящей работе представлены результаты расчетных, проектно-

конструкторских разработок и экспериментальных исследований, результатом которых явилось предложение по конструкции, выбору материалов и схемных решений испытательного модуля и его жидкометаллических систем.

## РАЗРАБОТКА ВАРИАНТА МОДУЛЯ ДЛЯ РЕАКТОРА ИТЭР

**Исходные данные и основные принципы разработки базового жидкометаллического литиевого модуля бланкета термоядерного реактора.** При разработке базового варианта модуля для реактора ИТЭР принимались следующие основополагающие положения и принципы:

- тритийвоспроизводящий материал и теплоноситель модуля — литий природного изотопного состава;
- конструкционный материал — ванадиевый сплав  $V-4Ti-4Cr$  ( $V-10Ti-5Cr$ );
- конструкция модуля двухзонная: первая зона замедления, размножения нейтронов и воспроизводства трития, вторая зона защитная;
- используемые в модуле бланкета материалы должны в максимальной степени удовлетворять критериям малоактивируемости, быть термически и радиационно стойкими;
- состав и параметры вспомогательных и обеспечивающих систем модуля должны быть согласованы с технологическими и обслуживающими системами ИТЭР;
- для обеспечения высокой надежности и безопасности литиевого модуля в его конструкции должна быть предусмотрена многозонная система защиты, исключающая утечки трития, взаимодействие лития с водой, предусмотрены необходимые системы безопасности; литиевый модуль должен удовлетворять тем же требованиям безопасности, что и основные внутрикорпусные элементы ИТЭР.

В состав разрабатываемого модуля должны входить:

- модуль, устанавливаемый в экваториальный порт реактора;
- жидкометаллическая литиевая система;
- системы, обеспечивающие работу жидкометаллического контура (заправка лития, слив, очистка, пробоотбор, подача газа, сброс тепла в систему преобразования, контроль, управление);
- системы, обеспечивающие работу модуля, электропитания, диагностики, безопасности, контроля, управления.

Литиевый модуль должен иметь внешние (внекамерные) системы с устройствами регулирования их параметров:

- жидкометаллическую;
- газовакуумную;
- систему мониторинга жидкого лития по металлическим, неметаллическим примесям, содержанию трития;
- систему очистки и регулирования химического состава жидкого лития;
- систему извлечения трития из лития.

При расчетных и конструкторских проработках в качестве исходных параметров и технических требований взяты следующие:

Максимальные геометрические параметры модуля, м:	
высота ...	2,6
ширина ...	1,8
глубина ...	0,60—0,67
Нейтронная нагрузка, МВт/м <sup>2</sup> ...	≤1,2
Коэффициент воспроизводства трития ...	≥1,05
Тепловая нагрузка на первую стенку, МВт/м <sup>2</sup> ...	0,3—0,5
Интегральное тепловыделение в модуле, МВт ...	3—5
Режим работы импульсный, с:	
рабочий режим ...	1000
пауза ...	≥1000—1500
Флюенс нейтронов на катушках магнитного поля, н/см <sup>2</sup> ...	≤2·10 <sup>18</sup>
Доза, поглощенная изоляцией магнитов тороидального поля, Гр ...	≤1·10 <sup>7</sup>
Параметры литиевой системы:	
Максимальный расход жидкого лития, м <sup>3</sup> /с ...	≤0,05
Объем лития в модуле и внешних системах, м <sup>3</sup> ...	≤1
Температура конструкционного материала, °С ...	≤700
Температура лития, °С ...	
на входе в модуль ...	300—400
на выходе из модуля ...	500—650
Максимальное давление в литиевом тракте, МПа ...	1,0
Концентрация трития в литии, % по массе ...	<0,001
Ресурс в режиме работы реактора, лет ...	≥5

**Нейтронно-физический анализ.** *Нейтронно-физический подход к выбору материалов модуля blankets.* Бланкет термоядерного реактора предназначен для выполнения следующих основных функций: преобразование энергии нейтронов и  $\gamma$ -квантов в тепловую энергию; воспроизводство трития; радиационная защита магнитной системы. Для такого многоцелевого назначения необходим подбор материалов, исходя из их физико-химических, нейтронно-физических и механических свойств, устойчивости к радиационному повреждению, совместимости. Во многом характеристики модуля зависят от выбора тритийвоспроизводящего материала и размножителя нейтронов.

Воспроизводство трития осуществляется при взаимодействии изотопов лития с нейтронами по реакциям  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{T}$  и  ${}^7\text{Li}(n, n'\alpha){}^3\text{T}$ . Применение жидкого лития в качестве тритийвоспроизводящего материала наиболее эффективно. Бесконечная литиевая среда с естественным содержанием изотопов обеспечивает коэффициент наработки трития  $k_T \approx 1,9$  (для сравнения эта характеристика для эвтектики Pb—17Li составляет 1,5; для флайба LiF—BeF<sub>2</sub> — 1,05; для оксида лития Li<sub>2</sub>O — 1,4; для керамики LiAlO<sub>2</sub> — 0,8) [13]. Поэтому в литиевом blankets достижимы значения  $k_T$  больше единицы и с точки зрения скорости воспроизводства трития наилучшим blanketsным материалом является металлический литий. Высокое значение коэффициента наработки трития на этом материале позволяет сделать зону воспроизводства достаточно компактной, а при использовании размножителей нейтронов количество жидкого металла в blankets реактора-токамака может уже определяться другими критериями, например, теплогидравлическими или электродинамическими.

Размножение нейтронов в blankets происходит при взаимодействии нейтронов высоких энергий с ядрами вещества в результате реакций  $(n, 2n)$ , а также при деле-

нии. Использование делящихся материалов из рассмотрения исключалось, и поэтому рассматриваются элементы, обладающие низким порогом и большим сечением реакций ( $n, 2n$ ) и ( $n, 3n$ ).

Наилучший размножитель нейтронов — бериллий. Он отличается от всех других материалов низкой пороговой энергией реакции ( $n, 2n$ ), равной  $\sim 2,0$  МэВ, и относительно высоким сечением этой реакции  $\sim 0,55 \cdot 10^{-28}$  м<sup>2</sup>. Низкий энергетический порог допускает вероятность реакции ( $n, 2n$ ) на вторичных нейтронах. Кроме того, бериллий характеризуется хорошими замедляющими свойствами, что приводит к возрастанию скорости наработки трития на <sup>6</sup>Li, а также малым паразитным захватом нейтронов. Отмечая высокие размножающие и замедляющие свойства бериллия, не следует забывать и его высокую стоимость, токсичность, высокую скорость радиационных повреждений и образование гелия, радиационное распухание.

Достаточно заметный вклад в размножение нейтронов может внести целый ряд средних и тяжелых элементов. Эти элементы имеют высокое сечение реакции ( $n, 2n$ )  $\sim 2 \cdot 10^{-28}$  м<sup>2</sup>, но одновременно и высокий порог реакции  $\sim 10$  МэВ, поэтому размножение нейтронов на них будет проявляться только в высокоэнергетических нейтронных потоках, например в первой стенке. Следовательно, применение в качестве конструкционного материала в первой стенке ванадиевых сплавов положительно повлияет на нейтронный баланс blankets.

В качестве наиболее эффективного материала защиты, обладающего свойствами малоактивируемого материала, рассматривались вольфрам и карбид вольфрама WC.

При разработке базового варианта модуля blankets в качестве замедлителя и размножителя нейтронов выбран бериллий, в качестве основного материала зоны защиты модуля blankets — WC.

*Выбор материального состава модуля.* Конструкция базового модуля и его материальный состав должны обеспечивать выполнение заданных параметров и, в первую очередь, обеспечить необходимый уровень воспроизводства трития и радиационную нагрузку на магнитную систему при фиксированной толщине модуля. При этом конструкция модуля должна быть проста и технологична, объем лития в модуле и скорости его течения в каналах охлаждения — минимальны. Оптимальной с точки зрения эффективности воспроизводства трития в blankets являлась бы гомогенная смесь бериллия и лития, что могло бы быть реализовано при использовании пористого бериллия, но в реальной конструктивной схеме посчитали оптимальным разделить бериллий зоны воспроизводства на слои, окруженные литиевыми теплопроводами.

Исходя из изложенных соображений для проведения нейтронно-физического анализа, была выбрана расчетная схема, представленная в табл. 1, которой соответствует конструктивная схема модуля, представленная на рис. 1.

Внутренний радиус первой стенки принимался равным 3000 мм, полная толщина blankets фиксирована и равна 600 мм. Последняя зона имитировала магнитную систему реактора. При расчетах варьировалась толщина бериллиевых блоков зоны воспроизводства, материал и толщина блоков зоны защиты, толщина литиевых теплопроводов системы теплоотвода.

Т а б л и ц а 1. Расчетная схема литиевого модуля

Но- мер зоны	Толщи- на зоны, мм	Состав	Но- мер зоны	Толщи- на зоны, мм	Состав
1	3000	Плазма — источник нейтронов	12	23	Конструкционный материал — 100% V
2	56	Первая стенка (четыре варианта)	13	*	Теплоноситель — 100% природного Li
3	10	Конструкционный материал — 100% V	14	*	Защита — 100% W или WC
4	5	Вакуумный зазор	15	*	Теплоноситель — 100% природного Li
5	16	Конструкционный материал — 100% V	16	4	Конструкционный материал — 100% V
6	*	Теплоноситель — 100% природного Li	17	*	Защита — 100% W или WC
7	*	Замедлитель — 100% Be	18	*	Теплоноситель — 100% природного Li
8	*	Теплоноситель — 100% природного Li	19	24	Конструкционный материал — 100% V
9	4	Конструкционный материал — 100% V	20	3	Вакуумный зазор
10	*	Замедлитель — 100% Be	21	10	Конструкционный материал — 100% X18H10T
11	*	Теплоноситель — 100% природного Li	22	10	Магнитная система

\* Варьировалась.

Вариантные нейтронно-физические расчеты проводились в одномерной цилиндрической геометрии по программе ANISN-W\*. Программа решает стационарное одномерное уравнение переноса нейтронов и  $\gamma$ -квантов методом дискретных ординат в плоской, цилиндрической или сферической геометрии. Определялись следующие параметры:

—  $q_v(r)$  — локальная плотность тепловыделения в расчете на единицу объема;

—  $k_T$  — коэффициент воспроизводства трития, равный числу ядер трития, образующихся в литийсодержащем бланкете в расчете на один термоядерный нейтрон, поступивший из плазмы в бланкет;

—  $M = E/E_n$  — коэффициент умножения энергии в бланкете, равный отношению полной энергии  $E$ , МэВ, выделяющейся в бланкете в расчете на один термоядерный нейтрон, к энергии термоядерного нейтрона ( $E_n = 14,1$  МэВ);

— поглощенная доза в изоляции и композитном материале магнитной системы;

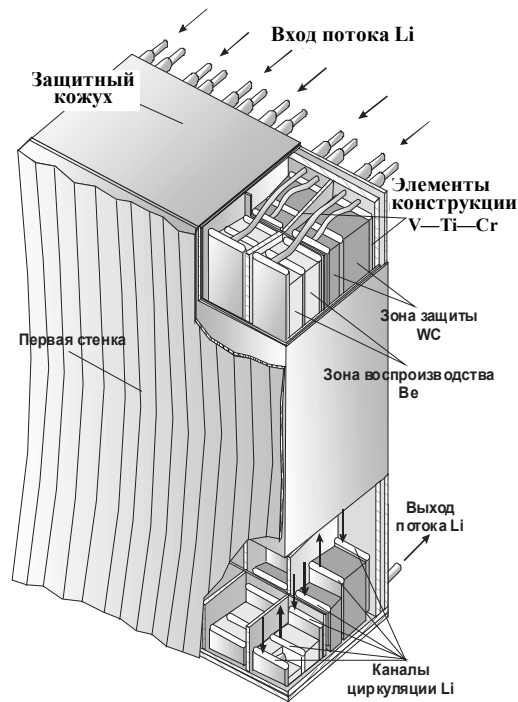


Рис. 1. Конструктивная схема модуля

\* В расчетах принимал участие Н.В. Якутин.

— флюенс нейтронов, скорость накопления атомов водорода и гелия в материалах в результате реакций ( $n, p$ ), ( $n, \alpha$ ) и др., изменение изотопного состава.

Источником нейтронов служил моноэнергетический объемный источник 14-МэВных нейтронов. Расчеты проводились при величине нейтронной нагрузки на первую стенку 1,2 МВт/м<sup>2</sup>. Длительность горения плазмы — 10<sup>3</sup> с, число импульсов — 10<sup>4</sup>.

**Зона воспроизводства.** Для определения  $k_T$  были проведены варианты расчеты с различными толщинами бериллиевых блоков. Их целью было получить  $k_T \approx 1,05$ —1,2. Результаты вариантов расчетов представлены в табл. 2. По горизонтали отложены размеры первого бериллиевого блока, по вертикали — второго. В каждом прямоугольнике верхнее число обозначает энерговыделение в бланкете на термоядерный нейтрон (МэВ/тян), второе —  $k_T$ .

Т а б л и ц а 2. Параметры бланкета в зависимости от толщины бериллиевых блоков

$L$ , мм	1(1-й)	10	20	30	40	50	60	70	80
1	17,2	18,9	20,7	22,2	23,3	24,2	<b>24,8</b>	25,2	25,4
(2-й)	0,50	0,56	0,67	0,76	0,85	0,95	<b>1,05</b>	1,13	1,21
10	18,9	20,4	21,9	23,1	24,0	24,6	<b>25,1</b>	25,3	25,4
	0,56	0,65	0,75	0,85	0,94	1,03	<b>1,12</b>	1,21	1,28
20	20,7	22,0	23,3	24,2	24,9	<b>25,3</b>	25,5	25,6	25,5
	0,65	0,74	0,84	0,93	1,02	<b>1,11</b>	1,19	1,27	1,34
30	22,5	23,6	24,5	25,2	<b>25,6</b>	25,8	25,9	25,9	25,7
	0,74	0,83	0,92	1,01	<b>1,10</b>	1,18	1,26	1,33	1,40
40	24,0	24,8	25,5	<b>25,9</b>	26,2	26,2	26,2	26,0	25,8
	0,82	0,91	1,0	<b>1,09</b>	1,17	1,25	1,32	1,39	1,45
50	25,2	25,7	<b>26,2</b>	26,4	26,5	26,4	26,3	26,0	25,8
	0,91	0,99	<b>1,07</b>	1,16	1,34	1,31	1,38	1,44	1,50
60	26,0	<b>26,4</b>	26,6	26,7	26,6	26,5	26,2	25,9	25,6
	0,98	<b>1,06</b>	1,14	1,22	1,30	1,37	1,43	1,49	1,54
70	<b>26,5</b>	26,7	26,8	26,8	26,6	26,4	26,1	25,7	25,4
	<b>1,06</b>	1,13	1,21	1,29	1,36	1,42	1,48	1,53	1,58
80	26,8	26,8	26,8	26,7	26,4	26,2	25,8	25,5	25,1
	1,13	1,2	1,27	1,34	1,41	1,47	1,52	1,57	1,61

Анализ результатов расчетов показывает (см. табл. 2), что параметры бланкета, главным образом, зависят от суммарной толщины бериллия и в слабой степени от размеров самих блоков. Скорости реакций ( $n, 2n$ ) и наработки трития растут с увеличением толщины блоков бериллия. Уменьшение полной толщины блоков бериллия приводит к уменьшению полного энерговыделения в первой стенке, бериллиевых блоках и теплоносителе из-за ужесточения спектра нейтронов. Энерговыделение в конструкционных материалах (ванадий), напротив, увеличивается из-за приближения их к первой стенке, в область высоких нейтронных потоков. Наличие максимума в энерговыделении связано с вольфрамовыми блоками зоны защиты, на которые влияют два фактора при укорачивании бериллиевых слоев: во-первых, уменьшение потока тепловых нейтронов, которое ведет к спаду энерговыделения; во-вторых, сдвиг вольфрама в область более высоких нейтронных потоков, который приводит к подъему энерговыделения.

**Зона защиты.** Для определения влияния состава и толщины вольфрамовых блоков на важнейшие функционалы бланкета проведены вариантные расчеты, в которых в качестве материала блоков использовался вольфрам или карбид вольфрама.

Показано, что полная замена вольфрама на карбид вольфрама приводит к тому, что, во-первых, флюенс быстрых нейтронов и всех нейтронов уменьшается в достаточной степени, что является следствием эффективного замедления быстрых нейтронов, соответственно уменьшаются и значения поглощенной дозы в изоляции и композитной матрице, а также тепловыделение в композитной матрице; во-вторых, за счет уменьшения содержания вольфрама флюенс фотонов возрастает; в-третьих, незначительно повышается энерговыделение в бланкете; в-четвертых, коэффициент наработки трития незначительно увеличивается за счет лития, прилегающего к вольфрамовым блокам.

Из проведенного анализа следует, что для выбора оптимального состава и толщин блоков зоны защиты необходимо четко определить целевую функцию оптимизации, так как минимумы различных функционалов не совпадают. Исходя из этого, авторами для дальнейших проработок в качестве защитного материала был выбран карбид вольфрама с толщиной блоков 90 и 221 мм.

***Зависимость параметров бланкета от толщины литиевых теплопроводов.***

Для определения влияния толщины литиевых каналов на параметры бланкета проведены вариантные расчеты с варьированием размеров литиевых зон и бериллиевых блоков.

Размеры всех зон с литием изменялись одновременно от 10 до 32 мм. Для каждого из этих вариантов рассчитывались коэффициенты наработки трития для бланкетов с различной толщиной бериллиевых блоков (от 20 до 50 мм). Суммарная толщина бланкета за счет второго вольфрамового блока защиты сохранялась постоянной и равнялась 600 мм.

Как было показано при оптимизации количества бериллия, интегральные параметры бланкета зависят от суммарной толщины бериллия и в слабой степени от толщин самих блоков.

При варьировании толщины литиевых каналов не получено. Расчеты показали, что наработка трития с увеличением количества лития возрастает. Увеличиваются поглощенная доза и тепловыделение в композитной матрице, а также флюенсы нейтронов и фотонов по причине уменьшения толщины вольфрамовых блоков защиты.

***Влияние первой стенки на параметры бланкета.*** Выбранный в качестве основного расчетный вариант модуля с толщиной литиевых каналов 20 мм, бериллиевых — 30 и 40 мм и блоков защиты — 90 и 221 мм был просчитан с четырьмя различными вариантами первой стенки:

—I вариант представлял собой капиллярно-пористую стенку толщиной 5 мм с составом 50% ванадия и 50% лития и слой лития толщиной 5 мм;

—II вариант — два ряда ванадиевых труб с литием общей толщиной 48 мм со средним составом 11% лития и 42% ванадия;

—III вариант — три ряда ванадиевых труб с литием общей толщиной 56 мм со средним составом 15% лития и 57% ванадия;

— IV вариант первой стенки был аналогом первой стенки ИТЭР (1 см бериллия + 2 см слоя меди с одним рядом стальных труб 10×1 мм, идущих с шагом 2 см; в трубах — водный теплоноситель).

Параметры blankets с различными вариантами конструкции первой стенки:

	I вар.	II вар.	III вар.	IV вар.
Энерговыделение, МэВ/тян ...	23,83	23,13	22,57	24,90
Коэффициент наработки трития, $k_T$ ...	1,136	1,168	1,190	0,976
Число реакций ( $n$ , $2n$ ) ...	0,774	0,700	0,640	0,791
Поглощенная доза, $\times 10^7$ , Гр (в изоляции) ...	2,95	2,61	2,34	1,95
Флюенс всех нейтронов, $\times 10^{18}$ , н/см <sup>2</sup> ...	37,9	33,7	30,2	25,4

**Результаты расчета blankets.** Окончательно в качестве основного был выбран вариант модуля blankets с толщинами литиевых каналов охлаждения 20 мм, бериллиевых — 30 и 40 мм и блоков защиты WC — 90 и 221 мм; первая стенка — III вариант.

Нейтронно-физические параметры модуля blankets:

Коэффициент умножения энергии $M$ ...	1,60
Энерговыделение в blankets, МэВ/тян ...	22,57
в том числе:	
в первой стенке ...	4,27
в бериллии ...	2,50
в карбиде вольфрама ...	6,90
в литиевом теплоносителе ...	7,56
в конструкционном материале ...	4,13
Коэффициент наработки трития $k_T$ ...	1,190

**Радиационная нагрузка на магнитную систему.** Магнитную систему (МС) моделировали как систему — проводник, композитная матрица (60% SiO<sub>2</sub>, 20% CaO, 10% В<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и изоляция (Н<sub>20</sub>С<sub>10</sub>О<sub>10</sub>NF). Для выбранного варианта модуля определены полные флюенсы нейтронов, доза, поглощенная в изоляции катушек и композитной матрице, а также плотность тепловыделения в композитной матрице.

Радиационное воздействие на МС (за время 10<sup>7</sup> с):

Поглощенная доза, $\times 10^7$ , Гр (в изоляции) ...	2,35
Поглощенная доза, $\times 10^7$ , Гр (в композитной матрице) ...	0,98
Тепловыделение в композитной матрице, $\times 10^{-3}$ , Вт/см <sup>3</sup> ...	1,97
Флюенс быстрых нейтронов, $\times 10^{17}$ , н/см <sup>2</sup> ...	12,0
Флюенс всех нейтронов, $\times 10^{17}$ , н/см <sup>2</sup> ...	30,3

Полученные характеристики находятся на приемлемом уровне.

Выполненный анализ позволил приступить к детальной разработке конструкции модуля и определению его теплофизических и гидравлических характеристик.

**Обоснование выбора материалов модуля.** Помимо необходимых нейтронно-физических характеристик материалы литиевого модуля как прототипа blankets энергетического реактора должны обладать целым комплексом свойств.

Все материалы модуля — сплавы V—Ti—Cr, Be, WC, В<sub>4</sub>C, Li в достаточной степени соответствуют классу так называемых малоактивируемых материалов [6], и имеются принципиальные технологические подходы к обеспечению снижения уровня их долгоживущей наведенной активности. Лучшим конструкционным материалом с этой точки зрения мог бы служить карбид кремния SiC, неприменимый, в частности, из-за несовместимости с жидким литием.



Сплавы ванадия системы V—Ti—Cr являются общепризнанными кандидатами как конструкционные материалы демонстрационного термоядерного реактора, обладающие необходимым комплексом механических свойств, радиационной и коррозионной стойкостью [14, 15]. Переход от сплава V—4Ti—4Cr к сплаву V—10Ti—5Cr позволит повысить при необходимости предельные рабочие температуры конструкций blankets с уровня 650—700 °C до 750 °C и выше [16].

Все материалы модуля должны быть совместимы с жидким литием. Сплавы V—Ti—Cr, Be, WC совместимы с литием до температур ~700 °C [6, 9], однако некоторые дополнительные исследования могут потребоваться.

Особое значение имеет выбор материала и технологии нанесения электроизоляционных покрытий для литевых теплопроводов модуля. Из двух основных кандидатных материалов — нитрида алюминия AlN и оксида кальция CaO [6, 17] как основной рассматривается AlN [18, 19]. Результаты экспериментальных исследований такого типа покрытия и достигнутые рабочие характеристики могут быть представлены в следующих выпусках настоящего сборника.

**Конструктивная схема модуля.** Для дальнейшей детальной проработки модуля была взята схема с введением дополнительного блока бериллия в зоне воспроизводства и увеличением сечения литевых теплопроводов и некоторым увеличением толщины модуля.

Модуль размещается в опорной раме экваториального порта ИТЭР и занимает половину площади порта. Принципиальная схема модуля представлена на рис. 1. Корпус модуля представляет собой цельносварную коробчатую конструкцию. Внутренняя полость каждой секции модуля разделена (по глубине) перегородкой на две зоны — воспроизводства и защитную. В каждой зоне между бериллиевыми и защитными блоками размещены по два одинаковых для данной зоны теплопровода прямоугольного сечения, по которым прокачивается жидкий литий. Каждый теплопровод состоит из трех вертикальных каналов, соединенных между собой последовательно. Второй (со стороны плазмы) канал теплопровода зоны воспроизводства разделен на два параллельных канала (с сохранением общего поперечного сечения) для улучшения теплоотвода от бериллиевых блоков, размещенных между теплопроводами.

Размер (по толщине) поперечного сечения теплопроводов зоны воспроизводства вдвое превышает такой же размер поперечного сечения теплопроводов защитной зоны. Это сделано (наряду с увеличением толщины зоны бериллия по сравнению с вариантом для предварительных расчетных оценок) для получения увеличенного значения  $k_T$  (по сравнению с оценкой для первоначального варианта).

Прокачка лития в зоне воспроизводства и в зоне защиты осуществляется раздельно. Подвод лития к каждому теплопроводу производится в нижней его части, начиная с канала, обращенного к первой стенке. Отвод лития производится в верхней части теплопровода от канала, наиболее удаленного от первой стенки.

Такая система охлаждения обеспечивает при низком гидравлическом сопротивлении трактов выравнивание температуры по всей конструкции модуля, снижая уровень термических напряжений в его конструкции.

Каждый теплопровод имеет дренажные и сливные трубки диаметром 20 мм, позволяющие осуществлять заполнение теплопровода жидким литием и его пол-

ный слив. Эти трубки выполнены с учетом компенсации тепловых деформаций теплопроводов и соединены с трубками диаметром 70 мм, соединяющими каждый теплопровод с внешним циркуляционным литиевым контуром. Эти подводящие и отводящие литий трубы герметично выведены через заднюю стенку модуля.

Между теплопроводами в каждой секции расположены по два ряда блоков из карбида вольфрама (в зоне защиты) и по три ряда блоков из бериллия (в зоне воспроизводства). Конструктивно все внутренние элементы модуля выполнены таким образом, что исключается прямой прострел нейтронов и обеспечивается тем самым защитная функция модуля.

Для обеспечения теплового контакта между теплопроводами, элементами внутренней полости модуля и его корпусными деталями все зазоры заполняются жидким литием через отдельные трубки диаметром 20 мм, сваренные в стенку корпуса. Это позволит дополнительно выравнять температуры между внутренними элементами модуля и его корпусом, а также организовать дополнительный малый контур циркуляции лития в модуле, отдельный от основного теплоотводящего литиевого контура.

Надежность конструкции и безопасность эксплуатации модуля обеспечиваются, во-первых, наличием двух независимых систем циркуляции лития в модуле. При этом корпус модуля не нагружен избыточным давлением лития основного контура, а в случае протечки лития из теплопровода во внутреннюю полость возможно быстро обнаружить и локализовать течь без выхода лития за пределы корпуса модуля. Во-вторых, система охлаждения разделена на независимые в пределах модуля системы циркуляции лития, что позволяет ограничить объемы лития, непосредственно соединенные с местом возможной протечки.

Основные геометрические характеристики базового варианта модуля:

Габаритные размеры, мм:		
высота ...		2230
ширина ...		520
глубина ...		665
Зона размножения:		
толщина блоков Ве, мм ...	$60 + 45 + 45 =$	150
поперечное сечение теплопровода, мм <sup>2</sup> ...		9480
Зона защиты:		
толщина блоков WC, мм ...	$90 + 150 =$	240
поперечное сечение теплопровода, мм <sup>2</sup> ...		4740
Средняя величина зазоров между элементами модуля, мм ...		2
Диаметр основных трубопроводов, мм ...		70
Полный объем жидкого лития в модуле, л ...		~ 230

На внешней стенке экспериментального модуля, обращенной к плазме, располагается первая стенка. Она может быть выполнена в нескольких, рассмотренных ранее вариантах (см., например, [12]). Наиболее вероятным может являться вариант конструкции первой стенки, аналогичный типовой конструкции первой стенки основного blankets ИТЭР с гелиевым охлаждением.

Возможен вариант первой стенки в виде ряда труб из ванадиевого сплава, размещенных вплотную друг к другу на внешней стенке модуля и охлаждаемых гелием. На трубы со стороны плазмы нанесено покрытие из бериллия.

Перспективным для литиевого экспериментального модуля является вариант конструкции первой стенки с литиевой капиллярно-пористой системой защиты от воздействия плазмы как прототипом первой стенки литий-ванадиевого бланкета варианта проекта будущего демонстрационного реактора.

**Определение нейтронно-физических характеристик модуля.** *Расчетная программа, модель, константы.* Для базового варианта экспериментального модуля были проведены нейтронно-физические расчеты в трехмерном приближении\*. Все расчеты проведены по программе MCNP4B. Расчетная модель подготовлена на основе базовой модели ИТЭР для MNCP, которая описывает сектор  $18^\circ$  тора. Базовая модель содержит описание защитного бланкета, задней стенки, вакуумного корпуса, портов, катушек и других элементов реактора. В базовую модель внесены все конструктивные изменения ИТЭР до 1 марта 1998 г. В частности, в вакуумном корпусе используется борированная сталь. В данную модель встраивались детализированные модели элементов, подлежащих анализу.

Транспорт нейтронов рассчитывался с использованием констант библиотеки FENDL 1.1, подготовленной для температуры 293 К. Для воды и бериллия дополнительно использованы файлы, учитывающие особенности рассеяния нейтронов в области тепловых энергий, подготовленные из библиотеки ENDF/B-VI rev.4 модулем LEAPR программы NJOY-94.66.

Для расчетных исследований была подготовлена модель ИТЭР, содержащая экспериментальный модуль в экваториальном порте.

В модели литиевого модуля представлена его геометрия, материальный состав, включая трубы подвода и отвода лития. В данной модели модуля по сравнению с первоначальной полная толщина блоков бериллия была увеличена с 70 до 150 мм, толщина слоев лития в зоне воспроизводства увеличена суммарно с 60 до 120 мм.

*Характеристики облучения литиевого модуля в экваториальном порте.* Исходя из расчетных рекомендаций, разработана конструкция экспериментального модуля, которая содержит зону воспроизводства (слои ванадиевого сплава, жидкого лития и бериллия) и зону защиты (слои ванадиевого сплава, карбида вольфрама и жидкого лития). Модуль занимает 50% площади порта и разделен на два подмодуля.

Для расчетных исследований подготовлена модель ИТЭР, содержащая экспериментальный модуль в экваториальном порте. В модели модуля максимально представлено трехмерное геометрическое описание всех слоев, а также проходящие через модуль трубы подвода и отвода лития. Рассмотрено два варианта рамы, крепящей модуль в порту: длинная рама, стенки которой доходят до задней дверцы порта, и укороченная, стенки которой доходят только до внешней границы вакуумного корпуса. Длина стенок рамки влияет на радиационные условия в катушке тороидального поля реактора. Графическое отображение файла исходных данных представлено на рис. 2, 3.

Рассмотрены характеристики собственно экспериментального модуля — энерговыделение, наработка трития и радиационные характеристики в катушке тороидального поля на уровне порта. Все результаты нормированы на номинальную термоядерную мощность плазмы 1500 МВт.

---

\* Расчеты проведены в ФГУП НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалея под руководством А.В. Лопаткина.

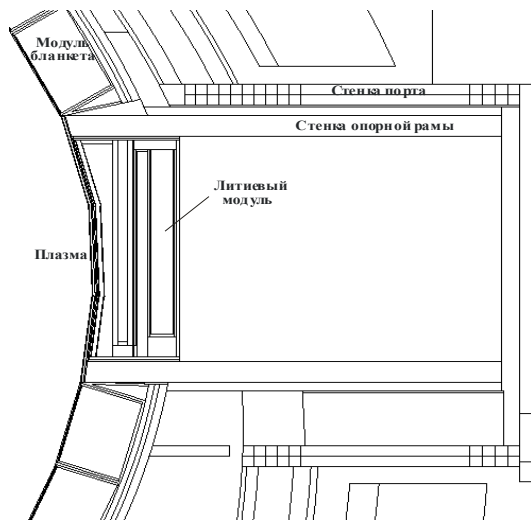


Рис. 2. MCNP-модель модуля — вертикальное поперечное сечение  
 Рис. 3 MCNP-модель модуля (длинная опорная рама) — горизонтальное поперечное сечение

**Экспериментальный модуль.** Полное энерговыделение в материалах модуля представлено в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Полное энерговыделение в материалах модуля

Материал	Ядерный нагрев, МВт
Литий	0,694
Ванадиевый сплав	0,177
Карбид вольфрама	0,201
Бериллий	0,525
Всего	1,597

Полное энерговыделение в модуле — 1,6 МВт, из них 43% выделяется в литии.

Рассчитаны также удельные энерговыделения в конструктивных элементах модуля для проведения детальных теплофизических расчетов.

В базовом варианте модуля коэффициент воспроизводства трития составил 0,8795. Далее были проведены варианты расчеты  $k_T$  для различных содержаний бериллия и лития в blanketе. Выбор толщин слоев материалов в экспериментальном модуле проводился исходя из желания иметь оптимальное воспроизводство трития в демонстрационном реакторе с разрабатываемым типом blanketа. При этом основным условием было использование в качестве тритийвоспроизводящего материала только лития с природным содержанием изотопов.

Для расчетов была подготовлена MCNP-модель, имитирующая 100%-ное покрытие плазменной камеры blanketом с неизменной структурой. Показано, что увеличение полной толщины бериллия с первоначальных 70 до 150 мм и толщины трех слоев лития в blanketе с 20 до 40 мм каждый обеспечивает для такого blanketа интегральную скорость наработки трития  $k_T=1,295$  на один рожденный DT-нейтрон в плазме. Имея такую величину  $k_T$  в идеальном blanketе, можно считать, что в реакторе данного типа с учетом снижения реальной доли покрытия плазменной камеры blanketом  $k_T$  не снизится до минимально приемлемого уровня 1,05.

Для оптимального варианта рассмотрен детальный вклад в  $k_T$ :  ${}^6\text{Li}$  — 1,152,  ${}^7\text{Li}$  — 0,132, Be — 0,0107. В качестве рабочего принят вариант с  $k_T=1,295$ .

Из результатов расчетов следует, что в модуле нарабатывается  $3,3 \cdot 10^{-6}$  г/с (0,032 Ки/с) трития при номинальном режиме горения плазмы. 89% трития образуется из изотопа литий-6, 10,2% — из изотопа литий-7 и 0,8% — из бериллия.

**Катушка тороидального поля.** Для катушки тороидального поля лимитируются максимальное энерговыделение в корпусе катушки и сердечнике, накопленная доза в изоляторе, радиационные повреждения и флюенс быстрых нейтронов в проводнике сердечника. Размещение модуля в порте не должно приводить к превышению заданных пределов при номинальной мощности плазмы и флюенсе DT-нейтронов на первую стенку соответствующей части бланкета  $3 \text{ МВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$ .

Рассчитаны поэлементные радиационные характеристики в катушке тороидального поля при размещении экспериментального модуля в порте. Интегральное энерговыделение в катушке составило 553,8 Вт. Радиационные характеристики для элементов катушки приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Радиационные характеристики для элементов катушки тороидального поля (для термоядерной мощности 1500 МВт и флюенса нейтронов  $3 \text{ МВт} \cdot \text{лет}/\text{м}^2$ )

Параметр	Расчетное значение		Предельное допустимое значение
	Длинная рама	Короткая рама	
Энерговыделение в сердечнике, мВт/см <sup>3</sup> ...	0,1	0,19	2
Энерговыделение в обмотке, мВт/см <sup>3</sup> ...	0,0042	0,025	1
Накопленная доза в изоляторе, Рад ...	$1,7 \cdot 10^8$	$3,3 \cdot 10^8$	$10^9$
Радиационное повреждение меди, сна ...	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$9,3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-3}$
Флюенс быстрых нейтронов в проводнике, $1/\text{см}^2$ ...	$4,8 \cdot 10^{17}$	$1,2 \cdot 10^{18}$	$10^{19}$

Для обоих вариантов крепящей рамки модуля (длинная и короткая) радиационные характеристики катушки не превышают заданных пределов. Полученные радиационные характеристики для катушки тороидального поля позволяют применить для крепления модуля в порте укороченную опорную раму.

Дополнительно к проведенным расчетам оценено влияние карбида бора, вводимого в карбид вольфрама на защитные функции модуля. Введение 1% В<sub>4</sub>С в карбид вольфрама приводит к изменениям нейтронного потока и энерговыделения на задней стенке разрабатываемого модуля (табл. 5).

Т а б л и ц а 5. Поток нейтронов на задней стенке модуля при введении 1% В<sub>4</sub>С в WC

Верхняя граница группы, МэВ	Изменение, %
$1 \cdot 10^{-6}$	-10,8
0,1	-21,9
6	-12,1
15,5	-11,6
Полный поток	-17,9

Полное энерговыделение падает на 15,08%. Таким образом, введение 1% карбида бора позволяет уменьшить толщину зоны карбида вольфрама на 10 мм при сохранении защитных характеристик модуля, т.е. является весьма эффективным.

**Результаты теплогидравлической оценки параметров модуля.** На основе результатов нейтронно-физических расчетов были проведены теплогидравлические расчеты. Исходя из распределения тепловыделения в модуле (рис. 4), определены расходы и скорости движения жидкого лития по коммуникациям модуля, оп-

ределены максимальные температуры жидкого лития и материалов элементов модуля. Результаты тепловых расчетов:

Суммарный расход Li, кг/с ...	1,92
в том числе:	
в зоне воспроизводства ...	1,5
в зоне защиты ...	0,42
Скорость Li, м/с:	
Зона воспроизводства:	
в подводящих трубках ...	0,403
в теплопроводах ...	0,164
Зона защиты:	
в подводящих трубках ...	0,113
в теплопроводах ...	0,092
Средняя температура Li, °C (вход/выход) ...	400/600
Максимальная температура материалов, °C:	
бериллий ...	675
карбид вольфрама ...	700
ванадиевый сплав ...	610

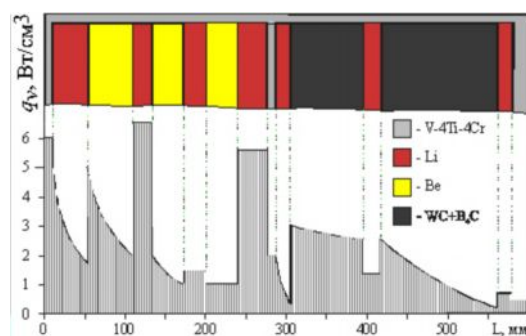


Рис. 4. Тепловыделение в модуле

Полученные значения тепловых характеристик находятся на приемлемом уровне для применяемых материалов и для жидкого лития как теплоносителя.

#### Оценка магнитогидравлических потерь в литиевых трактах модуля.

Конструкция модуля включает в себя две петли циркуляции теплоносителя. Оценку гидравлических потерь в трактах производили для скорости потока

лития 0,7 м/с, превышающей максимальную рассчитанную. При этом учитывалось, что на стенки трактов литиевых систем модуля из ванадиевого сплава нанесен слой самовосстанавливающегося электроизоляционного покрытия на основе нитрида алюминия. Свойства и толщина такого покрытия для расчетов брались на практически достигнутом уровне. Исходные данные для гидравлических расчетов:

Расход лития, м/с ...	0,75
Температура теплоносителя, °C	
в подводящем коллекторе ...	400
средняя по тракту ...	500
в отводящем коллекторе ...	600
Материал стенок тракта ...	V—4Ti—4Cr
Индукция магнитного поля, Тл ...	5
Толщина покрытия стенок, мкм ...	5
Электрическое сопротивление материала покрытия, Ом·м ...	50

Для вычисления коэффициентов гидравлического сопротивления использовались известные расчетные соотношения, при этом учитывали следующие виды потерь:

- концевые потери (потери, связанные с входом и выходом из магнитного поля);
- потери в подводящих и отводящих коллекторах круглого сечения;
- потери в тракте прямоугольного сечения;
- местные потери (повороты потока).

При расчетах предполагалось, что местные и концевые потери возрастают в изолированном канале по сравнению с непроводящим так же, как и в тракте.

В табл. 6 приведены результаты расчета.

Т а б л и ц а 6. Результаты расчетов гидравлических потерь

Потери	Гидравлические потери, $10^5$ Па
Концевые потери	4,17
Потери в подводящем и отводящем коллекторах	0,01
Потери в трактах	0,08
Местные потери	0,05
Суммарные потери	4,31

Как видно из табл. 6, более 90% потерь приходится на концевые эффекты. Это свидетельствует о необходимости увеличения сечения подводящих и отводящих коллекторов на границе входа/выхода теплоносителя в межобмоточное пространство магнитной системы. В целом МГД-потери находятся на уровне, который дает возможность применить электромагнитные насосы, разработанные промышленностью.

**Внешние технологические системы модуля.** В состав внешних технологических систем модуля входят подсистемы теплоотвода, извлечения трития, предварительного разогрева, вакуумной откачки, инертного газа. На рис. 5 представлена пневмогидравлическая функциональная схема перечисленных подсистем.

**Подсистема теплоотвода.** Подсистема теплоотвода состоит из первого литиевого контура, второго промежуточного контура (эвтектический сплав 78% К + 22% Na), третьего контура технической воды из системы охлаждающей воды ИТЭР.

Литиевый контур включает два электромагнитных насоса — рабочий и резервный, промежуточный теплообменник Li—Na—К, блок очистки, блок пробоотбора и введения технологических добавок, компенсатор давления, сливную (заправочную) емкость, запорную арматуру, трубопроводы, преобразователи температуры, давления, расхода, уровня, сигнализаторы течи.

Контур Na—К включает два электромагнитных насоса — рабочий и резервный, промежуточный теплообменник Li—Na—К, холодильник Na—К—вода (ХО), блок очистки, блок пробоотбора, компенсатор давления, сливную (заправочную) емкость, запорную арматуру, трубопроводы, преобразователи температуры, давления, расхода, уровня, сигнализаторы течи.

**Подсистема извлечения трития.** Извлечение трития из лития осуществляется методом неравновесной молекулярной дистилляции жидкого металла, разработанным в ФГУП ВНИИНМ им. А.А. Бочвара [20]. Подсистема извлечения трития размещена на байпасе литиевого ЖМК и состоит из литиевой петли, параллельной петле теплоотвода, и газовакуумной части. Литиевая байпасная петля включает аппарат извлечения трития (АИ), электромагнитный насос, управляющий подачей лития в АИ, сборник «очищенного» лития, электромагнитный насос, возвращающий литий в основной контур, запорно-регулирующую арматуру, преобразователи температуры, давления, расхода, уровня, сигнализаторы течи.

Газовакуумная часть включает высоковакуумные насосы для откачки гелия и трития из газового объема АИ, герметичные форвакуумные насосы, арматуру, тру-

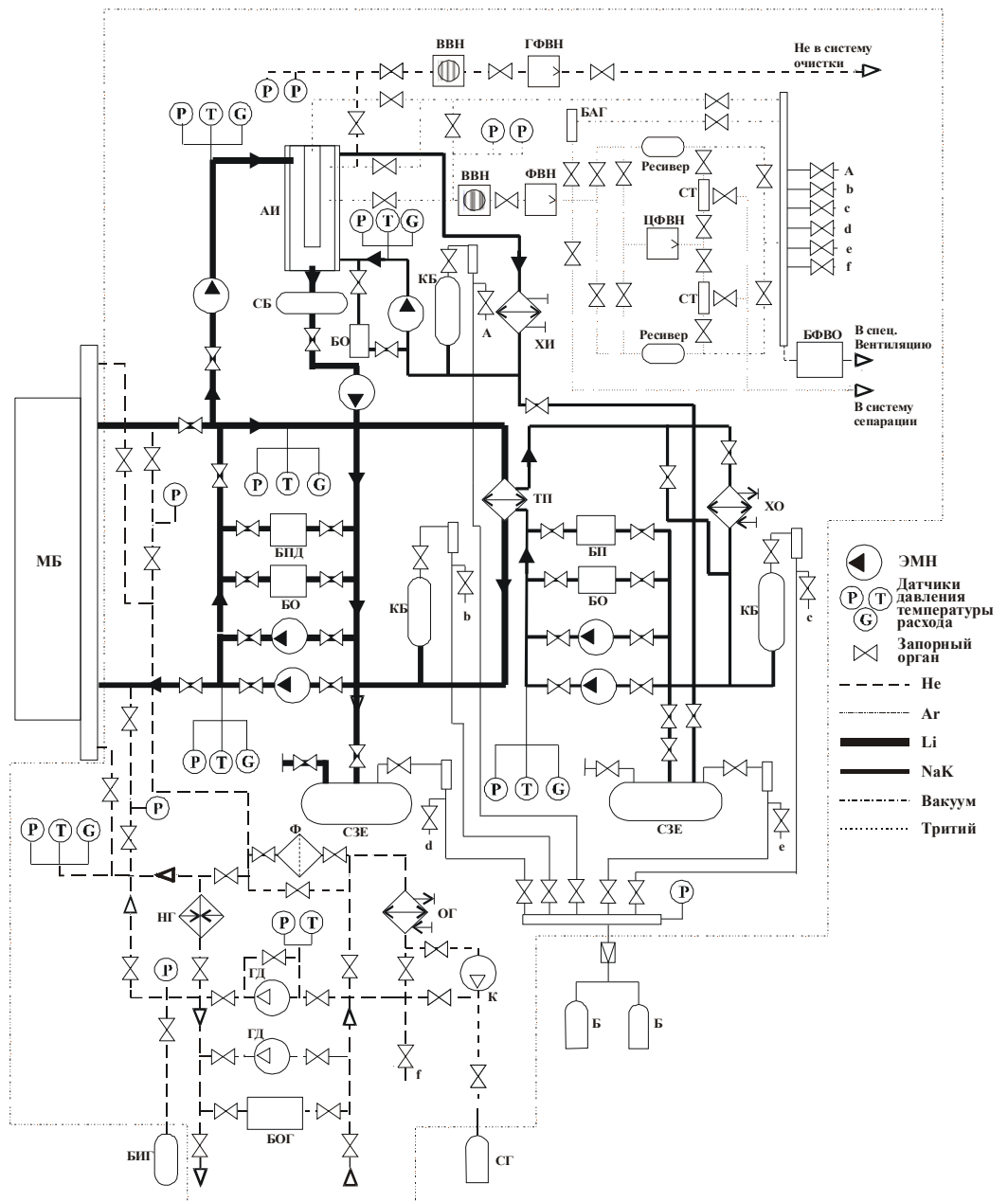


Рис. 5. Пневмогидравлическая функциональная схема внешних подсистем модуля: АИ — аппарат извлечения трития из лития; Б — баллон газовый; БАГ — блок анализа трития; БО — блок очистки; БОГ — блок очистки гелия; БП — блок пробоотбора; БПД — блок пробоотбора и введения технологических добавок в литий; БФВО — блок форвакуумной откачки; ВВН — высоковакуумный насос; ГД — газодувка; ГФВН — герметичный форвакуумный насос; ЕИГ — емкость исходного лития; К — компрессор; КБ — компенсатор давления; НГ — нагреватель гелия; ОГ — охладитель гелия; РД — редуктор; СБ — сборник; СГ — сборник гелия; СЗЕ — сливная/заправочная емкость; СТ — сборник трития; ТП — теплообменник промежуточный; Ф — фильтр; ФВН — форвакуумный насос; ЦФВН — циркуляционный форвакуумный насос; ХИ — холодильник аппарата извлечения трития; ХО — холодильник системы отвода тепла от модуля; МБ — модуль blankets; ЭМН — электромагнитный насос

бопроводы, преобразователи давления, а также при необходимости может включать оборудование для сбора и анализа трития, блок анализа трития, ресиверы, циркуляционный насос, геттерные сборники трития.



Кроме того, формально в подсистему извлечения трития входит отдельный жидкометаллический Na—K-контур для теплоотвода и поддержания заданной температуры на конденсаторе АИ. Этот контур включает холодильник Na—K—вода, электромагнитный насос, компенсатор давления, блок очистки, запорную арматуру, трубопроводы, преобразователи температуры, давления, расхода, уровня, сигнализаторы течи.

**Подсистема охлаждения первой стенки и предварительного разогрева модуля.** Подсистема охлаждения первой стенки и предварительного разогрева состоит из двух петель, одна из которых должна обеспечивать подачу гелия для отвода тепла от первой стенки. Она работает в постоянном режиме при работе реактора на номинальной мощности.

Вторая петля должна обеспечивать предварительный (до заправки лития) разогрев литиевых трактов модуля до температуры ~ 300—350 °С с помощью прокачки горячего гелия. Обе гелиевые петли имеют общую часть, включающую две газодувки, рабочую и резервную, холодильник гелий—вода, электронагреватель гелия, механический фильтр, блок подготовки и очистки гелия, емкость с исходным гелием, емкость с отработавшим «грязным» гелием, запорную арматуру, трубопроводы, преобразователи давления, температуры и расхода газа.

**Подсистема форвакуумной откачки.** Подсистема форвакуумной откачки включает блок форвакуумной откачки с форвакуумными насосами, азотными ловушками, арматурой, коллекторами и т.д. Форвакуумные насосы должны обеспечивать заданное разрежение в подсистемах теплоотвода, извлечения трития и гелиевых петлях при проведении технологических операций.

**Подсистема инертного газа.** Подсистема инертного газа аргона состоит из газовых баллонов, газовых коллекторов, трубопроводов, арматуры, преобразователей давления. Эта подсистема должна обеспечивать заполнение аргоном газовых объемов ЖМК, страховочных кожухов, поддержание заданных давлений и проведение технологических операций, а также снабжать инертным газом систему объемного пожаротушения в боксах ЖМК. Параметры системы теплоотвода модуля на номинальном режиме:

	1-й контур	2-й контур	3-й контур
Отводимая тепловая мощность, МВт ...	1,6	1,6	1,6
Теплоноситель ...	Li	NaK (78% K)	H <sub>2</sub> O
Температура на входе, °С ...	400	300	35
Температура на выходе, °С ...	600	500	55
Расход, кг/с ...	1,92	9,1	19,7
Давление на входе, МПа ...	≤ 1—0,5	~ 0,5	0,3—0,4
Концентрация трития, 10 <sup>-4</sup> ат. % ...	1	< 1	

Система извлечения трития состоит из аппарата извлечения трития, электромагнитных насосов подачи и отвода лития, холодильника Na—K—вода, а также контура Na—K охлаждения конденсатора аппарата. В зависимости от скорости наработки трития в экспериментальном модуле эта система может работать постоянно или периодически. Основные параметры системы извлечения трития для случая ее непрерывной работы:

Расход лития, г/с...	До 12
Концентрация трития, 10 <sup>-4</sup> ат. % на входе ...	1

на выходе ...	0,3
Температура испарения, °С ...	~ 700
Температура конденсации, °С ...	~ 450
Потребляемая мощность, кВт ...	До 300
Производительность по тритию, г/сут ...	До 0,3
Поток трития, л·Па/с ...	До 1,5
Поток гелия, л·Па/с ...	До 6,0

Система предварительного разогрева предусматривает возможность прокачки горячего гелия по литиевым трактам экспериментального модуля перед его заполнением жидким литием.

Состав основного оборудования внешних технологических систем представлен на функциональной пневмогидравлической схеме (см. рис. 5).

Общее количество жидких металлов, циркулирующих в номинальном режиме в экспериментальном модуле и во всех внешних контурах, составит: лития  $\leq 400$  л, натрий—калия  $\leq 480$  л.

**Размещение оборудования внешних систем модуля.** На рис. 6 представлены предложения по возможному компактному размещению технологических подсистем, обеспечивающих работу модуля в передвижном вагоне-транспортере, установленном в технологической галерее здания реактора на уровне размещения порта для модуля.

Внутренний объем транспортера предлагается разделить на несколько отсеков, отделенных друг от друга герметичными перегородками.

**Предварительный анализ вопросов безопасности при функционировании внешних систем модуля.** При разработке основного оборудования технологических подсистем модуля и принципов компоновки его в вагоне-транспортере в первую очередь учитывались требования, предъявляемые к жидкометаллическим системам на основе существующих норм и правил, в соответствии с которыми приняты следующие технические решения, направленные на обеспечение надежности и безопасности:

— внутренний объем транспортера разделен на несколько отсеков, отделенных друг от друга герметичными перегородками;

— все теплообменное оборудование и трубопроводы с жидким металлом заключены в страховочные кожухи, заполненные инертным газом и снабженные датчиками течи жидкого металла;

— отсеки транспортера с жидкометаллическими контурами оборудованы системами объемного пожаротушения, а также поддонами для локализации возгорания при возможной течи жидкого металла;

— внешняя система спецвентиляции обеспечивает во всех помещениях транспортера давление и состав (концентрацию трития) воздушной среды в соответствии с нормами радиационной безопасности;

— для предотвращения выделения трития в отсеки вагона страховочные кожухи трубопроводов и оборудования с жидким литием снабжены системой откачки и продувки;

— внутренние поверхности теплообменных труб промтеплообменника, холодильников и страховочных кожухов имеют специальное покрытие, уменьшающее выход трития из лития;

— жидкометаллические контуры снабжены холодными ловушками;

— давление в жидкометаллических контурах контролируется датчиками.

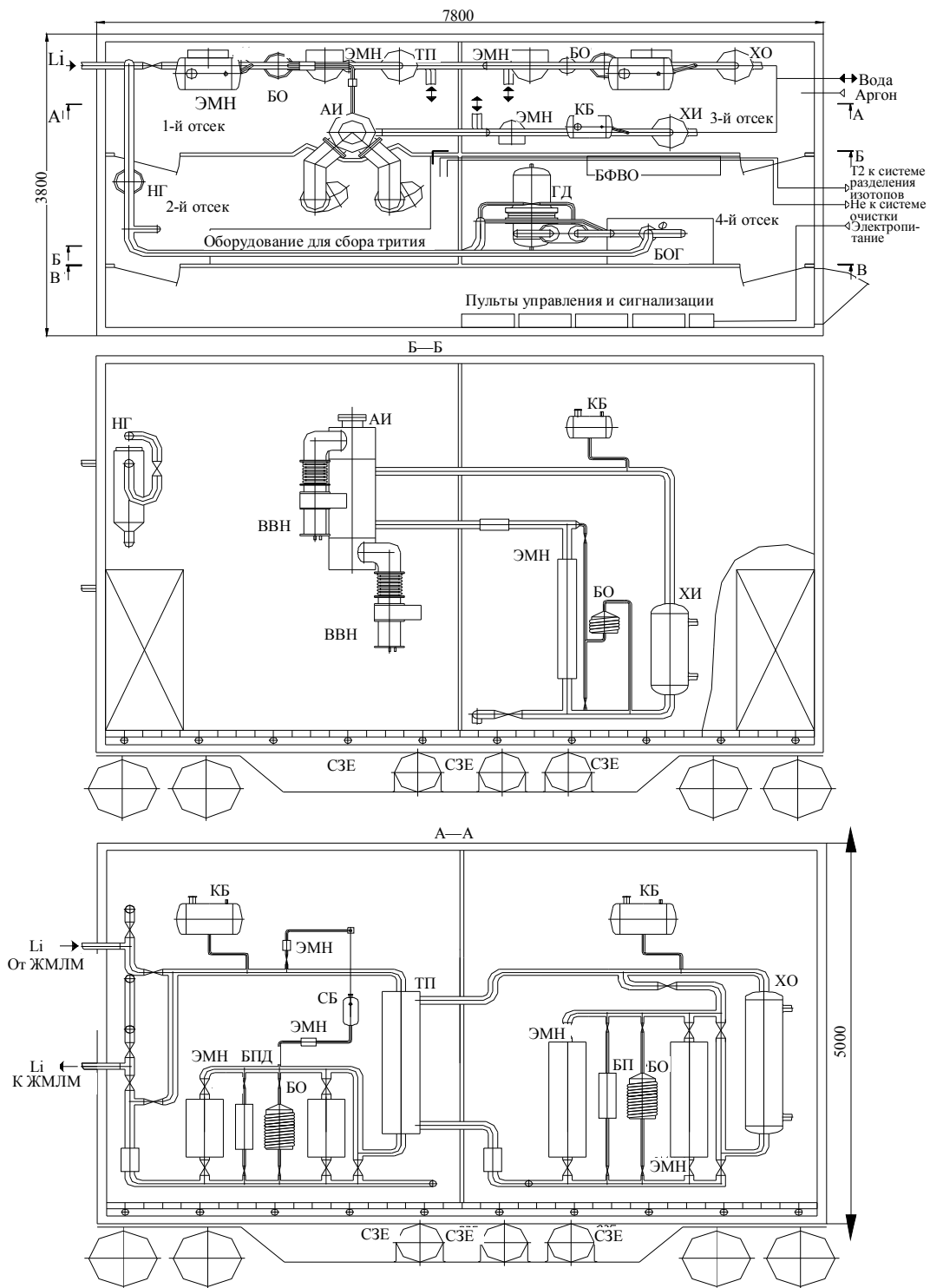


Рис. 6. Размещение технологических подсистем, обеспечивающих работу литиевого модуля, в передвижном вагоне-транспортере: ОГ — охладитель гелия; СБ — сборник; СЗЕ — сливная емкость; ТП — теплообменник промежуточный; Ф — фильтр; ХО, ХИ — холодильник; ЭМН — электромагнитный насос; БФВО — блок форвакуумной откачки; АИ — аппарат извлечения; БО — блок очистки; БОГ — блок очистки гелия; БП — блок пробоотбора; БПД — блок пробоотбора и ввода добавок; ВВН — высоковакуумный насос; ГД — газодувка; ЖМЛМ — жидкометаллический литиевый модуль; КБ — компенсационный бак

Кроме того, проанализированы некоторые вопросы радиационной безопасности в отсеках транспортера. Как показали оценочные расчеты, источником излучения в отсеках транспортера (не рассматривая активацию продуктов коррозии) является тормозное фотонное излучение, которое возникает при торможении электронов, испускаемых  ${}^8\text{Li}$  в материалах оборудования с литиевым теплоносителем.

Учет достаточно длительного прохождения активированного теплоносителя по контуру до оборудования в отсеке вагона-транспортера и периода полураспада  ${}^8\text{Li}$ , равного 0,88 с, а также условий облучения (спектра нейтронов) в бланкете показывает, что специальной защиты не потребуется.

Таким образом, принятые технические решения не допускают развития аварийных ситуаций при возможных проектных авариях (единичных отказах систем нормальной эксплуатации). К таким авариям относятся, например, разгерметизация прочного корпуса теплообменного оборудования с жидким металлом, межконтурные течи при разгерметизации теплопередающих трубок и т.п.

Одним из важнейших вопросов безопасности является исследование последствий запроектных аварий, вызванных наложением на единичный отказ еще одного или двух отказов систем нормальной эксплуатации. Наиболее характерной запроектной аварией в установках с жидким металлом является авария, связанная с одновременной разгерметизацией прочного и страховочного корпусов теплообменного оборудования и трубопроводов.

В результате такой аварии происходит вытекание жидкого металла в помещение и его возгорание с выделением большого количества тепла. Для минимизации последствий этой аварии применяются специальные поддоны для вытекающего жидкого металла, которые ограничивают поверхность горения и количество сгоревшего жидкого металла. Кроме того, применение систем пожаротушения, основанное на вытеснении из помещения воздуха за счет подачи аргона из специальных баллонов, позволяет свести к минимуму количество сгоревшего жидкого металла и не допустить большого роста температуры среды в помещении.

В отсеке с жидким литием вода отсутствует. Наличие в отсеке с жидким Na—K водяного тракта требует рассмотрения запроектной аварии, связанной с проливом жидкого металла и воды в отсек. Проведены оценочные расчеты последствий запроектной аварии, приводящей к проливу Na—K в отсек и его возгоранию, а также к проливу Na—K в отсек совместно с проливом воды. В расчете принималось, что количество Na—K равно 300 кг, воды — 2000 кг (расход воды 33 кг/с, время закрытия клапана 60 с), объем отсека  $30\text{ м}^3$ , масса металлоконструкций 5000 кг.

Следует отметить, что применение специальных поддонов локализации вытекшего жидкого металла позволяет существенно ограничить количество сгоревшего металла (до 10% от общей массы).

Расчеты показали, что при запроектной аварии, связанной с протечкой Na—K в отсек вагона и его возгоранием, максимальная температура газовой среды в отсеке не превысит  $140\text{ }^\circ\text{C}$ , температура стенок металлоконструкций  $110\text{ }^\circ\text{C}$ , а давление  $0,13\text{ МПа}$ .

Если запроектная авария приводит к одновременному вытеканию Na—K и воды, то выделившийся при взаимодействии Na—K с водой водород может либо сгореть, либо детонировать. Условия детонации водорода определяются различными соотношениями количеств вытекшего Na—K и воды. Так, например, если вытекает 10 кг воды и 10 кг Na—K, то максимальное давление на стенки отсека детонационной волны составит около  $0,5\text{ МПа}$ , а в случае вытекания 300 кг Na—K и 2000 кг воды — до  $3,5\text{ МПа}$ .

Применение аргоновой системы пожаротушения позволяет избежать горения и взрыва при рассмотренной запроектной аварии.

Для сохранения целостности отсека и вагона при запроектной аварии, приводящей к детонации водорода, целесообразно отсеки вагона снабдить быстродействующими разрывными мембранами.

Аналогичные расчеты запроектной аварии, приводящей к вытеканию лития в отсек вагона и его возгоранию, показали, что при объеме отсека 30 м<sup>3</sup>, количестве вытекшего лития 200 кг максимальная температура газовой среды в отсеке не превысит 100 °С, а температура стенок металлоконструкций 70 °С, давление 0,12 МПа.

Таким образом, рассмотренная запроектная авария не приведет к разрушению отсеков и вагона, а применение защитных средств (система пожаротушения, разрывные мембраны) обеспечивает безопасность эксплуатации установки.

Выполненный комплекс расчетных и конструкторских работ показал возможность реализации концепции литиевого самоохлаждаемого модуля с выполнением всех основных требований, обеспечивающих его испытание на реакторе ИТЭР. Разработанная конструкция модуля, схема и оборудование его внешних систем могут служить прототипом для демонстрационного реактора с бланкетом такого типа.

### ЛИТИЕВЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ РЕАКТОРА ИТЭР СОВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ

**Исходные данные и общие подходы к разработке модуля.** В связи с изменением основных параметров ИТЭР проделан комплекс работ по адаптации выполненных разработок конструкции модуля бланкета и его внешних технологических и жидкометаллических систем к проекту реактора с сокращенными габаритами и параметрами. Основные параметры и характеристики реактора ИТЭР, для которого разрабатывается испытательный модуль:

	Номинальное	Максимальное
Термоядерная мощность, МВт ...	500	700
Тороидальное поле на большом радиусе, Тл ...	5,3	—
Поверхность плазмы, м <sup>2</sup> ...	678	—
Средняя нейтронная нагрузка на первую стенку, МВт/м <sup>2</sup> ...	0,57	0,80
Нейтронная нагрузка на стенку на внешнем экваторе, МВт/м <sup>2</sup> ...	0,65	0,91
Нейтронный флюенс на первую стенку на внешнем экваторе, МВт-лет/м <sup>2</sup> ...	0,3	0,5

Модуль предполагается разместить в экваториальном порте реактора за первой стенкой камеры. Он должен занимать половину площади порта и иметь габаритные размеры 1720×520×600 мм.

Новый вариант модуля является модификацией конструкции, разработанной для испытаний в реакторе ИТЭР и рассчитанной на более высокие уровни нейтронной и тепловой нагрузок.

Модуль содержит тритийвоспроизводящую бериллиевую зону, охлаждаемую литием, и защитную зону из карбида вольфрама, также охлаждаемую литием. Первой стенкой модуля, воспринимающей поток излучения из плазмы, является штатная первая стенка реактора, в контакте с которой модуль находится в рабочем положении.

Основными критериями при разработке принципиальной конструкции модуля являлись минимизация (≤40 л) объема жидкого лития в его охлаждающих каналах (с учетом заполнения и слива лития, разогрева модуля при заполнении) и получения перепадов температур по элементам модуля, не приводящих к недопустимым температурным напряжениям в материалах конструкции модуля.

Ввиду существенного снижения энергетических и габаритных параметров ИТЭР по сравнению с первоначальным вариантом реактора, появления дефицита рабочего пространства в зоне расположения диагностических, вспомогательных и других систем реактора разработка модуля проводилась исходя из принципа максимального упрощения схемы и объема оборудования его внешних систем при обеспечении необходимого уровня его безопасности и простоты в эксплуатации.

Задача обеспечения максимального коэффициента воспроизводства трития при разработке не ставилась ввиду жестких ограничений на объем лития в жидкометаллических системах модуля и снижения нейтронной нагрузки на первую стенку в ИТЭР современных параметров. При разработке базовой конструкции модуля для реактора ИТЭР, при проведении детальных 3D нейтронно-физических расчетов с учетом окружения испытательного порта была показана гарантированная достижимость необходимого уровня воспроизводства трития и обеспечения защитных характеристик испытательного модуля при его оптимальном материальном составе и выбранной конструкции. В настоящем варианте одной из целей испытаний должна стать экспериментальная проверка соответствия расчетной и экспериментально измеренной при испытаниях скорости наработки трития в модуле. Не задаваясь целью получения максимального воспроизводства трития, становится возможным снизить объем жидкого лития в модуле, который будет определяться параметрами системы теплоотвода.

В случае выбора материального состава модуля, обеспечивающего оптимальный уровень воспроизводства трития, необходимый уровень радиационной защиты магнитной системы реактора должен обеспечиваться дополнительной железобетонной защитной пробкой, размещаемой в порте непосредственно за модулем. Уменьшив толщину бериллиевой зоны размножения нейтронов и увеличив за этот счет толщину зоны радиационной защиты, можно снизить наработку трития при испытании модуля и одновременно обеспечить гарантированную радиационную защиту магнитной системы реактора без использования дополнительных защитных элементов.

Пониженное воспроизводство трития в таком варианте модуля (его воспроизводство можно дополнительно снизить, используя обедненный изотопом  ${}^6\text{Li}$  литиевый теплоноситель) повысит уровень радиационной безопасности при проведении испытаний, позволит упростить схему его внешних жидкометаллических систем и регламент работы модуля в номинальном режиме.

При предварительном выборе толщин зон воспроизводства, защиты и элементов конструкции модуля проведены варианты расчетные оценки и выбран вариант схемы, обеспечивающий максимальную температуру задней стенки модуля на уровне  $\leq 700$  °С. Для упрощения условий работы с модулем на стадии его изготовления, технологических испытаний, подготовки к испытанию на реакторе и во время собственно испытаний предполагается покрывать внешние стенки модуля, контактирующие с рабочей средой при повышенных температурах (вакуум, инертный газ), слоем хромистой ферритной стали толщиной  $\sim 100$  мкм. Возможность формирования такого покрытия обеспечивается близостью таких свойств, как термическое расширение и теплопроводность ванадиевого сплава и хромистой стали. Такое покрытие может создаваться на стадии обработки слитков и изготовления полуфабрикатов из ванадиевого сплава, которая должна проводиться в защитном чехле [21].

**Конструктивная схема модуля.** Принципиальная конструктивная схема рассматриваемого варианта модуля (рис. 7) аналогична разработанной ранее.

В зоне воспроизводства установлены два бериллиевых блока (толщиной 50 и 260 мм), между которыми размещен теплопровод в виде короба прямоугольной

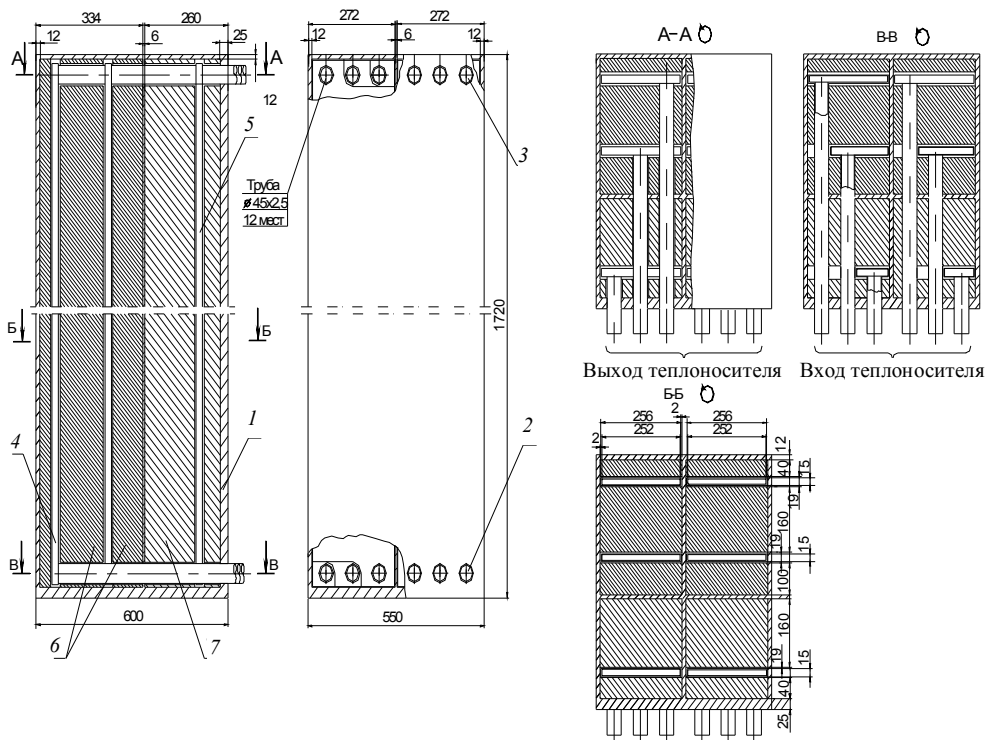


Рис. 7. Вариант конструктивной схемы модуля: 1 — корпус модуля; 2 — патрубок входа Li в канал; 3 — патрубок выхода Li из канала; 4 — литиевый канал охлаждения зоны воспроизводства; 5 — литиевый канал охлаждения зоны защиты; 6 — Ве (зона воспроизводства); 7 — WC (зона защиты)

формы, по которому прокачивается жидкий литий (толщина слоя лития 16 мм, общая толщина, включая ванадиевые стенки, — 20 мм). В зоне защиты за перегородкой размещены два блока из карбида вольфрама (WC + 1—2%  $V_4C$ ), также прямоугольной формы, и два теплопровода, разделяющие блоки из карбида вольфрама между собой и перегородкой.

Предлагается производить охлаждение модуля по трем независимым теплопроводам. Прокатка лития по всем теплопроводам отдельная и осуществляется снизу вверх. Каждый теплопровод имеет входные и выходные патрубки (труба  $\varnothing 44 \times 2$  мм). Такая система охлаждения обеспечивает выравнивание температур по всей конструкции модуля при низком гидравлическом сопротивлении трактов, получая приемлемый уровень термических напряжений в его конструкции. Технологические зазоры между стенками модуля и блоками при заполнении внутренней полости литием приняты равными 2 мм. Заполнение литием необходимо для обеспечения теплового контакта между теплопроводами и другими элементами внутренней полости модуля и его корпусными деталями. Заполнение и слив осуществляются через отдельные трубки диаметром 20 мм, вваренные в стенку корпуса.

С целью снижения объема лития в модуле и повышения эксплуатационной технологичности рассмотрен вариант с заполнением зазоров между стенками модуля и блоком по периметру ванадиевыми гранулами и гелием при нормальном давлении. При этом предполагается, что контакт между блоками на глубине модуля обеспечивается за счет притирки плоскостей блоков, теплопроводов и стенок между собой, а также создания контактного давления за счет деформации теплопроводов под избыточным давлением жидкого лития. Это давление обеспечивается гид-

равлическими потерями при прокачке лития через магнитное поле реактора. В этом случае за счет термических сопротивлений контактов по глубине модуля, а также за счет тепловыделений в стенках модуля и термического сопротивления засыпки ванадиевых гранул в гелии будет иметь место повышение максимальной температуры металлоконструкции модуля.

Таким образом, при использовании засыпки, возможно, потребуется снижение температуры жидкого лития на выходе из модуля и, при необходимости, снижение подогрева лития в модуле.

Надежность конструкции и безопасность эксплуатации модуля обеспечиваются, во-первых, наличием независимых систем циркуляции лития в модуле. При этом корпус модуля не нагружен избыточным давлением лития основного контура, а в случае перетекания лития из теплопровода во внутреннюю полость можно быстро обнаружить и локализовать течь без выхода лития за пределы корпуса модуля. В случае заполнения модуля гелием (при засыпке) возможно обеспечение естественной или принудительной циркуляции гелия через модуль с установкой за пределами камеры сорбентов трития и газоанализаторов. Во-вторых, система охлаждения разделена на независимые в пределах модуля системы циркуляции лития, что позволяет ограничить объемы лития, непосредственно соединенные с местом возможной протечки. Следует отметить, что при заполнении модуля гелием для протекания лития имеет место барьер в виде двухслойной системы с контролем среды между слоями.

#### Основные геометрические характеристики модуля:

Габаритные размеры, мм:	
высота ...	1720
ширина ...	520
глубина ...	603
Зона воспроизводства, мм:	
суммарная толщина бериллия ...	310
суммарная толщина ванадия ...	16
суммарная толщина лития ...	16
Зона защиты, мм:	
суммарная толщина карбида вольфрама ...	200
суммарная толщина ванадия ...	37
суммарная толщина лития ...	32
Поперечное сечение теплопровода, мм <sup>2</sup> :	
в зоне воспроизводства ...	8131
в зоне защиты ...	8040
Средняя величина зазоров, мм:	
по глубине ...	2
по периметру ...	2
Объемы основных компонентов, л:	
литий ...	44
бериллий ...	252
карбид вольфрама ...	80
ванадий ...	164
общий объем ...	540
Диаметр литиевых трубопроводов, мм ...	40
Масса модуля (общая), кг ...	2755

Модуль размещается в экваториальном порте за первой стенкой камеры. Все технологические литиевые трубопроводы модуля выводятся через крышку опорной



рамы и дополнительную радиационную защиту в пространстве порта, расположенную с тыльной стороны экспериментального модуля.

Установка модуля в опорную раму производится из технологической галереи. В дальнейшем производится соединение технологических коммуникаций модуля с внешними технологическими системами, расположенными в порте модуля. Соединительные трубопроводы с циркулирующим жидким литием как внутри, так и вне прочного вакуумного корпуса реактора будут снабжены герметичными страховочными кожухами, заполненными инертным газом. Таким образом, при возможных проектных авариях, связанных с разгерметизацией (течи лития) основного циркуляционного контура, развитие аварийной ситуации не произойдет. Для исследования запроектных аварий, вызванных наложением на один отказ одного или более отказов систем нормальной эксплуатации, необходимо детальное рассмотрение последствий попадания жидкого лития в пространство порта.

**Тепловая и теплогидравлическая оценка параметров модуля.** Расчеты проводились с использованием результатов нейтронно-физических, тепловых и теплогидравлических расчетов базового варианта модуля, имеющего многоканальное охлаждение литием и разработанного ранее для исходного проекта ИТЭР. Эпюра тепловыделений по глубине модуля представлена на рис. 8.

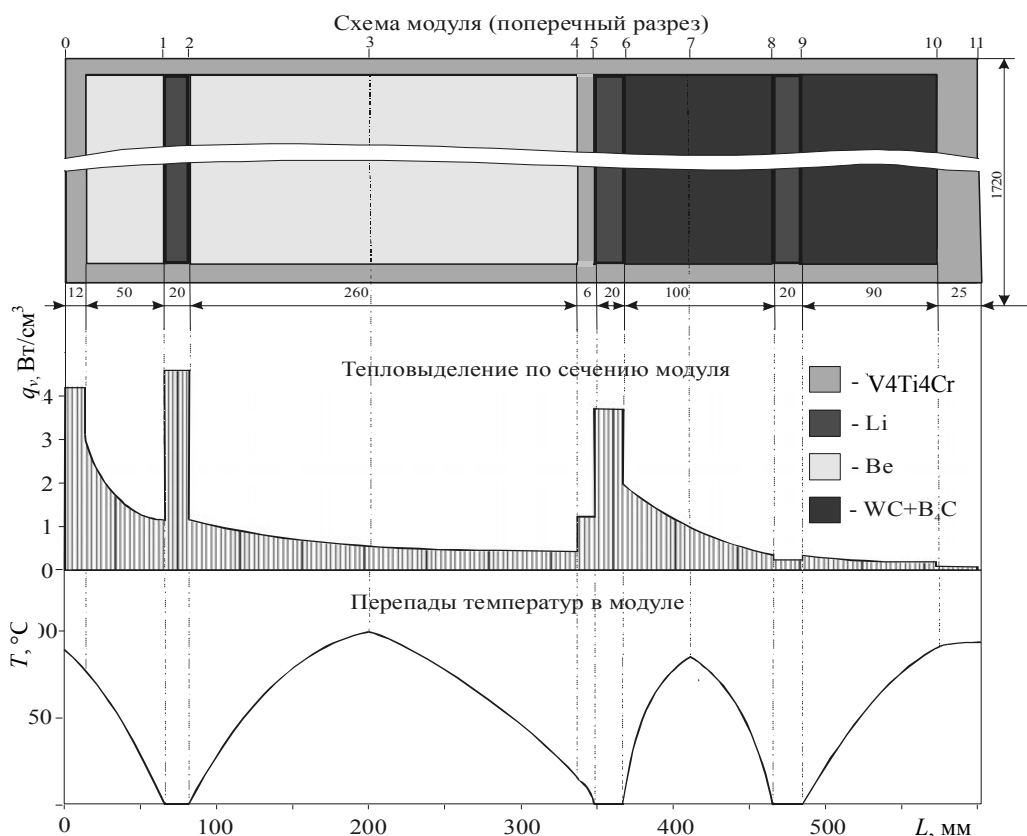


Рис. 8. Тепловыделение и перепады температур в модуле

Основные параметры модуля бланкета:

Полное тепловыделение в модуле, кВт ...	710
в том числе: литий ...	124
бериллий ...	208

карбид вольфрама ...	194
ванадий ...	130
Тепловая мощность теплопроводов, кВт:	
в том числе в ТО1 зоны размножения ...	376
в ТО2 зоны защиты ...	204
в ТО3 зоны защиты ...	130
Расход охлаждающего лития, кг/с ...	0,845
в том числе: в ТО1 зоны размножения ...	0,448
в ТО2 зоны защиты ...	0,243
в ТО3 зоны защиты ...	0,1548
Скорость лития в элементах, м/с:	
в ТО1 зоны размножения ...	0,120
в подводящих трубопроводах ...	0,745
в ТО2 зоны защиты ...	0,065
в подводящих трубах ...	0,404
в ТО3 зоны защиты ...	0,042
в подводящих трубах ...	0,258
Средняя температура лития (вход—выход) ...	400/600
Максимальная температура материалов, °С:	
бериллий ...	695
карбид вольфрама ...	688
ванадиевый сплав ...	700

По сравнению с базовым вариантом в модуле имеет место меньший расход и существенно улучшен гидравлический тракт. Поэтому можно утверждать, что гидравлические потери прокачки лития при наличии электроизолирующего покрытия на внутренней стенке жидкометаллических трактов будут меньше потерь в базовом варианте, т.е.  $< 4 \cdot 10^5$  Па.

**Внешние системы модуля.** Схема внешних систем разрабатываемого варианта модуля существенно упрощена. В состав внешних технологических систем входят системы теплоотвода, предварительного разогрева, вакуумной откачки, инертного газа.

На рис. 9 представлен вариант пневмогидравлической функциональной схемы перечисленных систем.

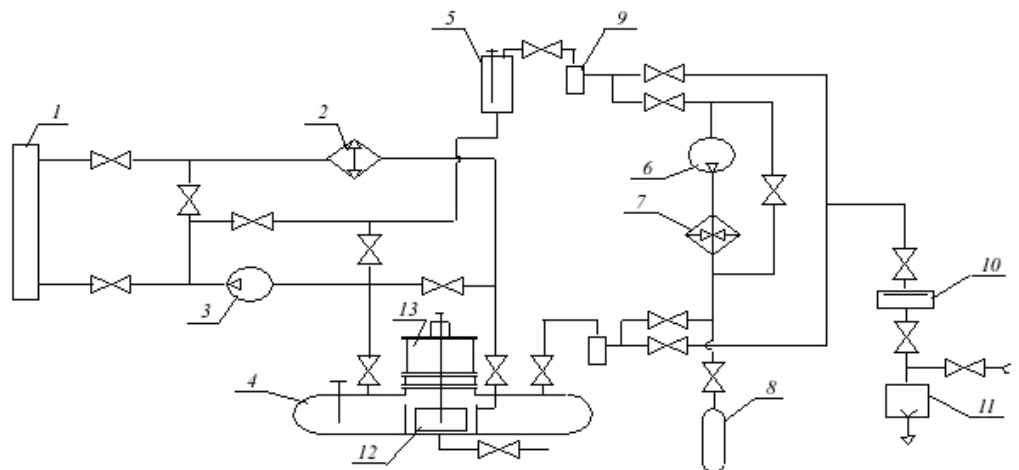


Рис. 9. Вариант пневмогидравлической функциональной схемы внешних систем модуля: 1 — модуль blankets; 2 — холодильник литий—вода; 3 — электромагнитный насос; 4 — сливная (заправочная) емкость; 5 — компенсационная емкость; 6 — газодувка; 7 — нагреватель гелия; 8 — баллон с гелием; 9 — ловушка паров лития; 10 — азотная ловушка; 11 — форвакуумный насос; 12 — контейнер с геттером; 13 — шлюзовая камера

Система теплоотвода состоит из литиевого контура и контура охлаждающей воды (на схеме не показан), питающегося от водяного контура реактора.

Литиевый контур (ЖМК) включает электромагнитный насос 3, теплообменник литий—вода 2, сливную (заправочную) емкость 4, компенсирующую емкость 5, ловушку паров лития 9, запорную арматуру, трубопроводы.

Система предварительного разогрева литиевого контура, в том числе литиевых трактов модуля, состоит из замкнутого газового контура, связанного с литиевым ЖМК через емкости 3 и 4. Устройство распределения лития по теплопроводам модуля на схеме не показано.

Газовый контур включает газодувку 6, при помощи которой гелий прокачивается через электронагреватель 7 и литиевый ЖМК, производя предварительный прогрев ЖМК и литиевых трактов модуля. К газовому контуру подсоединен баллон 8 с предварительно подготовленным (чистым) гелием. Гелиевый контур имеет замкнутую циркуляционную петлю, включающую газовые трубопроводы и арматуру.

Система форвакуумной откачки состоит из форвакуумного насоса 11, азотной ловушки 10, вакуумной арматуры и трубопроводов. При эксплуатации модуля целесообразно будет использовать централизованную систему откачки реактора и можно будет отказаться от отдельной системы вакуумирования модуля.

Для проведения технологических операций в ЖМК в качестве инертного газа предполагается использовать гелий из системы предварительного подогрева.

Основные параметры подсистемы теплоотвода модуля:

	Литиевый контур	Водяной контур
Отводимая тепловая мощность, кВт ...	710	710
Теплоноситель ...	Литий	Вода
Температура на входе, °С ...	400	35
Температура на выходе, °С ...	600	55
Расход, кг/с ...	0,84	8,36
Давление на входе, МПа ...	1,0—0,5	0,3—0,4

Циркуляция жидкого металла по литиевому контуру производится при помощи электромагнитного насоса 3 через теплообменник литий—вода 2. Давление лития на входе в электромагнитный насос поддерживается при помощи давления гелия над зеркалом лития в компенсирующей емкости 5, подсоединенной к литиевому контуру постоянно. Заправка контура лития производится из сливной (заправочной) емкости 4. После заправки емкость 4 отсекается от контура при помощи вентилей. В эту же емкость литий сливается после окончания работы.

Сливная (заправочная) емкость 4 должна быть выполнена в виде передвижного контейнера, который заправляется литием в отдельном помещении, а затем приводится в бокс, куда выведены подсоединительные трубопроводы литиевого контура. Для максимального упрощения литиевого контура и уменьшения объема заправляемого лития контур не снабжен системой очистки лития, пробоотборником, устройством введения технологических добавок.

В литиевом контуре отсутствует также система извлечения трития, наработанного в модуле. В качестве возможного варианта рассматривается возможность размещения в сливной (заправочной) емкости погружаемого в литий блока, заполненного геттером (см. рис. 9). Геттер предполагается использовать кроме возможности

дополнительной очистки лития от неметаллических примесей при подготовке испытаний для извлечения и связывания в твердой фазе трития, нарабатывающегося в модуле в процессе штатного режима работы. С этой целью в схеме (см. рис. 9) предусмотрена возможность организации циркуляции лития в жидкометаллическом контуре через сливную (заправочную) емкость 4, отключив от контура компенсирующую емкость 5. Предусмотрена возможность замены контейнера с геттером, для чего в верхнюю часть сливной (заправочной) емкости 4 вмонтирована шлюзовая камера. В качестве материала геттера для извлечения трития в первую очередь рассматривается иттрий. Таким образом, будут возможны два варианта извлечения трития, нарабатывающегося в литиевом испытательном модуле:

— слив лития из трактов модуля в сливную емкость при достижении заданного уровня его содержания в жидком металле и замена этой емкости на сменную; емкость с тритийсодержащим литием транспортируется в тритиевый комплекс реактора для извлечения трития по выбранной технологии;

— периодическое извлечение геттера через шлюз сливной емкости для регенерации в тритиевом комплексе и установка свежего геттера.

Полная предварительная технологическая подготовка лития, заправляемого в передвижной контейнер, а затем в емкость 4, должна производиться в специальном помещении, оборудованном для этой цели. В этом же помещении должно находиться оборудование для проведения технологических операций с отработанным литием (в основном, контроль содержания примесей, очистка лития и др.).

Система предварительного разогрева модуля должна обеспечивать предварительный (до заправки лития) разогрев литиевых трактов модуля до 350 °С. При помощи этой системы могут разогреваться также агрегаты и трубопроводы литиевого ЖМК (весь внешний ЖМК дополнительно предполагается оборудовать электронагревателями).

Основные параметры системы предварительного разогрева модуля:

Теплоноситель ...	Гелий
Максимальная температура газа на выходе из электронагревателя, °С ...	350
Максимальный подогрев гелия, °С ...	300
Давление гелия, МПа ...	0,8
Расход гелия, кг/с ...	0,154
Максимальная мощность, потребляемая электронагревателем, кВт ...	240

Так как перед заправкой жидким металлом литиевые тракты модулей и часть подводящих литиевых трубопроводов не могут предварительно разогреваться при помощи электронагревателей, как во внешнем ЖМК, предлагается разогревать их посредством горячего гелия.

Циркуляция гелия должна производиться следующим образом. Из газодувки 6 гелий поступает в электронагреватель 7, затем через ловушку паров 9 в газовый объем заправочной (сливной) емкости 4, предварительно заправленной подготовленным чистым литием. Из емкости 4 гелий по трубопроводам и ЖМК проходит через канал электромагнитного насоса 3 и поступает в теплопроводы модуля. Из модуля через холодильник литий—вода, компенсационную емкость 5, ловушку паров лития 9 гелий поступает в газодувку 6.

При такой схеме подсоединения не требуется отдельного подсоединения литиевого тракта к жидкометаллическим вводам в модуль, что упрощает общую схе-

му жидкометаллической и газовой системы. Гелий можно использовать (при такой схеме) в качестве инертного газа для работы с литьем при технологических операциях в ЖМК. Гелиевая система в данном варианте максимально упрощена и не имеет систем очистки газа от примесей. В баллоне 8 гелий должен поставляться полностью подготовленным к работе.

**Выбор конструкции основного теплообменника.** Ключевым агрегатом внешних систем модуля является холодильник литий—вода, который позволяет производить теплоотвод от литиевого контура непосредственно к контуру охлаждающей воды (без промежуточного контура). Рассмотрено два варианта теплообменника, отличающиеся способом разделения литиевого и водяного теплоносителя. Конструкция теплообменника должна обеспечить его безопасную эксплуатацию и исключить проникновение трития из лития в водяной контур.

**Теплообменник с гелиевым зазором.** Этот вариант теплообменника между литьем и водой представляет собой цельносварную U-образную кожухотрубную конструкцию, где теплопередача от греющего теплоносителя (литий) к охлаждающей воде осуществляется через гелиевый зазор, заполненный металлическими гранулами. Конструкция представлена на рис. 10.

**Теплообменник с жидкометаллическим зазором.** Холодильник позволяет производить теплоотвод от литиевого контура непосредственно к контуру охлаждающей воды (без промежуточного контура). Предлагается кожухотрубчатый теплообменник (рис. 11) с трубками Фильда, по которым циркулирует жидкий литий. Каждая из 19 трубок Фильда помещена в две трубки большего диаметра. Эти труб-

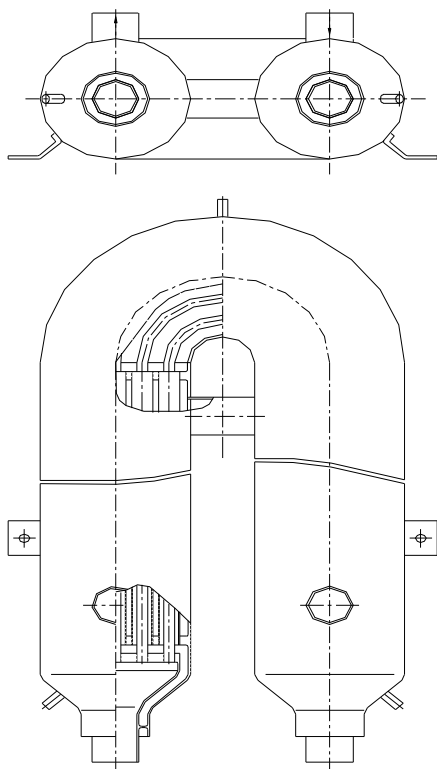


Рис. 10. Теплообменник литий—вода с гелиевым зазором

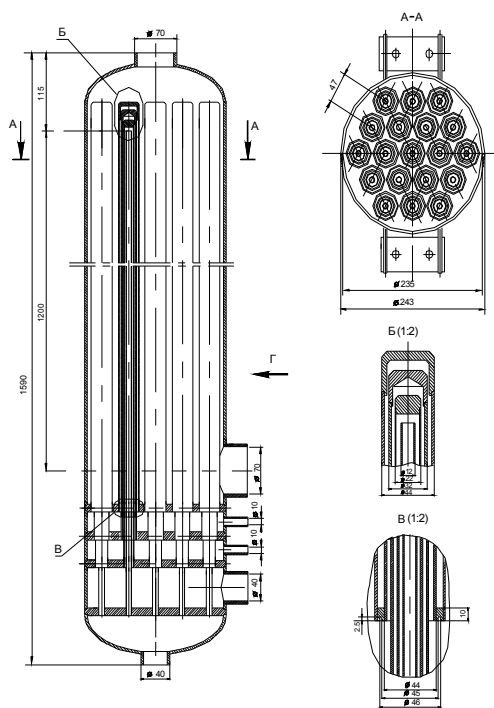


Рис. 11. Теплообменник литий—вода с жидкометаллическим зазором

ки образуют вокруг трубки Фильда две кольцевые полости: первую, заполненную щелочным металлом — эвтектикой 78% К — 22% Na; вторую, заполненную эвтектическим сплавом 44,5% Pb — 55,5% Bi. Одноименные полости объединены на выходе общими коллекторами, через которые производится их заполнение соответствующими теплоносителями. Снаружи все трубки помещены в общий кожух, в межтрубном пространстве которого циркулирует охлаждающая вода.

Промежуточные теплоносители Na—K и Pb—Bi находятся в кольцевых зазорах без циркуляции и служат термическим сопротивлением для получения необходимого температурного перепада между циркулирующим литием и охлаждающей водой.

**Размещение внешних систем литиевого модуля.** На рис. 12 представлен вариант возможной компоновки внешнего литиевого жидкометаллического контура, обеспечивающего теплоотвод от литиевого модуля.

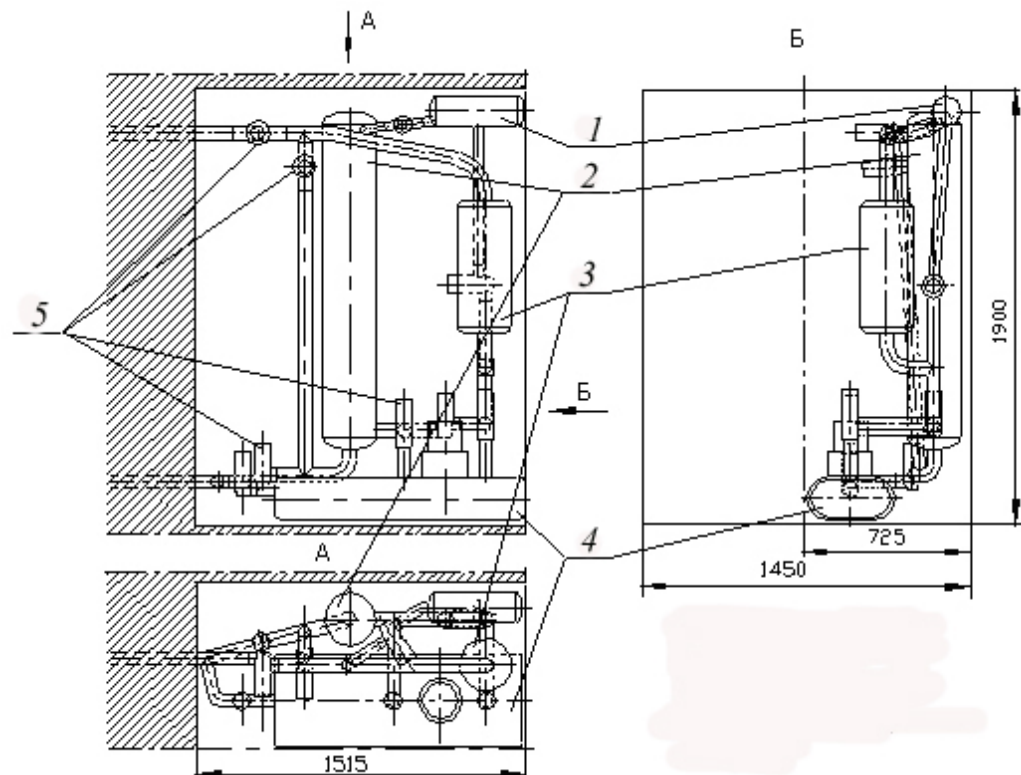


Рис. 12. Вариант компоновки внешнего литиевого жидкометаллического контура, обеспечивающего теплоотвод от литиевого модуля: 1 — компенсационная емкость; 2 — холодильник литий—вода; 3 — электромагнитный насос; 4 — сливная (заправочная) емкость; 5 — вентиль

Основным требованием к размещению литиевого ЖМК является обеспечение его безопасной эксплуатации. Для выполнения этого требования при разработке компоновки ЖМК стремились обеспечить:

— размещение оборудования литиевого ЖМК в минимально возможном объеме пространства, расположенного непосредственно за радиационной защитой экваториального порта, в котором размещен литиевый модуль;

— минимально возможное количество лития в агрегатах и трубопроводах внешнего жидкометаллического контура;

— гарантированное заполнение ЖМК литием без газовых пробок (контроль по уровню металла в компенсирующей емкости), а также полный слив металла в сливную (заправочную) емкость;

— возможность оборудовать агрегаты, арматуру и трубопроводы контура страховочными кожухами, заполняемыми инертным газом и оборудованными датчиками течи металла;

— возможность поместить ЖМК в герметичный металлический бокс с контролируемой атмосферой и возможностью заполнения его инертным газом; на случай аварийного пролива жидкого металла в боксе предполагается установить закрытые металлические поддоны, заполненные огнегасящим составом и оборудованные гидрозатворами;

— гарантированный предварительный разогрев внешнего ЖМК посредством наружных электронагревателей, а также разогрев литиевых трактов модуля посредством предварительной прокачки через теплопроводы модуля горячего гелия.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработка конструкции тритийвоспроизводящего модуля литиевого blankets реактора термоядерной мощностью 1,5 ГВт показала, что при приемлемых геометрических, теплофизических и гидравлических характеристиках, использовании в качестве тритийвоспроизводящей среды и теплоносителя лития природного изотопного состава, бериллия в качестве размножителя нейтронов и карбида вольфрама с добавкой карбида бора в качестве материала радиационной защиты в blankets предложенной схемы достигается коэффициент воспроизводства трития, превышающий единицу. Схема внешних жидкометаллических систем модуля и конструкция ее основных агрегатов, разработанные на базе практической реализации проектов жидкометаллических стендов и экспериментальных теплообменных систем, могут являться прототипами аналогичных систем и агрегатов демонстрационного реактора. Проектно-конструкторские решения, а также технические и другие мероприятия позволят обеспечить безопасную эксплуатацию литиевого модуля и внешнего ЖМК.

Предложение по конструкции, схеме и составу внешних систем испытательного литиевого модуля, адаптированного к требованиям реактора ИТЭР с современными параметрами, отличается предельной простотой и приемлемыми характеристиками. Внешний литиевый контур занимает половину пространства, расположенного непосредственно за радиационной защитой. Такое размещение внешнего жидкометаллического контура обеспечивает необходимый доступ к жидкометаллическому оборудованию при проведении монтажных и ремонтных работ. Малый объем лития ( $\leq 40$  л собственно в модуле и  $\sim 60$  л суммарно), снижение до минимума наработки трития обеспечивают высокий уровень безопасности и простоту в эксплуатации модуля. Ключевым элементом внешних систем является теплообменник литий—вода, конструкция которого должна отрабатываться экспериментально.

Результаты выполненных расчетно-конструкторских проработок служат основой для детальной проработки испытательного модуля и его внешних жидкометаллических систем, параметры которых будут полностью удовлетворять всем требованиям нового варианта проекта ИТЭР.

Работа выполнена в 1997—2003 гг. по контрактам с Департаментом атомной науки и техники Минатома РФ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ITER** Concept Definition. ITER-1, Oct. 1988.
2. **Technical** basis for the ITER interim design report, cost review and safety analysis. — In: ITER EDA DS, № 7, IAEA, Vienna, 1996.
3. **ИТЭР** Test Program. — In: ITER Document Series, № 24, IAEA, Vienna, 1991.
4. **Technical** Basis for the ITER —FEAT Outline Design. — In: ITER EDA DS № 19, IAEA, Vienna, 2000.
5. **Smith D.L.** Self-cooled liquid metal blankets, tokamak concept innovations. — In: Report of a Specialists' Meeting Atomic Energy Agency and Held in Vienna, 13—17 Jan. 1986, IAEA-TECDOC-373, IAEA, Vienna, 1986, p. 414—417.
6. **Михайлов В.Н., Евтихин В.А., Люблинский И.Е., Вертков А.В., Чуманов А.Н.** Литий в термоядерной и космической энергетике XXI века. — М.: Энергоатомиздат, 1999.
7. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Saveliev B.G., Afanasjev N.M., Bobkov Yu.V.** Fusion reactor lithium test module development. — В сб.: Тезисы докладов 6-й Всероссийской конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов, С.-Петербург, 27—29 мая 1997 г. НИИЭФА, 1997, с. 168.
8. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Saveliev B.G., Afanasjev N.M., Bobkov Yu.V., Khripunov B.I.** Development of the self-cooled Li—Li blanket module. — In: Intern. Workshop on Liquid Metal Blanket Experimental Activities. Sept. 16—18, 1997, Paris, France. Abstracts.
9. **Евтихин В.А., Люблинский И.Е., Вертков А.В., Михайлов В.Н., Коржавин В.М.** Коррозия и совместимость материалов blankets ТЯР с жидким литием. — Перспективные материалы, 1999, № 1, с. 33—38.
10. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Afanasiev N.M., Chumanov A.N., Khripunov B.I., Petrov V.B., Shapkin V.V., Prokhorov D.Yu., Zhogolev V.E., Belan V.G., Konkashbaev I.K., Mirnov S.V., Nikandrov L.B., Lopatkin A.V., Muratov V.G., Sokolov Yu.A., Korzhavin V.M., Golubchikov L.G.** Design, calculation and experimental studies for liquid metal system main parameters in support of the liquid lithium fusion reactor. — Fusion Energy 1998, IAEA, Vienna, 1999, IAEA-CSP-1/P, vol. 4, p. 1309—1312.
11. **Евтихин В.А., Люблинский И.Е., Вертков А.В., Чуманов А.Н., Шполянский В.Н.** Жидкометаллический литиевый испытательный модуль blankets для реактора ITER—FEAT. — В сб.: Тезисы докладов 7-й Международной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов, С.-Петербург, 28—31 октября 2002 г. ФГУП НИИФА им. Д.В. Ефремова, 2002, с. 240—241.
12. **Vitkovsky I.V., Golovanov M.M., Divavin V.A., et al.** Neutronic, thermal-hydraulic and stress analysis of RF lithium cooled test blanket module for ITER. — Fusion Eng. Des., 2000, vol. 49—50, p. 703—707.
13. **Зимин С.А.** Некоторые нейтронно-физические параметры материалов — ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 1985, вып. 3, с. 35—37.
14. **Вотинов С.Н., Дедурин А.И., Иванов Л.И., Альтовский И.В., Григорьян А.А., Евтихин В.А., Люблинский И.Е., Вертков А.В.** Ванадиевые сплавы как конструкционный материал термоядерных реакторов. — ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 2000, вып. 2, с. 3—12.
15. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Votinov S.V., Dedurin A.I.** Influence of alloying and impurity element contents on V—Ti—Cr alloy properties. — J. Nucl. Mater., 2002, vol. 307—311, p. 591—595.
16. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V., Votinov S.V.** Selection of vanadium alloy for high-temperature liquid lithium blanket of fusion reactor. — In: Proc. of IEA/JUPITER-II Intern. Workshop on Liquid Blanket and Low Activation Materials System, May 21—23, 2001, Tohoku University, Sendai, Japan.



17. **Smith D., Park J.-H., Lyublinski I., Evtikhin V., Perujo A., Glassbrenner H., Terai T., Zinkle S.** Progress in coating development for fusion systems. — Fusion Eng. Des., 2002, vol. 61—62, p. 629—641.
18. **Evtikhin V.A., Vertkov A.V., Lyublinski I.E.** Self-healing electrical insulating coating process for vanadium alloys-lithium systems. — Ibid, 2001. vol. 58—59, p. 731—735.
19. **Евтихин В.А., Люблинский И.Е., Вертков А.В., Чуманов А.Н.** Разработка многофункциональных покрытий для термоядерных установок и реакторов. — В сб.: Доклады 3-й Международной конференции «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов» (ОТТОМ-3), Харьков, Украина, сентябрь 9—13, 2002. — Харьков: ННЦ ХФТИ, ч. II, с. 107—111.
20. **Тебус В.Н., Петров Б.В., Клабуков Ю.Г., Волошин Л.А.** Выделение трития из лития струйной возвратно-поточной неравновесной молекулярной дистилляцией. — Атомная энергия, 1998, т. 84, вып. 3, с. 260—269.
21. **Votinov S.N., Vatulin A.V., Vedernikov J.P., Gubkin I.N., Sokolovsky D.V., Shikov A.K.** Novel structural material for fusion reactor on V—Ti—Cr system base canned in ferritic stainless steel. — В сб.: Тезисы докладов 4-й Международной конференции «Ядерная и радиационная физика», Алматы, Казахстан, 15—17 сентября 2003 г.

Статья поступила в редакцию 5 августа 2003 г.  
 Вопросы атомной науки и техники.  
 Сер. Термоядерный синтез, 2003, вып. 4, с. 3—35

УДК 621.039.6.536.24

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

*Л.Г. Генин, Я.И. Листратов, В.Г. Свиридов, В.Г. Жилин,  
 Ю.П. Ивочкин, Н.Г. Разуванов*

На экспериментальном МГД-комплексе МЭИ—ИВТ РАН проводятся исследования теплообмена при течении жидкого металла в трубе применительно к каналам охлаждения первой стенки и blankets термоядерного реактора токамака. В работе представлены результаты измерений полей осредненной и пульсационной температуры, профилей скорости, распределений локальных и средних коэффициентов теплоотдачи при течении ртути в горизонтальной обогреваемой трубе в продольном и поперечном магнитном поле. Рассматриваются различные варианты обогрева. Обнаружено сильное влияние термогравитационной конвекции (ТГК). Результат совместного воздействия ТГК и магнитного поля неоднозначен и существенно зависит от направления вектора магнитной индукции, а также от схемы обогрева.

MHD HEAT TRANSFER INVESTIGATION FOR A LIQUID METAL FLOW. L.G. GENIN, Ya. I. LIS-TRATOV, V.G. SVIRIDOV, V.G. ZHILIN, Yu.P. IVOCHKIN, N.G. RAZUVANOV. The liquid metal MHD heat transfer investigations applied to fusion TOKAMAK reactor were carried out using the experimental complex MPEI-IIIH. Mean and fluctuation temperature fields, mean velocity profiles, local wall temperature and heat transfer intensity distributions with and without longitudinal or transverse MF were measured in horizontal tube. Various configurations of applied heat flux were taken into consideration. Strong influence of thermo-gravitational convection was observed in horizontal heated tube. The thermo-gravitational convection affects LM heat transfer in a tube were essentially ambiguous depending on magnetic field direction and heat flux configuration.