

УДК 621.039.672

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РАБОТ ПО ИСПЫТАТЕЛЬНОМУ МОДУЛЮ БЛАНКЕТА С КЕРАМИЧЕСКИМ БРИДЕРОМ И ЛИТИЙ-СВИНЦОВОЙ ЭВТЕКТИКОЙ

*А.Ю. Лешуков, И.В. Данилов, В.К. Капышев, И.А. Карташев, В.Г. Коваленко, С.А. Макаров,
А.В. Размеров, М.Н. Свириденко, Ю.С. Стребков*

ОАО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежалы», Москва, Россия

В настоящей статье обобщаются результаты расчётно-конструкторских работ, выполненных специалистами ОАО «НИКИЭТ» по проекту испытательного модуля blankets (ИМБ) и его обеспечивающих систем. В данном материале представлены результаты работ по следующим направлениям: разработка общего вида ИМБ с керамическим бридером и жидкометаллическим теплоносителем (литий-свинцовая эвтектика); разработка принципиальных схем обеспечивающих систем ИМБ; нейтронно-физические расчёты ИМБ. Указанная работа также проводилась в развитие сотрудничества Индия—РФ по совместному проектированию экспериментального модуля для испытаний в ИТЭР, а также blankets термоядерного реактора ДЕМО с керамическим бридером и жидкометаллическим теплоносителем. Конструкторско-технологические предложения по ИМБ для H—He-стадии работы ИТЭР и их расчётное обоснование будут представлены индийской стороне на очередном заседании совместной рабочей группы.

Ключевые слова: испытательный модуль blankets, керамический бридер, литий-свинцовая эвтектика, первая стенка, несущий корпус, теплогидравлический расчёт, скорость наработки трития, обеспечивающие системы.

RESULTS OF CALCULATIONS AND DESIGN ACTIVITIES ON THE LITHIUM-LEAD TEST BLANKET MODULE WITH CERAMIC BREEDER

*A.Yu. Leshukov, I.V. Danilov, V.K. Kapyshev, I.A. Kartashev, V.G. Kovalenko, S.A. Makarov, A.V. Razmerov,
M.N. Sviridenko, Yu.S. Strebkov*

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

This article summarizes the results of design and analysis works on Lead-Lithium with Ceramic Breeder Test Blanket Module (LLCB TBM) and its ancillary systems which have been performed by specialists of OJSC «NIKIET». The following directions of works are presented in this material: the development of LLCB TBM general view; the development of principal schemes for the TBM ancillary systems; neutronic and thermal hydraulic analyses. This work also has been performed in the framework of RF-India collaboration on the development of LLCB TBM for testing in ITER and corresponding DEMO blanket. The results presented in this article are the proposals for Indian specialists on the improvement of Indian TBM concept to be tested on H/He-phase of ITER operation.

Key words: test blanket module (TBM), ceramic breeder, lead-lithium eutectic, first wall, load-bearing casing, thermal hydraulic analysis, tritium breeding rate, ancillary systems.

ВВЕДЕНИЕ

Испытательный модуль blankets предназначен для эксплуатации в составе внутрикамерных компонентов термоядерного реактора ИТЭР в качестве прототипа воспроизводящего тритий (бридингового) blankets демонстрационного термоядерного реактора (ДЕМО). Обеспечивающие системы ИМБ (системы циркуляции газового и жидкометаллического теплоносителей, системы очистки указанных теплоносителей, система удаления и переработки нарабатываемого трития, системы измерения и контроля рабочих параметров, система дистанционного обслуживания) необходимы для достижения целей экспериментов, проводимых в ИТЭР на ИМБ, и размещаются в специально предусмотренных помещениях либо являются штатным оборудованием реактора ИТЭР. Документ, регламентирующий испытания ИМБ в ИТЭР, носит название «Программа испытаний ИМБ (ТБМ Program)» и является частью исследовательского плана установки ИТЭР [1]. Основополагающие принципы Программы испытаний ИМБ в ИТЭР следующие:

1) ИМБ является прототипом воспроизводящего тритий blankets ДЕМО и устанавливается в экваториальный порт вакуумной камеры реактора ИТЭР с целью оценить приемлемость соответствующей

концепции blankets с точки зрения её последующего применения в энергетических установках на основе термоядерного синтеза;

2) установка ИМБ в ИТЭР и его испытания являются единственной возможностью экспериментальной отработки (в реальных условиях воздействия термоядерной плазмы) прототипа blankets на пути создания демонстрационной термоядерной установки. Таким образом, применительно к ИМБ ИТЭР на различных стадиях эксплуатации обеспечит:

— на начальной водородной (H—He) фазе: необходимые магнитные поля, режимы удержания плазмы, поверхностные тепловые потоки, механические нагрузки от срывов плазмы;

— на дейтериевой (D—D) фазе: в дополнение к перечисленным факторам воздействия — низкие потоки нейтронов, достаточные для проведения нейтронных измерений и верификации результатов нейтронных расчётов;

— на дейтерий-тритиевой (D—T) фазе: в дополнение к факторам водородной и дейтериевой фаз — термоядерные нейтроны с энергией 14 МэВ, объёмное энерговыделение в материалах, наработка трития и, как следствие, возможность отработки тритиевой технологии;

3) для одновременного испытания в ИТЭР предусмотрено шесть типов ИМБ (по количеству соответствующих концепций blankets ДЕМО у стран—участниц проекта);

4) основным ограничением для моделирования условий работы ДЕМО в ИТЭР является существенное различие в параметрах термоядерных установок ИТЭР и ДЕМО: величины нейтронного потока и объёмного энерговыделения в материалах ИТЭР существенно ниже, чем в ДЕМО, а горение плазмы в ДЕМО осуществляется в квазистационарном режиме (в ИТЭР продолжительность горения составляет 400—3000 с). Необходимо испытание различных вариантов ИМБ в зависимости от стадии эксплуатации ИТЭР для поэтапной отработки различных факторов воздействия (нейтронных, термогидравлических, термомеханических и других);

5) применительно к испытаниям ИМБ в ИТЭР фазы эксплуатации согласно пункту 2 подразделяются на две стадии — «Обучение» и «Сбор данных, необходимых для ДЕМО»; продолжительность каждой — около 4 календарных лет.

6) основные задачи стадии «Обучение»:

— отработка вопросов функционирования всех обеспечивающих систем ИМБ в реальных условиях термоядерного реактора (ТЯР);

— сопоставление эксплуатационных пределов (параметров) установки с поставленными перед ИМБ задачами и последующее их обоснование (корректировка, если таковая необходима);

— отработка вопросов интерфейса ИМБ с основными системами ИТЭР (включая влияние металлоконструкций ИМБ на удержание плазмы, а также оценка способности ИМБ выдерживать электромагнитные нагрузки от срывов плазмы);

— сбор и обработка данных, необходимых для лицензирования эксплуатации ИМБ на «ядерной фазе» (начинается с D—D-фазы);

7) основные задачи стадии «Сбор данных, необходимых для ДЕМО»:

— оценка/верификация расчётных кодов и ядерных данных, предназначенных для прогнозирования основных нейтронно-физических параметров ИМБ (нейтронные потоки и спектры, скорость генерации трития, коэффициент размножения нейтронов и эффективность радиационной защиты);

— исследование термомеханики ИМБ в условиях облучения термоядерными нейтронами, оценка работоспособности металлоконструкции и соединений ИМБ в условиях низкого (по сравнению с ДЕМО) флюенса нейтронов;

— демонстрация получения требуемых высоких параметров теплоносителя, а также отработка тритиевой технологии (наработка, выделение, переработка);

— по результатам трёх предыдущих позиций выработать «интегрированный подход» к испытаниям ИМБ, позволяющий получить максимальное количество данных по надёжной и безопасной эксплуатации в ИТЭР прототипов бридингового blankets в условиях, максимально приближенных (кроме нейтронного флюенса) к условиям работы ДЕМО;

8) практическое решение задач, обозначенных для стадий «Обучение» и «Сбор данных, необходимых для ДЕМО», должно быть осуществлено последовательными испытаниями (независимо от разработки

ваемой концепции ИМБ, так как эти задачи можно считать обобщёнными) четырёх вариантов конструкции ИМБ (соответственно фазам работы ИТЭР и целям, которые планируется достичь):

- «Электромагнитный ИМБ» (ЭМ-ИМБ);
- «Нейтронно-тритиевый ИМБ» (НТ-ИМБ);
- «Термомеханический ИМБ» (ТМ-ИМБ);
- «Интегрированный ИМБ» (Инт.-ИМБ);

9) ЭМ-ИМБ — устанавливается с момента старта ИТЭР и испытывается на Н—He-фазе и ранних этапах D—D-фазы (до первой замены дивертора). ЭМ-ИМБ предназначен для исследования поведения конструктивных элементов и систем ИМБ при переходных электромагнитных процессах, влияния металлоконструкций ИМБ на удержание плазменного шнура, а также для сбора информации, необходимой для лицензирования эксплуатации ИМБ на «ядерной» фазе (рис. 1);

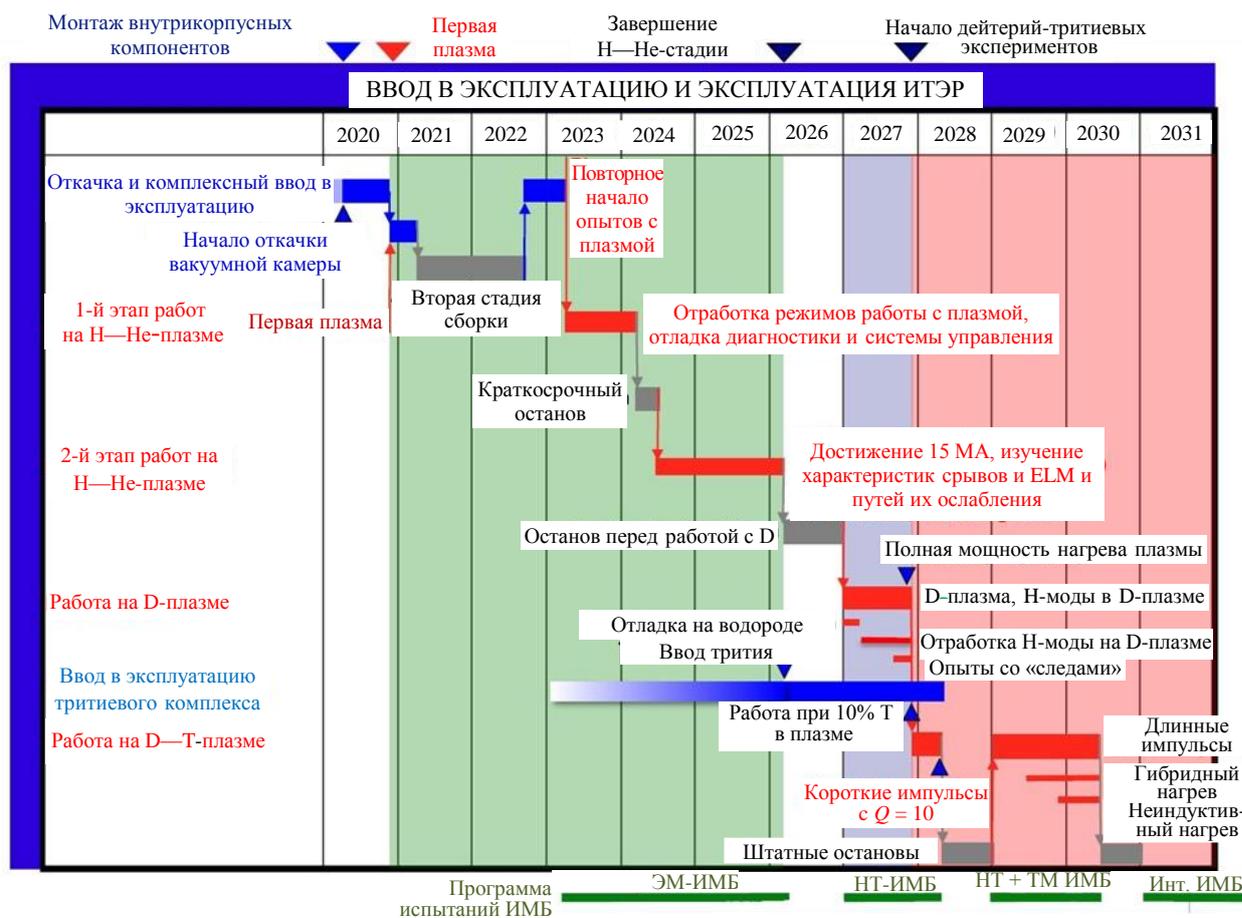


Рис. 1. План-график испытаний ИМБ в ИТЭР

10) НТ-ИМБ — испытывается, начиная с завершающего этапа D—D-фазы на первых этапах D—T-фазы (до первого планового останова ТЯР на D—T-фазе), и предназначен для исследования поведения ИМБ в поле термоядерных нейтронов, а также процессов генерации трития (см. рис. 1);

11) Совместные испытания НТ-ИМБ и ТМ-ИМБ начинаются сразу после завершения эксплуатации НТ-ИМБ. Они нужны для изучения поведения конструктивных элементов и систем ИМБ при температуре, характерной для ДЕМО (см. рис. 1);

12) Инв.-ИМБ — испытывается в ходе завершающих этапов D—T1-фазы и, возможно, на D—T2-фазе и предназначен для демонстрации поведения (с точки зрения получения высоких параметров теплоносителя и реализации тритиевой технологии) прототипа бридингового бланкета на отработанной «ядерной» стадии эксплуатации ИТЭР (см. рис. 1).

ИМБ с керамическим бридером и литий-свинцовой эвтектикой (КБЛСЭ ИМБ) и его обеспечивающие системы устанавливаются в ИТЭР с момента начала эксплуатации с целью оценить приемлемость соответствующей концепции бланкета для будущих термоядерных установок и предназначены для решения следующих задач:

— получение в достаточном объёме экспериментальных данных для демонстрации наработки трития и возможностей его переработки; экспериментальные данные должны быть оценены (экстраполированы) с точки зрения самообеспечения тритием в качестве топлива для энергетических термоядерных установок;

— получение высоких выходных параметров литий-свинцовой эвтектики, достаточных для генерации электроэнергии (применительно к ДЕМО и энергетическим термоядерным установкам);

— демонстрация эффективного теплосъёма с энергонапряжённых конструктивных элементов во всех режимах работы ИТЭР;

— обеспечение целостности конструкции под действием (в различных сочетаниях) механических, тепловых и электромагнитных нагрузок;

— наработка в достаточном количестве экспериментальных данных для верификации, оценки и возможной корректировки расчётных кодов, использованных для Программы испытаний КБЛСЭ ИМБ.

Условия эксплуатации, общие и специальные технические требования, предъявляемые к КБЛСЭ ИМБ и его обеспечивающим системам, подробно представлены в [3]. Наиболее существенные аспекты следующие:

— согласно терминологии, принятой в ИТЭР, металлоконструкция экспериментального порта вакуумной камеры, в которую устанавливаются два ИМБ с сопутствующими металлоконструкциями (рис. 2), носит название портовая пробка; сопутствующие металлоконструкции ИМБ — опорная рама и два блока нейтронной защиты;

— ИМБ по классификации, принятой в Международной организации (МО) ИТЭР, относится к оборудованию, не несущему на себе функций обеспечения безопасности ИТЭР (non-Safety Important Components), опорная рама и блоки нейтронной защиты относятся к числу компонентов, важных для безопасности ИТЭР (Safety Important Components), так как несут на себе функции удержания продуктов активации и трития, а также удержания давления в случае возможных аварийных ситуаций внутри вакуумной камеры;

— системы контуров циркуляции жидкотеплоносителя и газового теплоносителя ИМБ, а также система удаления и переработки нарабатываемого трития относятся к числу компонентов, важных для безопасности ИТЭР (Safety Important Components), так как несут на себе функции удержания продуктов активации и трития и удержания давления в случае возможных аварийных ситуаций внутри вакуумной камеры.

Конструкция ИМБ и обеспечивающих систем должна обеспечивать:

— работоспособность в течение срока эксплуатации, приведенного в [1], и согласно рис. 1 в стационарных и переходных режимах работы, в условиях нормальной эксплуатации, при отклонениях от нормальной эксплуатации, а также в режиме перегрузки внутрикамерного оборудования;

— работоспособность при сейсмических воздействиях, соответствующих SL-1 (проектное землетрясение с вероятностью 10^{-2} /год согласно [2]);

— целостность конструкции и удержание радиоактивности при сейсмических воздействиях, соответствующих SL-2 (максимальное проектное землетрясение с вероятностью 10^{-4} /год согласно [2]);

— периодическую замену ИМБ в соответствии с [1] и согласно рис. 1.

В рамках сотрудничества по Программе испытаний ИМБ российской стороной на правах партнера были разработаны различные варианты конструктивных схем КБЛСЭ ИМБ [5]. Данная концепция ИМБ («Лидер» — Республика Индия) предполагает использование двух типов тритийвоспроизводящего ма-

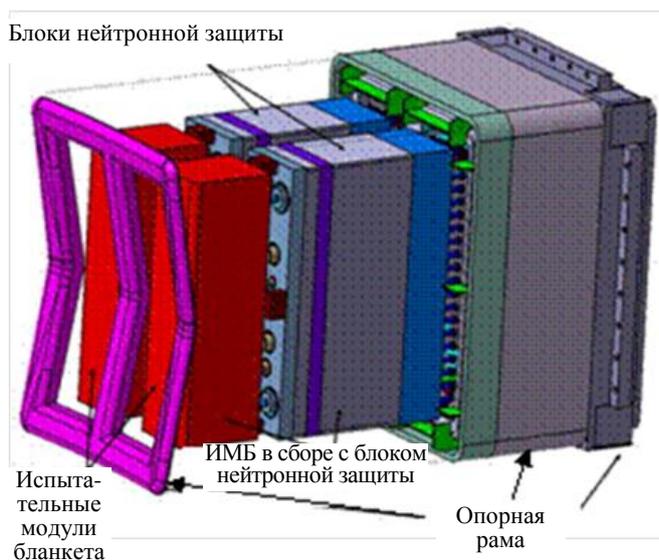


Рис. 2. Компоновка портовой пробки с ИМБ в экспериментальном порту ИТЭР

териала (бридера): твердотельный керамический и собственно эвтектический теплоноситель, в котором также осуществляются наработка трития и размножение нейтронов.

Особенности концепции КБЛСЭ ИМБ:

— возможность регулирования в процессе эксплуатации необходимого содержания изотопа ${}^6\text{Li}$ в циркулирующем эвтектическом теплоносителе/бридере, компенсируя тем самым эффект выгорания данного изотопа в стационарном керамическом бридере;

— возможность одновременной экспериментальной отработки двух термоядерных технологий (с газовым и жидкометаллическим теплоносителями) в составе единой конструкции, а также оценки целесообразности их совместного использования в проектах blankets перспективных термоядерных установок;

— отказ от использования токсичного бериллиевого размножителя нейтронов, что делает проект привлекательным с точки зрения безопасности. Описание конструкции ИМБ индийской разработки подробно представлено в отчёте [4], а предварительный анализ с точки зрения оптимизации рабочих параметров и конструктивной схемы — в статье [5]. Общий вид ИМБ индийской разработки и схема циркуляции PbLi -эвтектики, взятые из [4], для наглядности представлены на рис. 3, 4. Согласно рис. 3 и 4 КБЛСЭ ИМБ — прочно-плотная сварная металлоконструкция (конструкционный материал — низкоактивируемая ферритно-мартенситная сталь индийской разработки — IN-RAFMS), внутри которой организована последовательная циркуляция PbLi -эвтектики в преимущественно полоидальном направлении

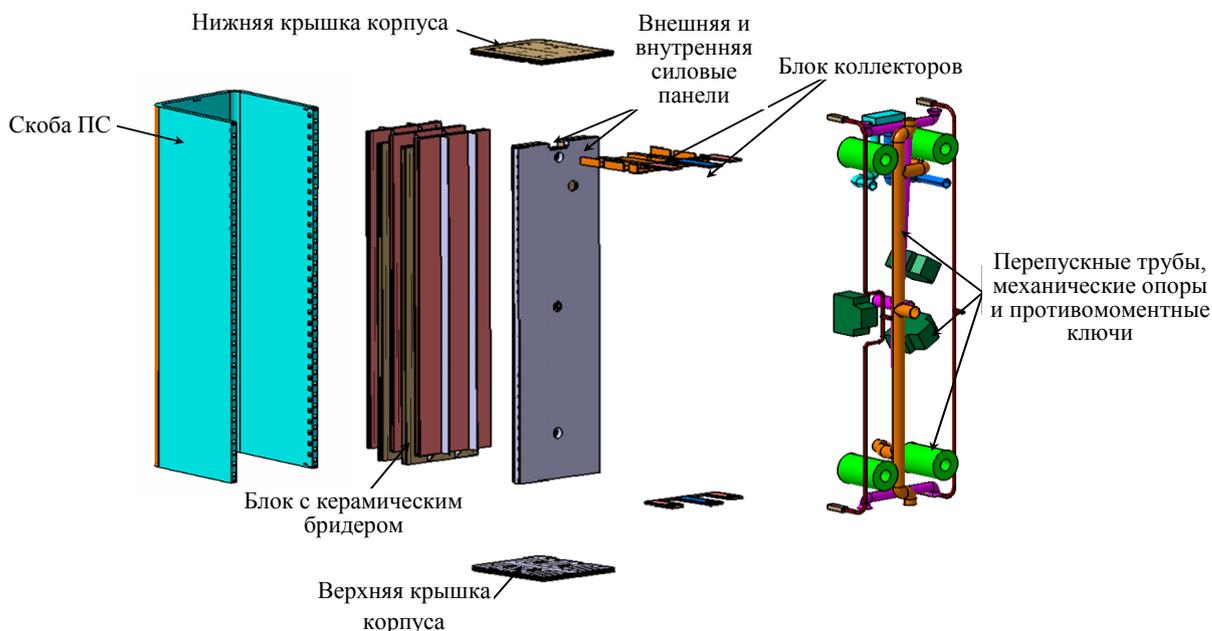


Рис. 3. Основные элементы конструкции индийского КБЛСЭ ИМБ

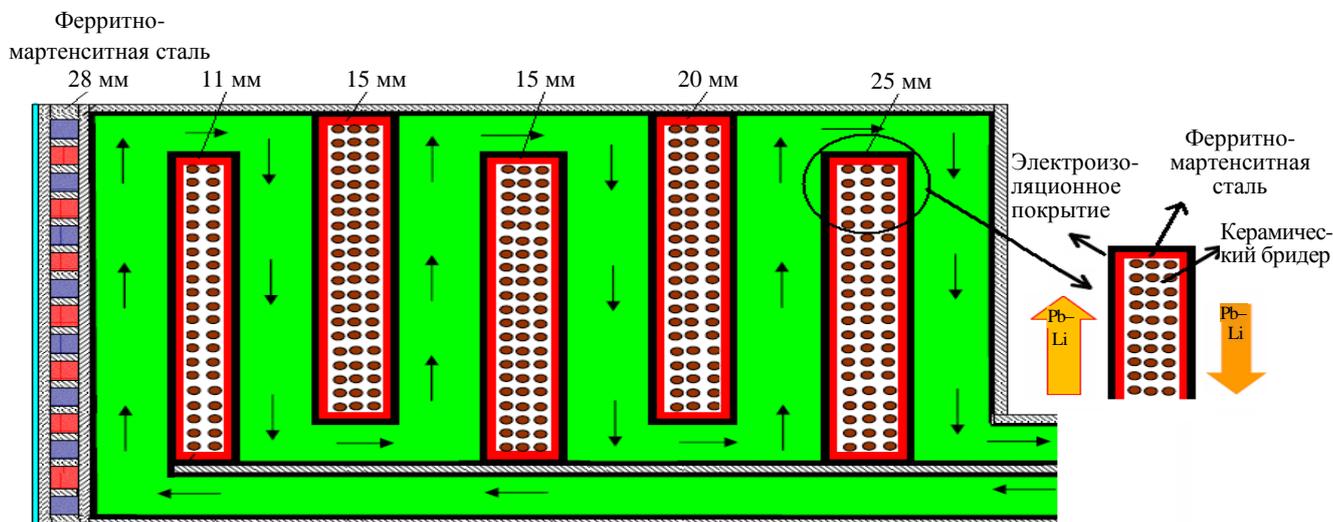


Рис. 4. Схема индийской концепции КЛС ИМБ

(см. рис. 3). Предполагается, что для снижения МГД-потерь на прокачку жидкометаллического теплоносителя/бридера в магнитном поле установки ИТЭР весь тракт циркуляции эвтектики будет снабжён специальным электроизоляционным покрытием (например, оксид алюминия). В самой металлоконструкции (первая стенка, верхняя и нижняя крышки корпуса и тыльная плита) предусмотрены каналы гелиевого теплоносителя и коллекторы высокого давления. Между каналами эвтектики расположены слои керамической (титанат лития) засыпки, через которую, в свою очередь, организована циркуляция газа-носителя (гелий под давлением 0,2 МПа) для извлечения наработанного трития. Система фиксации ИМБ на опорной раме экспериментального порта предполагает использование четырёх механических опор (для восприятия радиальных сжимающих/отрывных усилий и компенсации разности термических расширений первой стенки и тыльных металлоконструкций) и трёх ключей (для восприятия радиального и полоидального крутящих моментов, возникающих при срывах плазмы). Габаритные размеры индийского ИМБ согласно [4] (полоидальный×тороидальный×радиальный соответственно) 1660×484×570 мм. Расчётные рабочие параметры ИМБ (индийский вариант), представленные в табл. 1, были использованы в качестве исходных данных для последующего анализа и конструктивной модернизации.

Т а б л и ц а 1. Параметры КБЛСЭ ИМБ индийского и российского проектов

Параметр	Индийский вариант	Проект РФ (2010—2011 гг.)
Входная температура гелиевого теплоносителя, °С	300	325
Выходная температура гелиевого теплоносителя, °С	362	387
Расход гелиевого теплоносителя, кг/с	—	1,65
Входная температура PbLi, °С	325	325
Выходная температура PbLi, °С	460	496
Подогрев PbLi в подъемных трактах, °С	Последовательное течение PbLi	~127
Подогрев PbLi в опускных трактах, °С		~46
Расход PbLi, кг/с	17,48	10,93
Максимальная скорость PbLi в тракте ИМБ, мм/с	10	76
МГД-потери давления в тракте ИМБ с изоляцией/без изоляции, кПа	450	71/152
Максимальная температура на границе «PbLi—ферритная сталь», °С	439,5	496,5
Максимальная температура керамики, °С	489—501	767
Суммарная толщина керамики, мм	86	202
Суммарная тепловая мощность ЗВТ, кВт	420	353
Суммарная тепловая мощность ИМБ за счёт нейтронного нагрева, кВт	616	584/592*
Тепловая мощность на ПС при тепловом потоке 0,5 МВт/м ² , кВт	~400	~400
Скорость наработки трития в ИБМ, Т/с	2,06·10 ¹⁷	2,07·10 ¹⁷ /1,93·10 ¹⁷ **

* Больше значение соответствует 20%-ной пористости засыпки керамического бридера, меньшее — 40%-ной пористости.

** Больше значение скорости наработки трития соответствует 20%-ной пористости засыпки керамического бридера, меньшее — 40%-ной пористости.

Необходимо отдельно подчеркнуть, что Программа испытаний ИМБ в ИТЭР (независимо от разрабатываемой концепции) предполагает соответствующий проект бланкета для перспективного демонстрационного ДЕМО (установка, обладающая высоким КПД преобразования энергии термоядерного синтеза в высокопотенциальное тепло и далее — в электрическую энергию). Таким образом, перед ИМБ ставится целый ряд принципиальных задач по отработке в условиях термоядерной плазмы ИТЭР базового конструктивного элемента (прототипа) бланкета ДЕМО. Основной сложностью при решении указанных задач экспериментальным путём является различие параметров установок ИТЭР и ДЕМО (в частности, ДЕМО предполагает существенно более высокий поток и флюенс быстрых термоядерных нейтронов, квазистационарный режим работы аппарата, более высокие выходные параметры теплоносителя первого контура и т.д.). Соответственно, при проведении испытаний ИМБ в ИТЭР (независимо от разрабатываемой концепции) необходимо обеспечить релевантность (корреляцию) получаемых результатов с параметрами бланкета ДЕМО. Стратегия индийской стороны по обеспечению данной релевантности ИМБ и бланкета ДЕМО применительно к керамической литий-свинцовой концепции также представлена в [4]. Результаты работ российских специалистов по концепции бланкета ДЕМО с керамическим бридером и жидкометаллическим теплоносителем представлены в [5]. Материалы указанных расчётно-

конструкторских исследований позволили сформулировать основные направления сотрудничества с индийскими коллегами по модернизации конструкции КБЛСЭ ИМБ в части сохранения/обеспечения релевантности с соответствующим проектом бланкета ДЕМО.

Основными предлагаемыми нашей страной усовершенствованиями конструкции индийского ИМБ являются отказ от последовательной схемы циркуляции эвтектики и переход на две зоны (подъёмного и опускного течения) с циркуляцией в системе параллельных прямоугольных каналов (последовательно-параллельная схема течения). Согласно расчётам, проведённым специалистами НИИЭФА им. Д.В. Ефремова [5], указанное размещение керамики в сочетании с последовательно-параллельной схемой течения эвтектики позволит существенно повысить удельную скорость наработки трития и снизить МГД-потери давления при движении эвтектики в пологойальных прямоугольных каналах по сравнению с индийским вариантом. Проектирование зоны воспроизводства трития (ЗВТ) КБЛСЭ ИМБ производилось из расчёта обеспечить одинаковые потери давления и одинаковый подогрев эвтектики во всех параллельных каналах как при подъёмном, так и при опускном движении. Кроме того, керамические блоки ЗВТ размещены в зоне подъёмного течения эвтектики, а радиальная толщина каждого блока спрофилирована в соответствии с результатами нейтронно-физического расчёта на предмет увеличения скорости генерации трития, снижения процента выгорания ядер ${}^6\text{Li}$ в процессе эксплуатации и, соответственно, повышения ресурса керамических блоков как тритийвоспроизводящих элементов.

Для проведения оптимизационных расчётов принимались во внимание следующие ограничения по температурам основных используемых материалов [7]:

- Li_2TiO_3 — не более 920 °С;
- интерфейс «PbLi — ферритно-мартенситная сталь» — не более 500 °С;
- ферритно-мартенситная сталь — не более 550 °С;
- бериллиевое покрытие первой стенки ИМБ — не более 660 °С.

Рассмотренные в [5] конструктивные схемы ЗВТ ИМБ российской разработки, а также различные варианты тракта гелиевого теплоносителя позволили провести их сравнительный анализ с точки зрения нейтронно-физических, теплогидравлических и прочностных характеристик. По результатам указанного анализа выбран оптимальный (для настоящего этапа работ) вариант компоновки ИМБ, конструкция которого является предложением индийской стороне по модернизации их разработок по концепции как КБЛСЭ ИМБ, так и соответствующего бланкета демонстрационного термоядерного реактора. Представленные далее материалы служат базисом для дальнейшей разработки эскизного проекта (ЭП) ИМБ и его обеспечивающих систем. В табл. 1 для удобства сравнения приведены параметры КБЛСЭ ИМБ индийского и российского проектов на настоящем этапе совместной разработки указанной концепции.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ИМБ

В [5] подробно представлены и описаны варианты конструкции ИМБ (рассматривались различные схемы ЗВТ, а также производился выбор оптимальной конфигурации тракта газового охлаждения корпуса ИМБ), для которых был произведён сравнительный анализ по всему комплексу характеристик с целью выбора оптимальной (для данного этапа проектирования) компоновки модуля. Независимо от рассматриваемого варианта конструкция ИМБ включает следующие элементы (рис. 5, 6):

- первая стенка (ПС);
- верхняя и нижняя крышки корпуса ИМБ;
- блок с керамическим бридером;

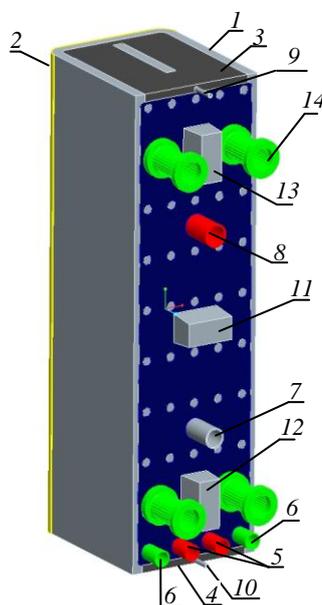


Рис. 5. Общий вид КБЛСЭ ИМБ: 1 — скоба ПС; 2 — защитное покрытие ПС; 3 — верхняя крышка корпуса ИМБ; 4 — нижняя крышка корпуса ИМБ; 5 — выходные патрубки PbLi-эвтектики; 6 — входные патрубки PbLi-эвтектики; 7 — входной патрубок He-теплоносителя; 8 — выходной патрубков He-теплоносителя; 9 — входной патрубок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

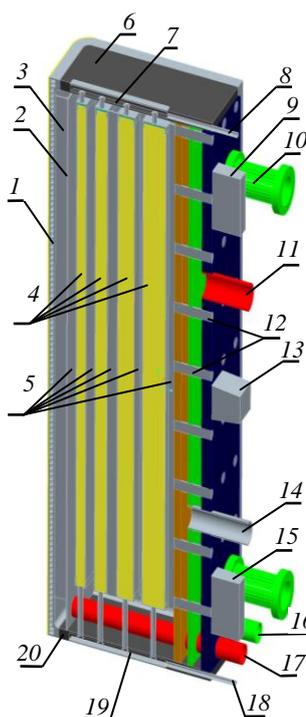


Рис. 6. Полоидальный (продольный) разрез КБЛСЭ ИМБ: 1 — ПС; 2 — разделительная перегородка зон течения эвтектики; 3 — зона опускного течения эвтектики; 4 — блок с керамическим бриджем; 5 — каналы зоны подъёмного течения эвтектики; 6 — верхняя крышка; 7 — входной коллектор газа-носителя; 8 — входной патрубок газа-носителя; 9 — верхний противомоментный ключ; 10 — гибкая механическая опора; 11 — выходной патрубков газового теплоносителя; 12 — рёбра жёсткости блока газовых коллекторов; 13 — центральный противомоментный ключ; 14 — входной патрубков газового теплоносителя; 15 — нижний противомоментный ключ; 16 — входной патрубков эвтектики; 17 — выходной патрубков эвтектики; 18 — выходной патрубков газа-носителя; 19 — выходной коллектор газа-носителя; 20 — нижняя крышка

- межканальные перегородки;
- входной/выходной коллекторы PbLi-эвтектики и соответствующие патрубки;
- входной/выходной коллекторы He-теплоносителя и соответствующие патрубки;
- входной/выходной коллекторы газа-носителя и соответствующие патрубки;
- система крепления ИМБ на опорной раме;
- элементы системы диагностики.

Схемы циркуляции используемых теплоносителей окончательно определены для этапа технического предложения и описаны далее. Эвтектический теплоноситель подаётся в ЗВТ по двум входным патрубкам ($\varnothing 56 \times 3$ мм) и через входной коллектор зоны подъёмного течения поступает в параллельные каналы зоны подъёмного течения. Далее через выходной коллектор зоны подъёмного течения и входной коллектор зоны течения опускного эвтектика поступает в выходной коллектор и выводится из ЗВТ ИМБ через два вы-

ходных патрубков (их размер идентичен размеру входных патрубков). Гелиевый теплоноситель используется для охлаждения металлоконструкции корпуса и нагнетается через входной патрубок ($\varnothing 70 \times 5$ мм) в плоский входной коллектор, расположенный в тыльной части ИМБ, далее поступает в каналы охлаждения первой стенки и верхней и нижней крышек корпуса. После прохождения корпуса ИМБ гелий собирается в плоский выходной коллектор и через выходной патрубок ($\varnothing 80 \times 5$ мм) выводится из модуля. Ввиду высокого давления He-теплоносителя блок коллекторов имеет цилиндрические рёбра жёсткости ($\varnothing 30$ мм), на которые в процессе сборки «нанализываются» коллекторные перегородки. Некоторые из рёбер жёсткости использованы для размещения элементов системы диагностики. Характерные фрагменты конструкции, виды и сечения КБЛСЭ ИМБ представлены на рис. 7—12.

В варианте конструкции КБЛСЭ ИМБ, рассматриваемой в данной статье, интерфейс, определяемый системой крепления на опорной раме экспериментального порта и коммуникациями обеспечивающих систем, сохранён в соответствии с требованиями [3].

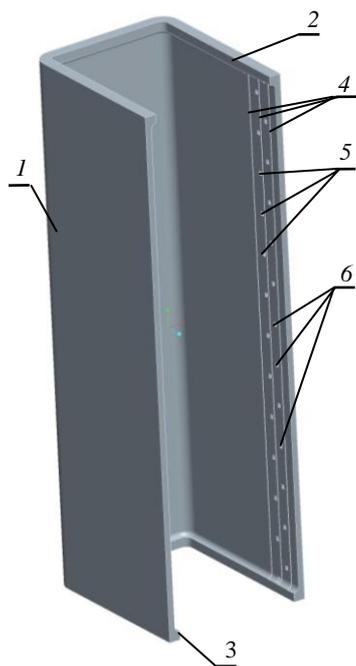


Рис. 7. Скоба первой стенки корпуса ИМБ: 1 — скоба первой стенки; 2 — верхний фланец; 3 — нижний фланец; 4 — технологические ступеньки под приварку коллекторных перегородок блока газовых коллекторов; 5 — входные отверстия змеевиковых каналов газового теплоносителя; 6 — выходные отверстия змеевиковых каналов газового теплоносителя

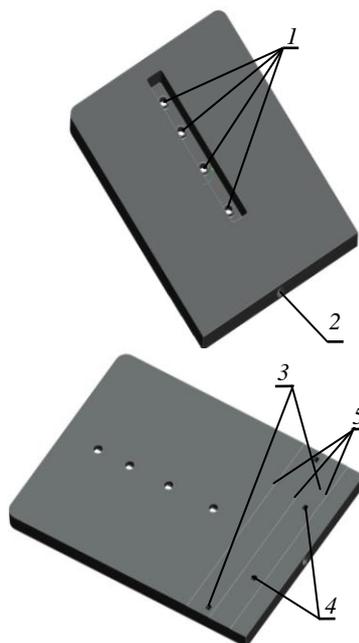


Рис. 8. Конструктивные элементы крышки корпуса ИМБ: 1 — отверстия под приварку трубок газа-носителя; 2 — отверстие под установку входного патрубка газа-носителя; 3 — вход газового теплоносителя; 4 — выход газового теплоносителя; 5 — технологические ступеньки под приварку перегородок блока газовых коллекторов

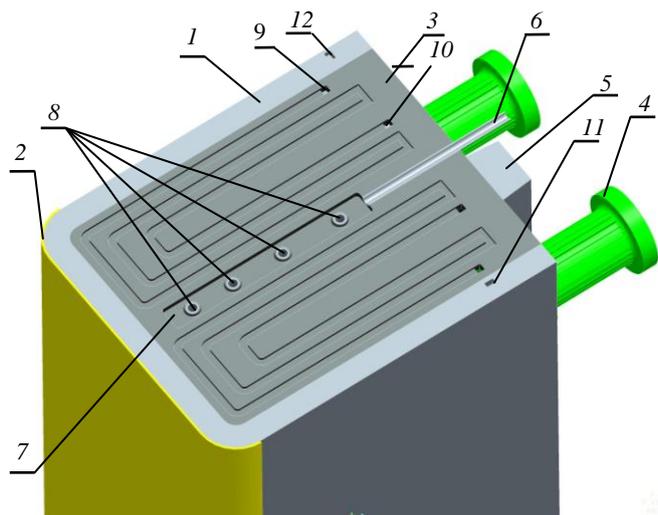


Рис. 9. Поперечный разрез КЛС ИМБ по каналам охлаждения верхней крышки: 1 — скоба ПС; 2 — защитное бериллиевое покрытие; 3 — верхняя крышка корпуса ИМБ; 4 — гибкая механическая опора; 5 — верхний противомоментный ключ; 6 — входной патрубок газа-носителя; 7 — входной коллектор газа-носителя; 8 — входные трубки газа-носителя в ЗВТ; 9 — вход теплоносителя в канал охлаждения крышки; 10 — выход теплоносителя из канала охлаждения крышки; 11 — вход теплоносителя в канал охлаждения фланца скобы ПС; 12 — выход теплоносителя из канала охлаждения фланца скобы ПС

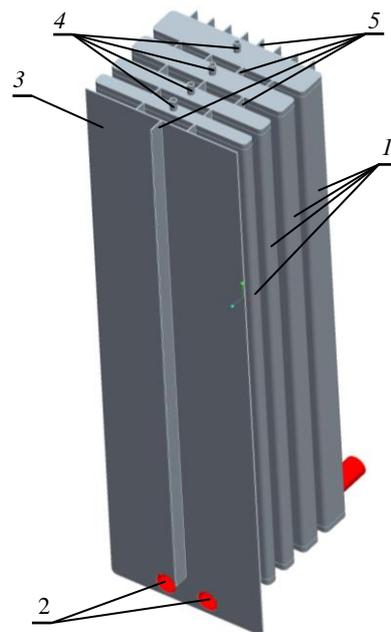


Рис. 10. Блок с керамическим бридером в сборе с межканальными перегородками и патрубками PbLi-эвтектики (вид со стороны ПС): 1 — канистры, заполненные керамическими гранулами (Li_2TiO_3); 2 — выходные патрубки PbLi-эвтектики; 3 — разделительная перегородка зон течения PbLi-эвтектики; 4 — входные трубки газа-носителя в ЗВТ; 5 — межканальные перегородки

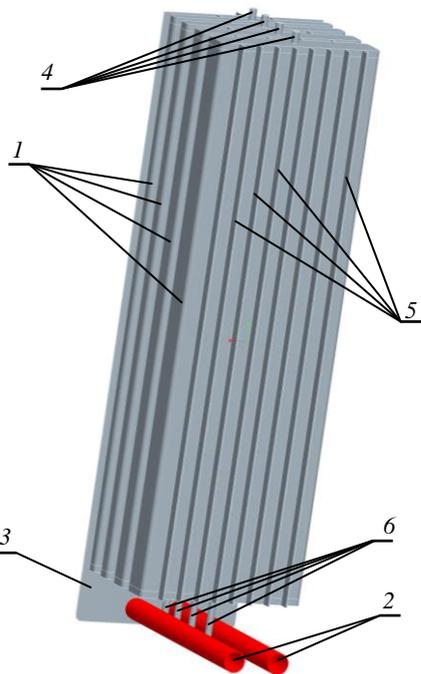


Рис. 11. Блок с керамическим бридером в сборе с межканальными перегородками и патрубками PbLi-эвтектики (вид со стороны вакуумной камеры): 1 — канистры, заполненные керамическими гранулами (Li_2TiO_3); 2 — выходные патрубки PbLi-эвтектики; 3 — разделительная перегородка зон течения PbLi-эвтектики; 4 — трубки входа газа-носителя в ЗВТ; 5 — межканальные перегородки зоны подъёмного течения эвтектики; 6 — трубки выхода газа-носителя из ЗВТ

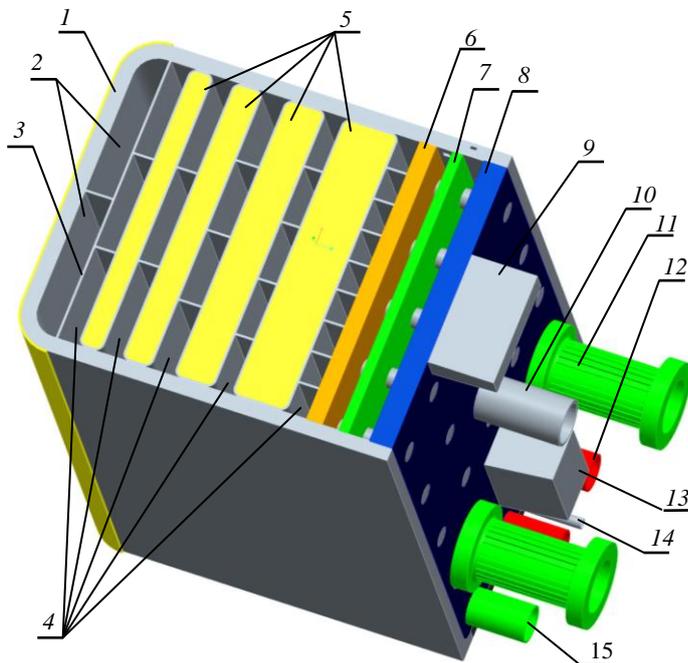


Рис. 12. Поперечный разрез ИМБ: 1 — ПС; 2 — зона опускного течения эвтектики; 3 — разделительная перегородка зон течения эвтектики; 4 — каналы зоны подъёмного течения эвтектики; 5 — блок с керамическим бридером; 6 — перегородка зоны подъёмного течения эвтектики и входного коллектора газового теплоносителя; 7 — перегородка блока газовых коллекторов; 8 — тыльная плита корпуса ИМБ; 9 — верхний противомоментный ключ; 10 — выходной патрубок газового теплоносителя; 11 — гибкая механическая опора; 12 — выходной патрубок эвтектики; 13 — центральный противомоментный ключ; 14 — выходной патрубок газа-носителя; 15 — входной патрубок эвтектики

Система фиксации (крепления) собственно КБЛСЭ ИМБ включает три противомоментных ключа (один центральный, верхний и нижний) для восприятия полоидального и радиального крутящих моментов, возникающих при срывах плазмы, а также четыре гибких механических опоры — для восприятия отрывающей/сжимающей силы и компенсации разности термических расширений первой стенки ИМБ и его тыльных металлоконструкций.

Противомоментные ключи — идентичные призматические металлоконструкции размером 170×100 мм и толщиной в радиальном направлении ~80 мм, привариваемые силовыми швами по периметру к тыльной стенке ИМБ. Независимо от расположения (тороидально или полоидально) ключи имеют клинообразные скосы в радиальном направлении. На данные скосы планируется крепить бронзовые накладки для обеспечения необходимых характеристик контакта с ответными поверхностями на опорной раме. Центральный ключ размещён на пересечении тороидальной и полоидальной осей симметрии тыльной стенки ИМБ, верхний и нижний — разнесены по высоте на расстояние 600 мм от тороидальной оси модуля (см. рис. 5, 6).

Гибкие механические опоры — цилиндрические металлоконструкции (габариты: Ø130, высота 320 мм, конструкционный материал — высокопрочный никелевый сплав Inconel 718), снабжённые крепёжными фланцами для фиксации шпильками. Средняя (расположенная между крепёжными фланцами) часть имеет уменьшенный диаметр (внешний Ø90 мм, внутренний — 70 мм) и снабжена продольными прорезями шириной 3 мм. Прорези расположены равномерно по окружности, формируя систему из 30 спиц для обеспечения требуемой «гибкости» в поперечном и продольном направлениях (см. рис. 5, 6). Рассматриваемые гибкие механические опоры являются конструктивным аналогом устройств, используемых для крепления защитных модулей blankets ИТЭР.

Несущий (силовой) корпус ИМБ включает скобу ПС, верхнюю и нижнюю крышки, блок коллекторов гелиевого теплоносителя, соединённые сваркой в прочно-плотную коробчатую металлоконструкцию (см. рис. 6). Конструктивно ПС реализована в виде скобы (суммарная толщина 22,5 мм) с вертикально ориентированными полками, в которой размещаются тороидальные прямоугольные (10×12 мм) каналы гелиевого теплоносителя. Согласно имеющемуся в России опыту изготовления подобных конструкций предполагается использование таких технологических методов, как механическая обработка, гибка и горячее изостатическое прессование (ГИП). Скоба, в свою очередь, является металлоконструкцией, сформированной из двух листов (гнутого толщиной 3 мм и гнуто-фрезерованного толщиной 17,5 мм), соединённых ГИП-методом в газостате. Независимо от рассматриваемых модификаций корпуса ИМБ в конструкции скобы ПС предусмотрены следующие элементы (см. рис. 7):

— верхний и нижний фланцы, обращённые внутрь скобы (толщина 30, ширина 15 мм), под сварку с верхней и нижней крышками;

— технологические ступеньки по высоте полок скобы (ширина 0,5 мм) под приварку коллекторных перегородок (см. рис. 7);

— защитное покрытие на фронтальной (обращённой к плазме) части скобы (слой бериллия толщиной 3 мм наносится методом вакуумного напыления).

Разрабатываемая технология сборки ИМБ предполагает использование ПС в качестве базового элемента.

Особенность конструкторского подхода, используемого на данном этапе разработки проекта ИМБ, — отказ от использования электроизоляционного покрытия на всех поверхностях проточной части ИМБ, контактирующих с PbLi-эвтектикой. Это конструкторское решение продиктовано технологическими сложностями при нанесении указанного покрытия, а также при повторном его нанесении в местах расположения сварных швов. Кроме того, согласно результатам расчётов, выполненных специалистами ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» [5], суммарные МГД-потери давления при циркуляции эвтектического теплоносителя по неизолированному тракту ИМБ составляют около 152 кПа, что является приемлемым с точки зрения имеющегося машинного оборудования (МГД-насосов).

Окончательно определена компоновка тракта гелиевого охлаждения ПС ИМБ — 25 параллельных 4-заходных змеевиковых каналов в регулярной части скобы и по одному 2-заходному змеевиковому каналу во фланцах скобы. Выбор данной схемы циркуляции основан на сравнительной оценке теплогидравлических параметров тракта охлаждения корпуса ИМБ в различных модификациях. Вариант

4-заходных змеевиковых каналов охлаждения скобы ПС обеспечивает приемлемый уровень температур всех материалов, используемых в конструкции ИМБ, а также приемлемые потери давления на прокачку гелиевого теплоносителя. Более подробно теплогидравлические параметры гелиевого тракта охлаждения КБЛСЭ ИМБ представлены в разделе «Анализ теплогидравлических параметров ИМБ». Основные геометрические характеристики и физические особенности выбранной схемы циркуляции:

— циркуляция в соседних змеевиковых каналах — по принципу противотока, поэтому каналы условно разделены на «нечётные» (вход теплоносителя на левой полке скобы ПС) и «чётные» (вход теплоносителя на правой полке скобы ПС);

— шаг между однотипными змеевиковыми каналами в пределах каждой из полок скобы ПС по высоте 128 мм;

— шаг между соседними каналами в пределах каждого змеевика 16 мм;

— размер по высоте, занимаемый каждым змеевиковым каналом, 60 мм.

Верхняя и нижняя крышки корпуса ИМБ идентичны по конструктивному исполнению и представляют собой плиты толщиной 30 мм, в которых выполнены по два канала гелиевого охлаждения (каналы по размерам идентичны каналам охлаждения ПС — 10×12 мм) в виде многоколенных змеевиков (см. рис. 9). Результат оценки теплогидравлических параметров тракта охлаждения несущего корпуса ИМБ показал, что оптимальная схема циркуляции гелиевого теплоносителя в верхней и нижней крышках — два 3-коленных змеевиковых канала, симметрично расположенных относительно радиальной плоскости симметрии ИМБ (см. рис. 9). Каналы охлаждения крышек корпуса ИМБ так же, как и каналы охлаждения скобы ПС, гидравлически соединены с блоком коллекторов газового теплоносителя, поэтому они принимались во внимание при профилировании распределения расходов теплоносителя по системе параллельных каналов охлаждения (25 регулярных змеевиковых каналов охлаждения скобы ПС, два канала охлаждения фланцев скобы и четыре змеевиковых канала охлаждения крышек корпуса). Выбранная схема циркуляции и конфигурация каналов охлаждения позволили обеспечить благоприятное распределение температур в конструктивных элементах ИМБ. Ввиду сложной конфигурации трактов охлаждения крышки корпуса ИМБ выполнены путём соединения двух листов толщиной 10 и 20 мм с фрезерованными трактами охлаждения ГИП-методом. В центральной части каждой из крышек выполнены полости под коллекторы газа-носителя (в верхней крышке — входной, в нижней — выходной коллектор). Данная полость выполняется фрезерованием, в нижней части полости выполняются сверления под трубки подачи/отвода газа-носителя, при фрезеровании полости выполняются также цилиндрические усиления под сварку с трубками газа-носителя (см. рис. 8, 9). Для организации входного/выходного патрубков газа-носителя в крышках корпуса глубоким сверлением с тыльного торца крышек выполняются отверстия, в которые затем вставляются трубки $\varnothing 16 \times 2$ мм. Трубки завариваются прочно-плотным швом с фронтального торца внутри коллекторной полости, а также на тыльных торцах крышек. Герметизация коллекторных полостей газа-носителя (приварка крышек) производится после сварки верхней и нижней крышек (в сборе с блоком керамического бридера) с фланцами скобы ПС.

Блок с керамическим бридером, размещаемый в ЗВТ ИМБ, — набор четырёх канистр (радиальная толщина составляет 36, 45, 60 и 81 мм соответственно) высотой 1456 мм, изготовленных из листа толщиной 3 мм с помощью операций гибки и сварки. После формирования боковой поверхности канистры (гибка листа) к ней приваривается нижнее днище с нижним сетчатым элементом, после чего на вибростенде происходит процесс заполнения внутреннего пространства канистры керамической засыпкой (гранулы $\varnothing 0,5$ —1 мм). Далее герметично привариваются верхний сетчатый элемент и верхнее днище. Особенностью конструкции керамического блока является наличие на внешней поверхности канистр межканальных перегородок для формирования трактов жидкого металла. Кроме того, как уже ранее отмечалось, электроизоляционное покрытие на поверхности канистр и межканальных перегородок наноситься не будет (электроизоляционное покрытие следует нанести лишь на внутренние поверхности патрубков подвода и отвода PbLi-эвтектики). Отказ от использования электроизоляционного покрытия в проточной части ИМБ позволит существенно упростить технологию изготовления и сборки его металлоконструкции, обеспечив при этом приемлемый уровень МГД-потерь давления на прокачку эвтектики. В верхние и нижние днища канистр ввариваются входные/выходные трубки газа-носителя ($\varnothing 16 \times 2$ мм), по две трубки на каждую канистру. Блок с керамическим бридером в сборе с разделительной перегородкой зон подъемного и опускного

течения эвтектики и межканальными перегородками представлен на рис. 10, 11. В настоящее время специалистами ОАО «НИКИЭТ» прорабатывается технологический подход, согласно которому канистры монтируются поочередно внутрь скобы ПС, причём каждая канистра после монтажа приваривается двумя герметизирующими швами по высоте к скобе ПС. Данная технологическая операция осуществляется с целью исключить возможные перетекания эвтектики между соседними каналами ЗВТ. Следует отдельно подчеркнуть, что возрастание радиальной толщины канистр по мере увеличения расстояния от ПС — профилирование по результатам нейтронно-физического расчёта, основными задачами которого являются:

- минимизация МГД-потерь давления на прокачку жидкометаллического теплоносителя (жидкого бридера) в магнитном поле установки;
- повышение скорости наработки трития в ИМБ;
- обеспечение выходной температуры эвтектики на уровне ~ 500 °С при одновременном соблюдении приведённых температурных ограничений.

В настоящее время конструкция блока с керамическим бридером изменена с целью оптимизации гидравлических характеристик ЗВТ: увеличена общая высота блока (до 1456 мм), уменьшена до 20 мм высота верхней перепускной камеры эвтектического теплоносителя, а также увеличена высота входного коллектора эвтектического теплоносителя (см. рис. 6). Оптимизированный вариант конструкции блока с керамическим бридером в сборе с конструкцией несущего корпуса ИМБ представлен на рис. 12.

РЕЗУЛЬТАТЫ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОГО РАСЧЁТА ИМБ

Целью данного расчёта является оценка изменений основных нейтронных характеристик ИМБ в зависимости от степени обогащения керамики по изотопу ${}^6\text{Li}$ и плотности её упаковки.

В результате проведённой расчётной оптимизации ЗВТ ИМБ (рис. 13) имеет размеры в полоидальном×тороидальном×радиальном направлениях (без учёта коллекторов эвтектики) 1540×439×432 мм, сам ИМБ — 1656×484×570 мм, при этом суммарная радиальная толщина керамических слоев составляет 202 мм.

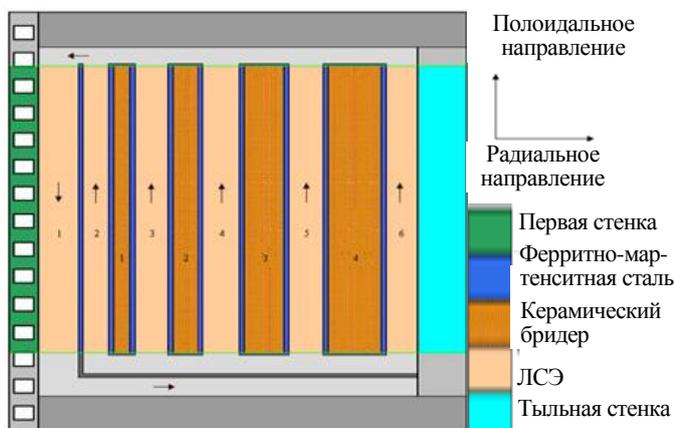


Рис. 13. Модель ИМБ для нейтронного анализа

Расчёт функционалов полей излучения в материалах конструкции ИМБ проводился на основе официальной модели реактора ИТЭР. Эта полномасштабная секторная модель (раствор сектора составляет 20° в азимутальном направлении) включает в себя все основные компоненты и системы реактора. Её отличие от других моделей реактора ИТЭР заключается в том, что область экваториального порта полностью включается в модель, а прилегающие к ней в азимутальном направлении соседние порты считаются однотипными по наполнению. Поэтому область расчёта ($1/18$ часть машины) ограничивается одним 20° -ным сектором при условиях отражения на его боковых границах и

вакуумным граничным условием на внешней границе. Расчёт проводился по программе MCNP5 с рекомендованной для использования в процессе проектирования ИТЭР системой ядерных констант FENDL. В результате расчётов детально оценено радиационное энерговыделение в материалах конструкций элементов модуля и опорной рамы экспериментального порта, а также скорости наработки атомов трития в материалах ИМБ. Модель ИМБ располагалась как в левой, так и в правой половине горизонтального порта (взгляд со стороны вакуумной камеры на плазму), причём в левой половине расположен ИМБ в рассматриваемом варианте конструкции ЗВТ, а правая ниша порта была занята ИМБ в компоновке ЗВТ согласно [5].

В табл. 2 показаны основные параметры рассматриваемых вариантов компоновки ЗВТ ИМБ, в табл. 3 приводится распределение материалов в ЗВТ в радиальном направлении.

В табл. 4 приведены значения удельного и полного энерговыделения в опорной раме порта, в табл. 5—7 даётся распределение этих величин в основных конструкционных материалах элементов ИМБ.

Т а б л и ц а 2. Основные параметры вариантов компоновки ЗВТ ИМБ

Параметр	Номер варианта			
	1	2	3	4
Толщина первой стенки ИМБ, мм	22,5	22,5	22,5	22,5
Толщина боковых стенок ИМБ, мм	22,5	22,5	22,5	22,5
Толщина стенок каналов ИМБ, мм	3	3	3	3
Полная толщина эвтектики, см	19,5	19,5	19,1	19,1
Полная толщина керамики, см	19,8	19,8	20,2	20,2
Обогащение эвтектики, %	90	90	90	90
Обогащение керамики, %	50	90	90	90
Пористость керамики, %	20	20	20	40

Т а б л и ц а 3. Подробное распределение материалов в ЗВТ ИМБ в радиальном направлении

Зона	Номер варианта			
	1, 2		3, 4	
	Положение границ, м		Положение границ, м	
	Левая	Правая	Левая	Правая
Первая стенка	0	0,0225	0	0,0225
Канал 1 (жидкий металл)	0,0225	0,071	0,030	0,071
Стенка канала	0,071	0,074	0,071	0,074
Канал 2 (жидкий металл)	0,074	0,105	0,074	0,104
Стенка канала	0,105	0,108	0,104	0,107
Керамическая вставка 1	0,108	0,138	0,107	0,137
Стенка канала	0,138	0,141	0,137	0,140
Канал 3 (жидкий металл)	0,141	0,171	0,140	0,170
Стенка канала	0,171	0,174	0,170	0,173
Керамическая вставка 2	0,174	0,213	0,173	0,212
Стенка канала	0,213	0,216	0,212	0,215
Канал 4 (жидкий металл)	0,216	0,250	0,215	0,249
Стенка канала	0,250	0,253	0,249	0,252
Керамическая вставка 3	0,253	0,307	0,252	0,307
Стенка канала	0,307	0,310	0,307	0,310
Канал 5 (жидкий металл)	0,310	0,344	0,310	0,337
Стенка канала	0,344	0,347	0,337	0,340
Керамическая вставка 4	0,347	0,422	0,340	0,418
Стенка канала	0,422	0,425	0,418	0,421
Канал 6 (жидкий металл)	0,425	0,450	0,421	0,450
Первая плита задней стенки	0,450	0,470	0,450	0,470

Т а б л и ц а 4. Удельное и полное энерговыделение в элементах конструкции рамы ИМБ в экспериментальном порту ИТЭР, Q

Элемент конструкции опорной рамы	Удельное Q , Вт/см ³	Полное Q , Вт
Бериллиевый слой в верхней части рамы	4,73	$1,59 \cdot 10^4$
Первая стенка в верхней части рамы	6,93	$4,67 \cdot 10^4$
Бериллиевый слой в нижней части рамы	4,57	$1,52 \cdot 10^4$
Первая стенка в нижней части рамы	6,69	$4,49 \cdot 10^4$
Область рамы вне бридерной зоны	4,32	$4,76 \cdot 10^5$
Верх рамы над бридерной зоной	0,833	$1,56 \cdot 10^5$
Центр рамы в области бридерной зоны	1,91	$3,68 \cdot 10^5$
Низ рамы под бридерной зоной	0,892	$1,67 \cdot 10^5$
Правая сторона рамы в области бридерной зоны	1,64	$3,17 \cdot 10^5$
Левая сторона рамы в области бридерной зоны	1,61	$3,11 \cdot 10^5$
Верх рамы над радиационной защитой	0,0187	$9,69 \cdot 10^3$
Низ рамы под радиационной защитой	0,0174	$9,03 \cdot 10^3$
Правая сторона рамы в области радиационной защиты	0,0215	$1,11 \cdot 10^4$
Левая сторона рамы в области радиационной защиты	0,0183	$9,44 \cdot 10^3$
Верх рамы за радиационной защитой	0,000254	82,3
Низ рамы за радиационной защитой	0,000218	71,2
Правая сторона рамы за радиационной защитой	0,000180	65,5
Левая сторона рамы за радиационной защитой	0,000178	64,3
Рама в целом		$1,96 \cdot 10^6$

Т а б л и ц а 5. Распределение полного энерговыделения в элементах конструкции ИМБ Q , Вт

Элемент конструкции	Расчётный элемент	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Первая стенка ИМБ	Защитное покрытие	$7,40 \cdot 10^3$	$7,40 \cdot 10^3$	$7,39 \cdot 10^3$	$7,40 \cdot 10^3$
	Стенка	$1,90 \cdot 10^4$	$1,90 \cdot 10^4$	$1,90 \cdot 10^4$	$1,90 \cdot 10^4$
	Каналы охлаждения	$7,04 \cdot 10^4$	$7,03 \cdot 10^4$	$7,02 \cdot 10^4$	$7,03 \cdot 10^4$
	Стенка	$1,39 \cdot 10^4$	$1,39 \cdot 10^4$	$1,39 \cdot 10^4$	$1,39 \cdot 10^4$
	ИТОГО	$1,11 \cdot 10^5$	$1,11 \cdot 10^5$	$1,11 \cdot 10^5$	$1,11 \cdot 10^5$
Левая боковая стенка ИМБ	Стенка	$4,90 \cdot 10^3$	$4,79 \cdot 10^3$	$4,80 \cdot 10^3$	$4,89 \cdot 10^3$
	Каналы охлаждения	$1,73 \cdot 10^4$	$1,69 \cdot 10^4$	$1,69 \cdot 10^4$	$1,73 \cdot 10^4$
	ИТОГО	$2,57 \cdot 10^4$	$2,51 \cdot 10^4$	$2,51 \cdot 10^4$	$2,57 \cdot 10^4$
Правая боковая стенка ИМБ	Стенка	$5,23 \cdot 10^3$	$5,11 \cdot 10^3$	$5,10 \cdot 10^3$	$5,25 \cdot 10^3$
	Каналы охлаждения	$1,85 \cdot 10^4$	$1,80 \cdot 10^4$	$1,80 \cdot 10^4$	$1,85 \cdot 10^4$
	ИТОГО	$2,74 \cdot 10^4$	$2,67 \cdot 10^4$	$2,67 \cdot 10^4$	$2,75 \cdot 10^4$
Элементы ИМБ	Верхняя крышка корпуса	$6,60 \cdot 10^3$	$6,50 \cdot 10^3$	$6,50 \cdot 10^3$	$6,66 \cdot 10^3$
	Нижняя крышка корпуса	$6,75 \cdot 10^3$	$6,67 \cdot 10^3$	$6,67 \cdot 10^3$	$6,77 \cdot 10^3$
	Верхний коллектор	$5,70 \cdot 10^3$	$5,52 \cdot 10^3$	$5,51 \cdot 10^3$	$5,66 \cdot 10^3$
	Нижний коллектор	$9,81 \cdot 10^3$	$9,56 \cdot 10^3$	$9,57 \cdot 10^3$	$9,81 \cdot 10^3$
	ИТОГО	$2,89 \cdot 10^4$	$2,83 \cdot 10^4$	$2,83 \cdot 10^4$	$2,89 \cdot 10^4$
Блок коллекторов	Стенка	$1,57 \cdot 10^3$	$1,44 \cdot 10^3$	$1,44 \cdot 10^3$	$1,90 \cdot 10^3$
	Газовая полость	3,49	3,41	3,40	4,85
	Стенка	808,0	741,0	737,0	955,0
	Газовая полость	3,04	2,98	2,97	4,20
	Стенка	768,0	701,0	702,0	897,0
	Газовая полость	2,67	2,58	2,59	3,60
	Стенка	$1,41 \cdot 10^3$	$1,26 \cdot 10^3$	$1,27 \cdot 10^3$	$1,62 \cdot 10^3$
	ИТОГО	$4,57 \cdot 10^3$	$4,15 \cdot 10^3$	$4,15 \cdot 10^3$	$5,38 \cdot 10^3$

Т а б л и ц а 6. Распределение удельного энерговыделения в ЗВТ ИМБ Q , Вт/см³

Уровень Z, см	Расчётный слой	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
1	2	3	4	5	6
138,62—107,82	1-й канал эвтектики	3,87	3,83	3,84	3,84
	Стенка канала	1,77	1,74	1,74	1,74
	2-й канал эвтектики	2,33	2,25	2,29	2,28
	Стенка канала	1,52	1,50	1,54	1,49
	Керамическая вставка 1	2,40	2,92	2,93	2,31
	Стенка канала	1,26	1,25	1,28	1,30
	3-й канал эвтектики	1,47	1,40	1,41	1,45
	Стенка канала	0,865	0,833	8,41	0,876
	Керамическая вставка 2	1,42	1,67	1,67	1,40
	Стенка канала	0,692	0,669	6,71	0,735
	4-й канал эвтектики	0,229	0,711	7,20	0,783
	Стенка канала	0,403	0,386	3,7	0,441
	Керамическая вставка 3	0,745	0,834	8,32	0,753
	Стенка канала	0,314	0,299	2,98	0,346
	5-й канал эвтектики	0,364	0,320	3,47	0,408
	Стенка канала	0,168	0,160	1,71	0,212
	Керамическая вставка 4	0,324	0,346	3,56	0,360
	Стенка канала	0,115	0,106	1,19	0,153
	6-й канал эвтектики	0,186	0,160	1,57	0,206
	Полное Q , Вт	$7,00 \cdot 10^4$	$7,27 \cdot 10^4$	$7,27 \cdot 10^4$	$6,96 \cdot 10^4$
107,82—77,08	1-й канал эвтектики	3,90	3,86	3,85	3,86
	Стенка канала	1,76	1,74	1,75	1,75
	2-й канал эвтектики	2,36	2,29	2,31	2,30
	Стенка канала	1,61	1,59	1,59	1,57
	Керамическая вставка 1	2,58	3,12	3,14	2,47
	Стенка канала	1,35	1,31	1,31	1,34
	3-й канал эвтектики	1,58	1,48	1,48	1,55
	Стенка канала	0,924	0,903	0,887	0,936
	Керамическая вставка 2	1,59	1,83	1,83	1,54
	Стенка канала	0,741	0,718	0,726	0,791
	4-й канал эвтектики	0,254	0,769	0,783	0,866
	Стенка канала	0,439	0,420	0,425	0,475
	Керамическая вставка 3	0,819	0,901	0,903	0,828
	Стенка канала	0,344	0,323	0,326	0,397

1	2	3	4	5	6
77,08—46,22	5-й канал эвтектики	0,403	0,350	0,384	0,465
	Стенка канала	0,198	0,182	0,193	0,245
	Керамическая вставка 4	0,376	0,393	0,402	0,418
	Стенка канала	0,127	0,118	0,124	0,177
	6-й канал эвтектики	0,196	0,170	0,169	0,232
	Полное Q , Вт	$7,46 \cdot 10^4$	$7,71 \cdot 10^4$	$7,71 \cdot 10^4$	$7,41 \cdot 10^4$
	1-й канал эвтектики	4,07	4,01	4,03	4,03
	Стенка канала	1,80	1,79	1,80	1,81
	2-й канал эвтектики	2,46	2,41	2,42	2,41
	Стенка канала	1,70	1,67	1,68	1,64
	Керамическая вставка 1	2,63	3,17	3,18	2,53
	Стенка канала	1,43	1,40	1,41	1,43
	3-й канал эвтектики	1,61	1,52	1,53	1,59
	Стенка канала	0,901	0,884	0,882	0,932
	Керамическая вставка 2	1,59	1,83	1,83	1,55
	Стенка канала	0,754	0,733	0,745	0,807
	4-й канал эвтектики	0,258	0,782	0,790	0,863
	Стенка канала	0,456	0,433	0,429	0,489
	Керамическая вставка 3	0,843	0,925	0,920	0,847
	Стенка канала	0,330	0,316	0,323	0,383
5-й канал эвтектики	0,401	0,351	0,383	0,466	
Стенка канала	0,183	0,173	0,199	0,241	
Керамическая вставка 4	0,376	0,391	0,403	0,418	
Стенка канала	0,127	0,119	0,129	0,175	
6-й канал эвтектики	0,202	0,173	0,167	0,232	
Полное Q , Вт	$7,53 \cdot 10^4$	$7,78 \cdot 10^4$	$7,78 \cdot 10^4$	$7,49 \cdot 10^4$	
46,22—15,42	1-й канал эвтектики	3,98	3,94	3,94	3,93
	Стенка канала	1,75	1,75	1,74	1,74
	2-й канал эвтектики	2,35	2,29	2,30	2,29
	Стенка канала	1,60	1,59	1,58	1,57
	Керамическая вставка 1	2,58	3,11	3,13	2,48
	Стенка канала	1,37	1,34	1,36	1,39
	3-й канал эвтектики	1,56	1,47	1,50	1,53
	Стенка канала	0,920	0,879	0,906	0,925
	Керамическая вставка 2	1,53	1,76	1,76	1,48
	Стенка канала	0,727	0,708	0,708	0,773
	4-й канал эвтектики	0,249	0,761	0,759	0,841
	Стенка канала	0,437	0,418	0,420	0,479
	Керамическая вставка 3	0,820	0,908	0,895	0,824
	Стенка канала	0,323	0,302	0,305	0,374
	5-й канал эвтектики	0,392	0,343	0,67	0,450
	Стенка канала	0,187	0,177	0,192	0,238
	Керамическая вставка 4	0,368	0,388	0,395	0,410
	Стенка канала	0,126	0,115	0,123	0,171
	6-й канал эвтектики	0,197	0,168	0,163	0,220
	Полное Q , Вт	$7,38 \cdot 10^4$	$7,63 \cdot 10^4$	$7,63 \cdot 10^4$	$7,30 \cdot 10^4$
15,42—(-15,38)	1-й канал эвтектики	3,90	3,88	3,87	3,87
	Стенка канала	1,69	1,70	1,70	1,72
	2-й канал эвтектики	2,27	2,22	2,24	2,24
	Стенка канала	1,53	1,51	1,51	1,49
	Керамическая вставка 1	2,43	2,97	2,98	2,34
	Стенка канала	1,30	1,28	1,28	1,31
	3-й канал эвтектики	1,47	1,40	1,42	1,45
	Стенка канала	0,862	0,838	0,852	0,882
	Керамическая вставка 2	1,41	1,65	1,67	1,40
	Стенка канала	0,661	0,642	0,638	0,695
	4-й канал эвтектики	0,227	0,690	0,704	0,766
	Стенка канала	0,401	0,400	0,401	0,430
	Керамическая вставка 3	0,736	0,824	0,819	0,750
	Стенка канала	0,291	0,278	0,279	0,329
	5-й канал эвтектики	0,357	0,321	0,346	0,410
	Стенка канала	0,170	0,163	0,178	0,221
	Керамическая вставка 4	0,329	0,354	0,362	0,369
	Стенка канала	0,116	0,108	0,106	0,148
	6-й канал эвтектики	0,171	0,154	0,148	0,199
	Полное Q , Вт	$6,97 \cdot 10^4$	$7,28 \cdot 10^4$	$7,28 \cdot 10^4$	$6,95 \cdot 10^4$

Полное энерговыделение в опорной раме ИМБ составляет 1960 кВт, в элементах конструкции ИМБ для варианта 1 — 583 кВт, варианта 2 — 592 кВт, варианта 3 — 592 кВт и варианта 4 — 584 кВт. При этом примерно 64—65% тепловой энергии выделяется непосредственно в ЗВТ.

Таким образом, вариации полного энерговыделения в ЗВТ при изменении степени обогащения керамики по изотопу ${}^6\text{Li}$ от 50 до 90% (варианты 1 и 2), увеличении суммарной толщины керамики и изменении плотности её упаковки (варианты 3 и 4) составляют всего порядка 1,5%.

Однако изменение данных параметров значительно сильнее влияет как на величины локальных скоростей наработки трития по каналам ИМБ (до 35%), так и на полную величину наработки (табл. 7—9). Так, повышение степени обогащения керамики по изотопу ${}^6\text{Li}$ от 50 до 90% (варианты 1 и 2) увеличивает наработку трития в ИМБ примерно на 9% при условии плотной упаковки керамики (пористость 20%). Предложенное в [5] доведение суммарной толщины керамики до 202 мм практически не влияет на полную наработку трития (вариант 3).

Т а б л и ц а 7. Высотное распределение скоростей наработки трития в ЗВТ ИМБ, $1/(\text{см}^3\cdot\text{с})$

Уровень	Расчётный слой	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	
1	2	3	4	5	6	
138,62—107,82	1-й канал эвтектики	$1,41\cdot 10^{12}$	$1,37\cdot 10^{12}$	$1,38\cdot 10^{12}$	$1,38\cdot 10^{12}$	
	2-й канал эвтектики	$8,35\cdot 10^{11}$	$7,81\cdot 10^{11}$	$7,84\cdot 10^{11}$	$7,88\cdot 10^{11}$	
	Керамическая вставка 1	$1,68\cdot 10^{12}$	$2,30\cdot 10^{12}$	$2,30\cdot 10^{12}$	$1,85\cdot 10^{12}$	
	3-й канал эвтектики	$4,96\cdot 10^{11}$	$4,19\cdot 10^{11}$	$4,22\cdot 10^{11}$	$4,51\cdot 10^{11}$	
	Керамическая вставка 2	$1,08\cdot 10^{12}$	$1,37\cdot 10^{12}$	$1,37\cdot 10^{12}$	$1,17\cdot 10^{12}$	
	4-й канал эвтектики	$2,95\cdot 10^{11}$	$2,33\cdot 10^{11}$	$2,35\cdot 10^{11}$	$2,67\cdot 10^{11}$	
	Керамическая вставка 3	$6,17\cdot 10^{11}$	$7,28\cdot 10^{11}$	$7,24\cdot 10^{11}$	$6,61\cdot 10^{11}$	
	5-й канал эвтектики	$1,53\cdot 10^{11}$	$1,12\cdot 10^{11}$	$1,15\cdot 10^{11}$	$1,41\cdot 10^{11}$	
	Керамическая вставка 4	$2,87\cdot 10^{11}$	$3,16\cdot 10^{11}$	$3,22\cdot 10^{11}$	$3,29\cdot 10^{11}$	
	6-й канал эвтектики	$8,49\cdot 10^{10}$	$6,25\cdot 10^{10}$	$6,30\cdot 10^{10}$	$8,46\cdot 10^{10}$	
	107,82—77,08	1-й канал эвтектики	$1,41\cdot 10^{12}$	$1,37\cdot 10^{12}$	$1,37\cdot 10^{12}$	$1,37\cdot 10^{12}$
		2-й канал эвтектики	$8,60\cdot 10^{11}$	$7,91\cdot 10^{11}$	$7,94\cdot 10^{11}$	$8,01\cdot 10^{11}$
Керамическая вставка 1		$1,81\cdot 10^{12}$	$2,45\cdot 10^{12}$	$2,46\cdot 10^{12}$	$1,98\cdot 10^{12}$	
3-й канал эвтектики		$5,39\cdot 10^{11}$	$4,45\cdot 10^{11}$	$4,46\cdot 10^{11}$	$4,81\cdot 10^{11}$	
Керамическая вставка 2		$1,22\cdot 10^{12}$	$1,50\cdot 10^{12}$	$1,50\cdot 10^{12}$	$1,28\cdot 10^{12}$	
4-й канал эвтектики		$3,33\cdot 10^{11}$	$2,57\cdot 10^{11}$	$2,59\cdot 10^{11}$	$2,93\cdot 10^{11}$	
Керамическая вставка 3		$6,81\cdot 10^{11}$	$7,83\cdot 10^{11}$	$7,81\cdot 10^{11}$	$7,24\cdot 10^{11}$	
5-й канал эвтектики		$1,72\cdot 10^{11}$	$1,23\cdot 10^{11}$	$1,25\cdot 10^{11}$	$1,55\cdot 10^{11}$	
Керамическая вставка 4		$3,35\cdot 10^{11}$	$3,59\cdot 10^{11}$	$3,63\cdot 10^{11}$	$3,79\cdot 10^{11}$	
6-й канал эвтектики		$9,40\cdot 10^{10}$	$6,76\cdot 10^{10}$	$6,59\cdot 10^{10}$	$9,18\cdot 10^{10}$	
77,08—46,22		1-й канал эвтектики	$1,48\cdot 10^{12}$	$1,44\cdot 10^{12}$	$1,44\cdot 10^{12}$	$1,44\cdot 10^{12}$
		2-й канал эвтектики	$8,83\cdot 10^{11}$	$8,20\cdot 10^{11}$	$8,18\cdot 10^{11}$	$8,27\cdot 10^{11}$
	Керамическая вставка 1	$1,84\cdot 10^{12}$	$2,49\cdot 10^{12}$	$2,49\cdot 10^{12}$	$2,02\cdot 10^{12}$	
	3 канал эвтектики	$5,46\cdot 10^{11}$	$4,54\cdot 10^{11}$	$4,56\cdot 10^{11}$	$4,92\cdot 10^{11}$	
	Керамическая вставка 2	$1,21\cdot 10^{12}$	$1,50\cdot 10^{12}$	$1,50\cdot 10^{12}$	$1,29\cdot 10^{12}$	
	4-й канал эвтектики	$3,31\cdot 10^{11}$	$2,56\cdot 10^{11}$	$2,55\cdot 10^{11}$	$2,92\cdot 10^{11}$	
	Керамическая вставка 3	$7,00\cdot 10^{11}$	$8,02\cdot 10^{11}$	$7,95\cdot 10^{11}$	$7,42\cdot 10^{11}$	
	5-й канал эвтектики	$1,72\cdot 10^{11}$	$1,22\cdot 10^{11}$	$1,22\cdot 10^{11}$	$1,54\cdot 10^{11}$	
	Керамическая вставка 4	$3,34\cdot 10^{11}$	$3,57\cdot 10^{11}$	$3,63\cdot 10^{11}$	$3,82\cdot 10^{11}$	
	6-й канал эвтектики	$9,26\cdot 10^{10}$	$6,82\cdot 10^{10}$	$6,74\cdot 10^{10}$	$9,42\cdot 10^{10}$	
	46,22—15,42	1-й канал эвтектики	$1,45\cdot 10^{12}$	$1,41\cdot 10^{12}$	$1,41\cdot 10^{12}$	$1,41\cdot 10^{12}$
		2-й канал эвтектики	$8,49\cdot 10^{11}$	$7,82\cdot 10^{11}$	$7,83\cdot 10^{11}$	$7,95\cdot 10^{11}$
Керамическая вставка 1		$1,81\cdot 10^{12}$	$2,45\cdot 10^{12}$	$2,46\cdot 10^{12}$	$1,98\cdot 10^{12}$	
3-й канал эвтектики		$5,34\cdot 10^{11}$	$4,42\cdot 10^{11}$	$4,48\cdot 10^{11}$	$4,75\cdot 10^{11}$	
Керамическая вставка 2		$1,17\cdot 10^{12}$	$1,44\cdot 10^{12}$	$1,44\cdot 10^{12}$	$1,23\cdot 10^{12}$	
4-й канал эвтектики		$3,24\cdot 10^{11}$	$2,49\cdot 10^{11}$	$2,49\cdot 10^{11}$	$2,84\cdot 10^{11}$	
Керамическая вставка 3		$6,82\cdot 10^{11}$	$7,91\cdot 10^{11}$	$7,76\cdot 10^{11}$	$7,21\cdot 10^{11}$	
5-й канал эвтектики		$1,68\cdot 10^{11}$	$1,22\cdot 10^{11}$	$1,19\cdot 10^{11}$	$1,52\cdot 10^{11}$	
Керамическая вставка 4		$3,29\cdot 10^{11}$	$3,56\cdot 10^{11}$	$3,58\cdot 10^{11}$	$3,73\cdot 10^{11}$	

Окончание табл. 7

1	2	3	4	5	6
15,42—(-15,38)	6-й канал эвтектики	$9,10 \cdot 10^{10}$	$6,82 \cdot 10^{10}$	$6,49 \cdot 10^{10}$	$9,04 \cdot 10^{10}$
	1-й канал эвтектики	$1,42 \cdot 10^{12}$	$1,39 \cdot 10^{12}$	$1,39 \cdot 10^{12}$	$1,39 \cdot 10^{12}$
	2-й канал эвтектики	$8,13 \cdot 10^{11}$	$7,61 \cdot 10^{11}$	$7,62 \cdot 10^{11}$	$7,72 \cdot 10^{11}$
	Керамическая вставка 1	$1,71 \cdot 10^{12}$	$2,34 \cdot 10^{12}$	$2,35 \cdot 10^{12}$	$1,87 \cdot 10^{12}$
	3-й канал эвтектики	$4,96 \cdot 10^{11}$	$4,20 \cdot 10^{11}$	$4,23 \cdot 10^{11}$	$4,49 \cdot 10^{11}$
	Керамическая вставка 2	$1,07 \cdot 10^{12}$	$1,36 \cdot 10^{12}$	$1,37 \cdot 10^{12}$	$1,16 \cdot 10^{12}$
	4-й канал эвтектики	$2,94 \cdot 10^{11}$	$2,34 \cdot 10^{11}$	$2,34 \cdot 10^{11}$	$2,66 \cdot 10^{11}$
	Керамическая вставка 3	$6,11 \cdot 10^{11}$	$7,21 \cdot 10^{11}$	$7,13 \cdot 10^{11}$	$6,59 \cdot 10^{11}$
	5-й канал эвтектики	$1,55 \cdot 10^{11}$	$1,16 \cdot 10^{11}$	$1,14 \cdot 10^{11}$	$1,41 \cdot 10^{11}$
	Керамическая вставка 4	$2,94 \cdot 10^{11}$	$3,26 \cdot 10^{11}$	$3,30 \cdot 10^{11}$	$3,37 \cdot 10^{11}$
6-й канал эвтектики	$7,99 \cdot 10^{10}$	$6,10 \cdot 10^{10}$	$6,07 \cdot 10^{10}$	$8,01 \cdot 10^{10}$	

Т а б л и ц а 8. Средняя удельная скорость наработки трития по каналам ЗВТ ИМБ, 1/(см³·с)

Слой в радиальном направлении	Вариант			
	1	2	3	4
1-й канал эвтектики	$1,44 \cdot 10^{12}$	$1,40 \cdot 10^{12}$	$1,40 \cdot 10^{12}$	$1,40 \cdot 10^{12}$
2-й канал эвтектики	$8,48 \cdot 10^{11}$	$7,87 \cdot 10^{11}$	$7,88 \cdot 10^{11}$	$7,96 \cdot 10^{11}$
Керамическая вставка 1	$1,77 \cdot 10^{12}$	$2,40 \cdot 10^{12}$	$2,41 \cdot 10^{12}$	$1,94 \cdot 10^{12}$
3-й канал эвтектики	$5,22 \cdot 10^{11}$	$4,36 \cdot 10^{11}$	$4,39 \cdot 10^{11}$	$4,70 \cdot 10^{11}$
Керамическая вставка 2	$1,15 \cdot 10^{12}$	$1,44 \cdot 10^{12}$	$1,44 \cdot 10^{12}$	$1,23 \cdot 10^{12}$
4-й канал эвтектики	$3,15 \cdot 10^{11}$	$2,46 \cdot 10^{11}$	$2,46 \cdot 10^{11}$	$2,80 \cdot 10^{11}$
Керамическая вставка 3	$6,58 \cdot 10^{11}$	$7,65 \cdot 10^{11}$	$7,58 \cdot 10^{11}$	$7,01 \cdot 10^{11}$
5-й канал эвтектики	$1,64 \cdot 10^{11}$	$1,19 \cdot 10^{11}$	$1,19 \cdot 10^{11}$	$1,49 \cdot 10^{11}$
Керамическая вставка 4	$3,16 \cdot 10^{11}$	$3,43 \cdot 10^{11}$	$3,47 \cdot 10^{11}$	$3,60 \cdot 10^{11}$
6-й канал эвтектики	$8,85 \cdot 10^{10}$	$6,55 \cdot 10^{10}$	$6,44 \cdot 10^{10}$	$8,82 \cdot 10^{10}$

Т а б л и ц а 9. Нароботка трития в объёме ЗВТ ИМБ, 1/с

Материал	Вариант			
	1	2	3	4
Эвтектика	$7,88 \cdot 10^{16}$	$7,17 \cdot 10^{16}$	$7,09 \cdot 10^{16}$	$7,35 \cdot 10^{16}$
Керамика	$1,03 \cdot 10^{17}$	$1,28 \cdot 10^{17}$	$1,29 \cdot 10^{17}$	$1,13 \cdot 10^{17}$
Верхний коллектор	$2,39 \cdot 10^{15}$	$2,23 \cdot 10^{15}$	$2,22 \cdot 10^{15}$	$2,30 \cdot 10^{15}$
Нижний коллектор	$4,18 \cdot 10^{15}$	$3,93 \cdot 10^{15}$	$3,94 \cdot 10^{15}$	$4,05 \cdot 10^{15}$
Трубы подвода	$5,01 \cdot 10^{14}$	$4,33 \cdot 10^{14}$	$4,43 \cdot 10^{14}$	$5,46 \cdot 10^{14}$
ИТОГО	$1,89 \cdot 10^{17}$	$2,06 \cdot 10^{17}$	$2,07 \cdot 10^{17}$	$1,93 \cdot 10^{17}$

Согласно данным исследований по экспериментальному изучению свойств керамических материалов, приведённых в [7], доведение плотности упаковки керамики до 80% от теоретической плотности материала представляется маловероятным. Более реалистическое значение плотности упаковки для метатитаната лития, представленное в [7], составляет порядка 60%. Поэтому для варианта 4 компоновки ЗВТ ИМБ параметр пористости керамики был принят на уровне 40% при максимальной степени обогащения керамики по изотопу ⁶Li 90%.

Как показали результаты оценки наработки трития (см. табл. 9), полная наработка трития в ЗВТ ИМБ по сравнению с данными, полученными для вариантов 2 и 3, уменьшилась примерно на 7% и составила $1,93 \cdot 10^{17}$ ат./с.

Таким образом, рассмотренная компоновка ЗВТ ИМБ рекомендована для дальнейшей конструкторской проработки и обоснования термогидравлических и прочностных характеристик.

АНАЛИЗ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИМБ

Для проведения теплогидравлического расчёта ИМБ использовались следующие исходные данные, граничные условия и допущения:

— рассматривалась конструкция несущего корпуса ИМБ;

— удельные энерговыделения в материалах корпуса ИМБ принимались согласно результатам нейтронно-физического расчёта (нормированы на термоядерную мощность реактора 500 МВт, нейтронный поток на ПС $0,78 \text{ МВт/м}^2$);

— максимальная плотность теплового потока на ПС ИМБ принималась в соответствии с [6] и составляет $0,5 \text{ МВт/м}^2$;

— температура гелиевого теплоносителя на входе в тракт охлаждения ИМБ $325 \text{ }^\circ\text{C}$, давление 8 МПа;

— расчёт полей температур в элементах конструкции ИМБ и теплогидравлических параметров тракта охлаждения проводился в стационарной постановке (используемый расчётный код ANSYS-CFX);

— расход гелиевого теплоносителя в тракте охлаждения ИМБ $1,65 \text{ кг/с}$;

— допускаемые значения температур для материалов ИМБ составляют не более $550 \text{ }^\circ\text{C}$ для низкоактивируемой ферритно-мартенситной стали (ФМ-стали) и не более $660 \text{ }^\circ\text{C}$ для защитного бериллиевого покрытия ПС (бериллий марки S-65).

Расчёт теплогидравлических параметров тракта охлаждения корпуса ИМБ проводился для значения расхода $1,65 \text{ кг/с}$, результаты представлены на рис. 14—23 и в табл. 10.

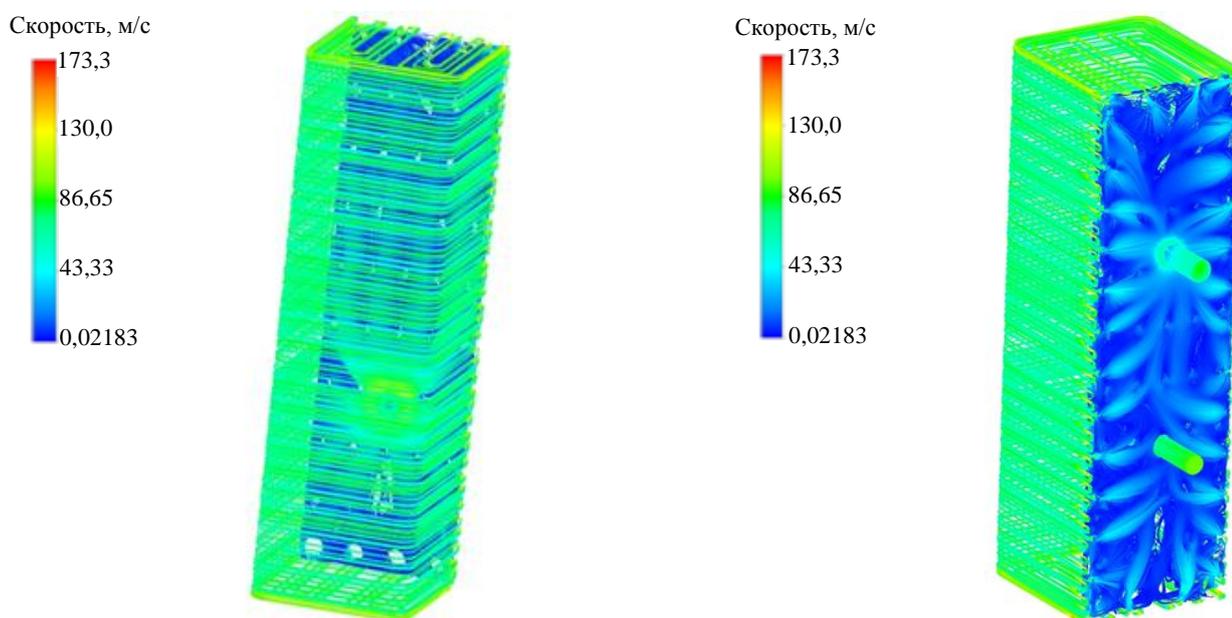


Рис. 14. Распределение скоростей теплоносителя в тракте охлаждения несущего корпуса ИМБ (расход $1,65 \text{ кг/с}$)

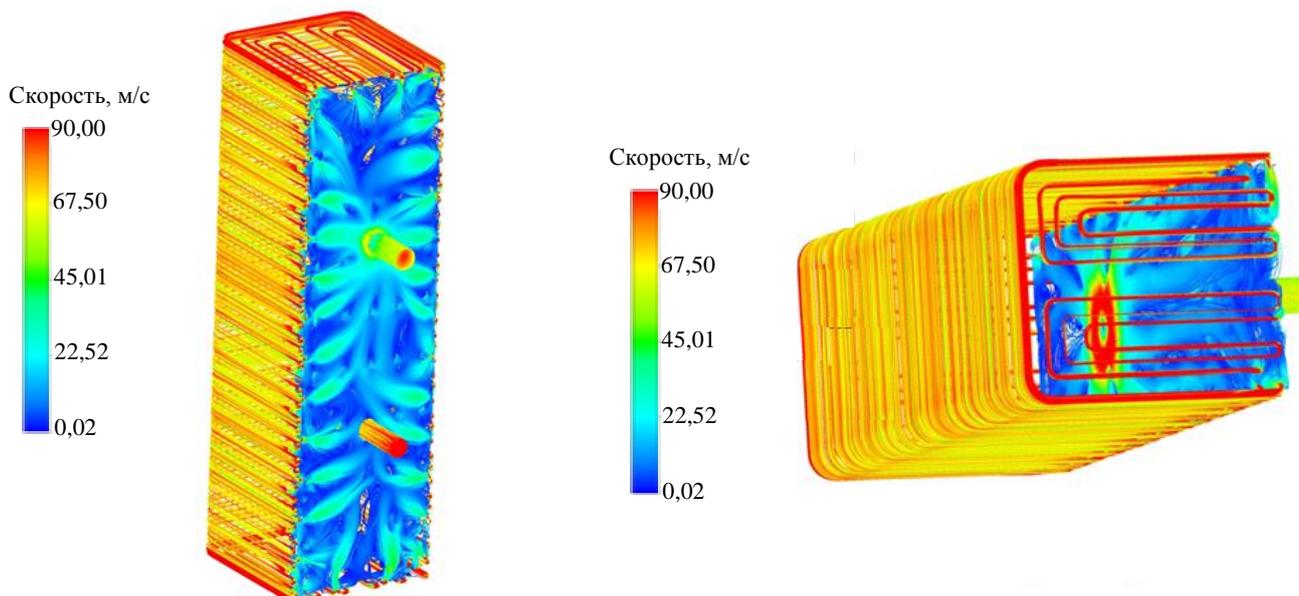


Рис. 15. Распределение скоростей теплоносителя в тракте охлаждения несущего корпуса ИМБ (расход $1,65 \text{ кг/с}$, скорость более 90 м/с выделена красным цветом)

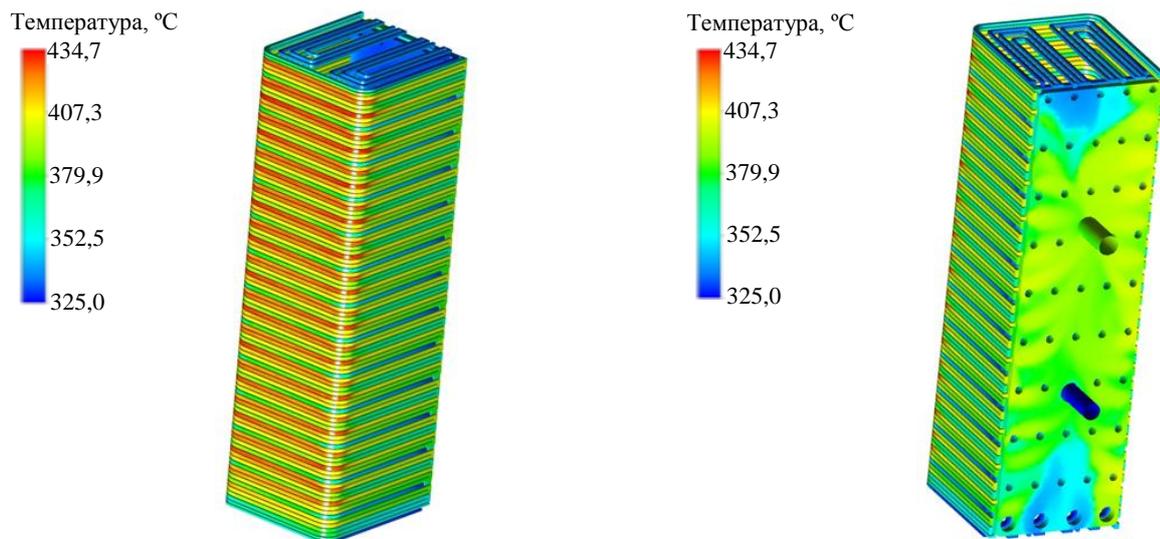


Рис. 16. Распределение температуры ядра теплоносителя в тракте охлаждения корпуса ИМБ (расход 1,65 кг/с)

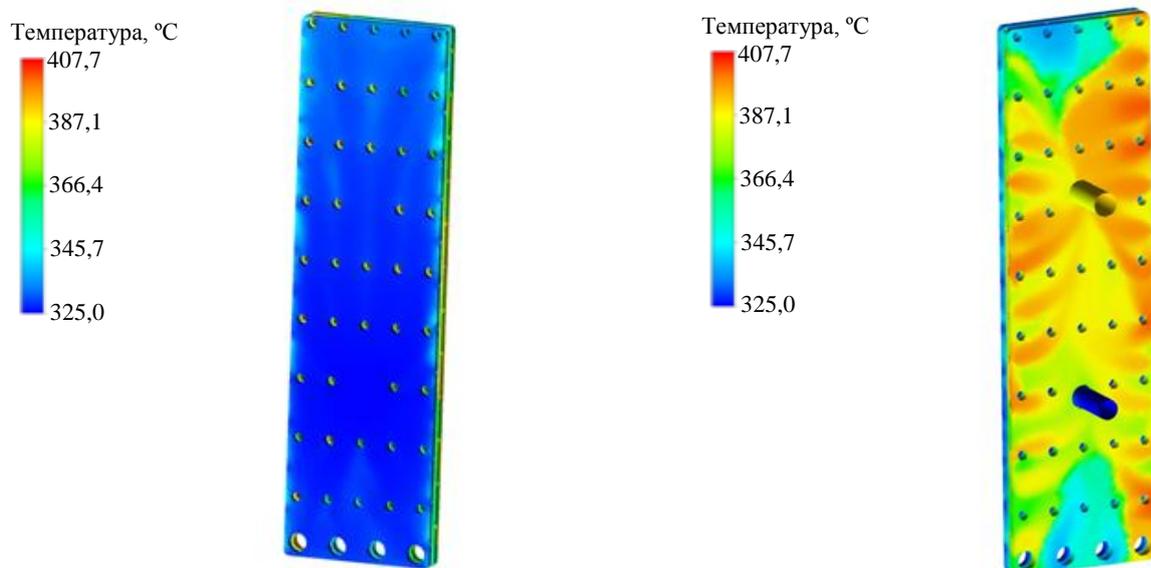


Рис. 17. Распределение температуры ядра теплоносителя в блоке газовых коллекторов ИМБ (расход 1,65 кг/с)

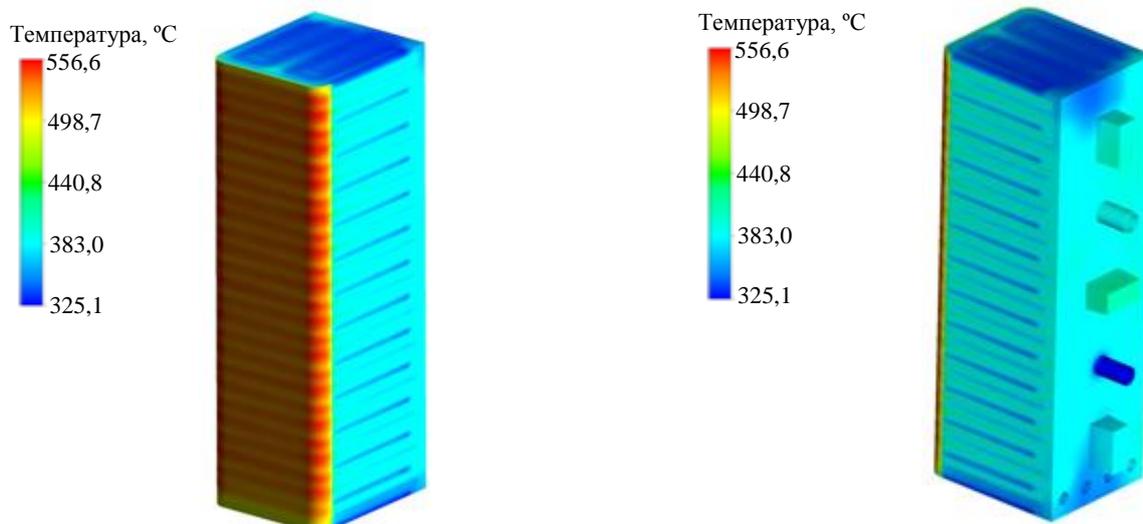


Рис. 18. Распределение температуры в металлоконструкции несущего корпуса ИМБ (расход 1,65 кг/с)

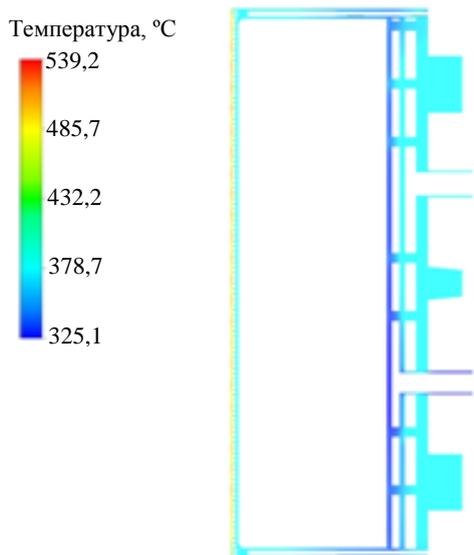


Рис. 19. Распределение температуры в полоидальном сечении корпуса ИМБ

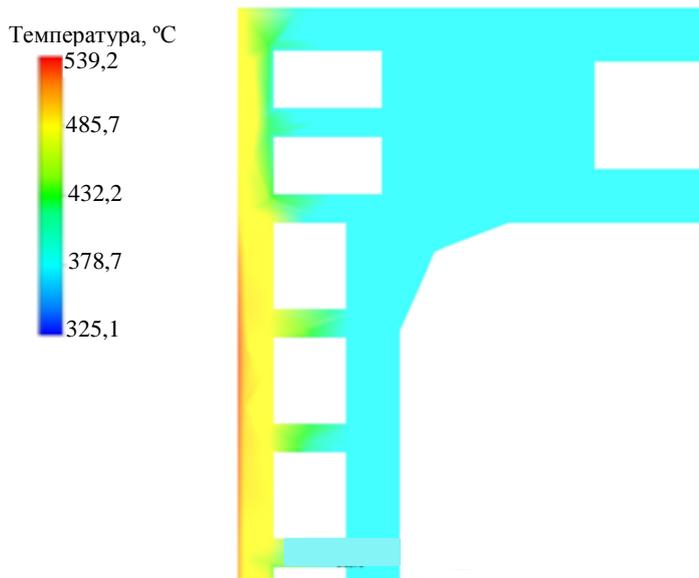


Рис. 20. Распределение температуры в верхнем углу полоидального сечения корпуса ИМБ

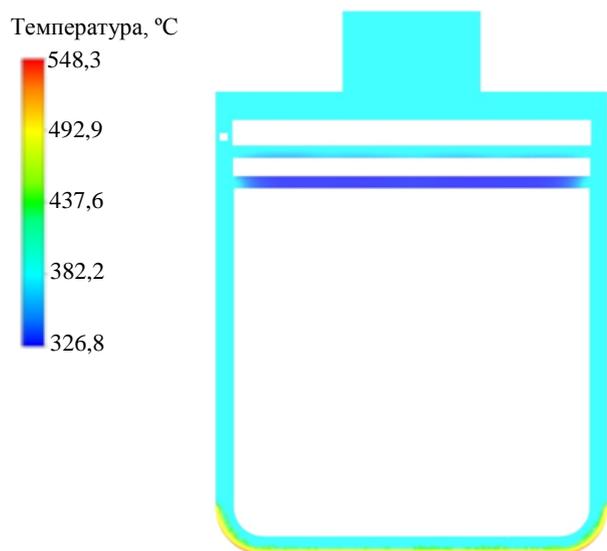


Рис. 21. Распределение температуры в тороидальном (между каналами охлаждения регулярной части) сечении ПС ИМБ

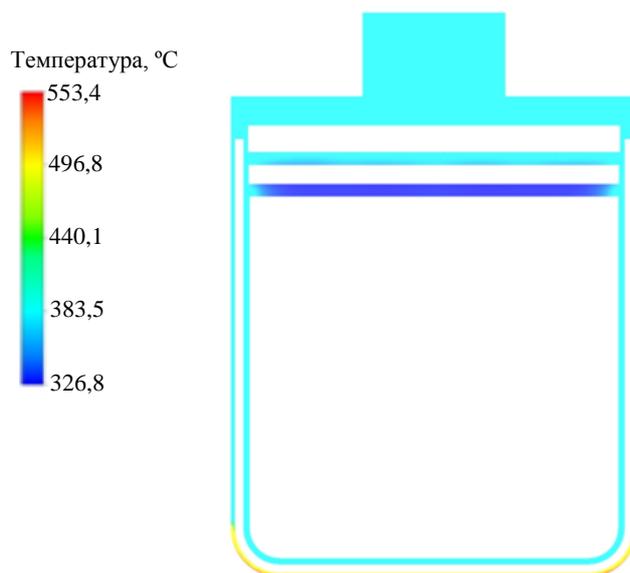


Рис. 22. Распределение температуры в тороидальном (по каналу охлаждения регулярной части) сечении ПС ИМБ

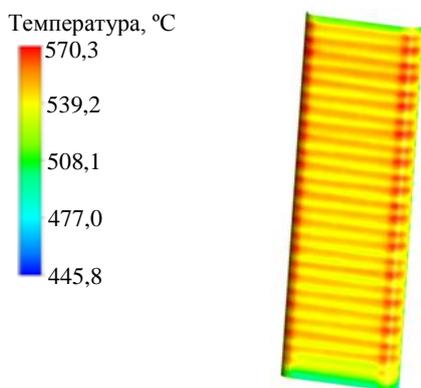


Рис. 23. Распределение температуры в защитном покрытии ПС ИМБ

Т а б л и ц а 10. Теплогидравлические параметры конструкции несущего корпуса ИМБ

Параметр	$G = 1,65 \text{ кг/с}$
Потери давления по тракту охлаждения ИМБ, кПа	400
Выходная температура теплоносителя, °C	387
Максимальная температура защитного покрытия ПС, °C	$570 < 660$
Максимальная температура защитного покрытия ПС в сечении (центральная часть ПС), °C	$554 < 660$
Максимальная температура ФМ-стали, °C	$556 > 550$
Максимальная температура ФМ-стали в сечении по каналу охлаждения регулярной части ПС, °C	$553 > 550$
Максимальная температура ФМ-стали в сечении между каналами охлаждения ПС, °C	$548 < 550$

По результатам теплогидравлического расчёта тракта охлаждения корпуса ИМБ (Россия) необходимо сделать следующие выводы:

— максимальная температура ФМ-стали незначительно (556 °С) превышает допустимое значение (550 °С) для рассматриваемого значения расхода гелиевого теплоносителя. Следует отметить, что данное превышение носит локальный характер (изгиб скобы ПС в районе верхнего фланца) и, предположительно, не окажет отрицательного влияния на термонапряжённое состояние ПС. Максимальная температура бериллиевого протектора не превышает допустимого значения (660 °С). Характерные температуры ФМ-стали и бериллиевого протектора в регулярной (центральной) части ПС не превышают указанные допустимые значения для рассматриваемых значений расхода гелиевого теплоносителя;

— потери давления в тракте охлаждения ИМБ, представленные в табл. 10, для рассматриваемого значения расхода (400 кПа) являются приемлемыми, значение расхода 1,65 кг/с в данной схеме циркуляции теплоносителя ПС можно считать одной из базовых характеристик для дальнейшего проектирования конструкции ИМБ;

— схема циркуляции гелиевого теплоносителя, выбранная на данном этапе разработки конструкции КЛС ИМБ, является наиболее перспективной для дальнейшего проектирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчётно-конструкторская разработка (на уровне эскизного проектирования) КБЛСЭ ИМБ позволила обосновать следующие конструкторские решения:

— ЗВТ с использованием последовательно-параллельной системы циркуляции литий-свинцовой эвтектики и четырёх канистр с керамическим бридером оптимизирована с точки зрения снижения МГД-потерь давления и повышения выходной температуры PbLi-эвтектики (до 500 °С);

— ЗВТ в оптимизированном варианте интегрирована с несущим корпусом ИМБ, а также модернизирована проточная часть корпуса ИМБ (по эвтектике) с точки зрения теплогидравлических характеристик. Предполагается отказаться от использования электроизоляционного покрытия на поверхностях проточной части ИМБ при одновременном обеспечении приемлемых МГД-потерь давления на прокачку PbLi-эвтектики (около 152 кПа);

— выбран оптимальный вариант скобы ПС с использованием схемы циркуляции газового теплоносителя, включающей 25 параллельных 4-заходных змеевиковых каналов охлаждения (в регулярной части скобы) и по два параллельных 2-заходных змеевиковых канала во фланцах скобы.

Выводы по результатам расчётного обоснования конструкции ИМБ:

— нейтронно-физические характеристики:

проанализированы четыре варианта компоновки ЗВТ ИМБ с различным обогащением по изотопу ${}^6\text{Li}$ (от 50 до 90%) в стационарном керамическом бридере, различной пористостью керамической засыпки (20—40%), а также с различной суммарной толщиной слоёв эвтектики и керамики;

повышение степени обогащения керамики по изотопу ${}^6\text{Li}$ (от 50 до 90%) увеличивает наработку трития в ИМБ примерно на 9% при условии плотной упаковки керамики (пористость 20%). Увеличение суммарной толщины керамики до 202 мм практически не влияет на полную наработку трития, полная наработка трития в ЗВТ ИМБ (при пористости керамической засыпки 40%) по сравнению с данными, полученными для вариантов с пористостью 20% (плотная упаковка), уменьшилась примерно на 7% и составила $1,93 \cdot 10^{17}$ ат./с;

полное энерговыделение в ИМБ составляет 583—592 кВт (в зависимости от рассматриваемого варианта компоновки), при этом 64—65% мощности выделяется в ЗВТ;

рассмотренная компоновка ЗВТ КБЛСЭ ИМБ рекомендована для дальнейшей конструкторской проработки и обоснования термодинамических и прочностных характеристик;

— теплогидравлические параметры:

конструкция корпуса российского ИМБ позволяет не превышать допускаемые значения температур для ФМ-стали и бериллиевого покрытия (550 и 660 °С соответственно) при расходе гелиевого теплоносителя 1,65 кг/с;

при значении расхода 1,65 кг/с обеспечиваются приемлемые потери давления на прокачку гелиевого теплоносителя (~400 кПа), что позволяет выбрать эти параметры в качестве базовых для дальнейшего проектирования системы охлаждения в данной компоновке.

В дальнейшем необходимо проведение следующих работ:

— расчёт нестационарных полей температур в конструкции ИМБ, принятой на данном этапе проектирования;

— анализ НДС и последующий анализ прочности конструкции ИМБ в импульсном режиме работы ИТЭР.

REFERENCES

1. **ITER** Research Plan (ITER_D_2FB8AC vol. 2.2).
2. **ITER** Seismic Nuclear Safety Approach (ITER_D_2DRVPE)).
3. **System** Requirement Document (SRD). Test Blanket Modules System (TBSM). PBS-56, ITER_D_28B3A7 vol. 1.5.
4. **Design** Description Document for Indian Lead-Lithium cooled Ceramic Breeder (LLCB) Blanket, https://user.iter.org/?uid=2F34PN&action=get_document.
5. **Kirillov I.R., Pertsev D.A.** Investigation of alternative configurations of the LLCB TBM to increase neutronic and thermo-hydraulics performances. — Fusion Engineering and Design, 2010, vol. 85, pp. 1054—1058.
6. **Revised** Heat Loads on TBM FW, https://user.iter.org/?uid=2LGNJK&action=get_document.
7. **Boccaccini L.V. et al.** Ceramic Breeder Pebble Beds for EU HCPB Test Blanket Module. ITER Materials Assessment Report, G 74 MA 10 W 0.3.

AUTHORS

Strebkov Yu.S. 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

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.

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

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

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

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

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

Received 8 April 2013
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Termoyadernyi sintez, 2013, vol. 36, issue 3, pp.3—25