

УДК 621.039.6

КОНСТРУКЦИЯ, РАСЧЁТ И ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ МАГНИТОВ ДЕМО-ТИН

А.Ю. Пашков, Ю.С. Шпанский, Б.В. Кутеев

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Тепловая защита сверхпроводниковых магнитов (ТЗСМ) — одна из основных систем проектируемого демонстрационного термоядерного источника нейтронов (ДЕМО-ТИН), обеспечивающая работоспособность сверхпроводниковых магнитов (СМ). Дано описание ТЗСМ и связанных с ней систем, влияющих на её работу. Рассмотрены несколько вариантов конструкции панелей ТЗСМ с учётом опыта проектирования и эксплуатации ТЗСМ термоядерных установок Т-7, Т-15 и проектирования ИТЭР. Изложена методика теплогидравлического расчёта ТЗСМ и выполнен расчёт предложенных вариантов. Сравниваются мощности ядерного тепловыделения в СМ с мощностью теплового потока, падающего на СМ с ТЗСМ, что важно для проектирования СМ. Дан прогноз аварийных ситуаций в ТЗСМ, сделана оценка её надёжности и даны рекомендации по выбору оптимальной конструкции.

Ключевые слова: демонстрационный термоядерный источник нейтронов (ДЕМО-ТИН), тепловая защита сверхпроводниковых магнитов, теплогидравлический расчёт, аварийные ситуации, оценка надёжности.

DESIGN, NUMERICAL ANALYSIS AND RELIABILITY ASSESSMENT OF THE DEMO-FNS SUPERCONDUCTING MAGNETS THERMAL SHIELD

A.Yu. Pashkov, Yu.S. Shpanskiy, B.V. Kuteev

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The thermal shield of superconducting magnets (TSSM) is an important system of the demonstration fusion neutron source (DEMO-FNS). The TSSM supports the capacity of superconducting magnets (SM) for work. The design of the TSSM and related systems is described. Several variants of TSSM panel structures are considered. The experience in the designing and operation of the thermonuclear facilities T-7, T-15 and in the design of ITER were taken into account. The technique of thermal-hydraulic calculations is described. The nuclear heating power in the SMs is compared with the heat flux falling on the SM from TSSM. This comparison is important for the SMs designing. The possible accidents in the TSSM are considered. The TSSM reliability was assessed. The recommendations on the choice of the TSSM optimal design are given.

Key words: demonstration fusion neutron source (DEMO-FNS), superconducting magnets thermal shield, thermo-hydraulic calculations, accidents, reliability assessment.

DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-3-12-33

ВВЕДЕНИЕ

Тепловая защита сверхпроводниковых магнитов (ТЗСМ) является одной из основных частей сверхпроводниковой магнитной системы (СМС), обеспечивающей её надёжную работу, а также работу ДЕМО-ТИН в целом.

Вопросы повышения надёжности СМС для любых термоядерных установок в настоящее время являются весьма актуальными [1]. По результатам эксплуатации токамаков последнего поколения сделан вывод, что одной из причин многочисленных случаев нарушения вакуума в криостатах установок EAST, KSTAR, SST-1 и др. является разгерметизация криогенных гелиевых, токовых и диагностических коммуникаций. Это является аварийной ситуацией и может привести к тяжёлым последствиям.

Другой возможной причиной нарушения вакуума в криостате может быть разгерметизация газовых коммуникаций ТЗСМ. Общее количество и протяжённость этих коммуникаций являются весьма значительными, что требует тщательного анализа их работы. Во многих проектируемых установках (в частности, ДЕМО-ТИН) предполагается охлаждение ТЗСМ газообразным гелием при температуре 80—100 К. Подобный уровень температуры позволяет использование азота, но это нежелательно из-за активации его нейтронами и образования изотопа ^{14}C .

Так как конструкция ТЗСМ ДЕМО-ТИН окончательно не выбрана, необходимо рассмотрение нескольких вариантов. Для выбора оптимальной конструкции желательно учесть опыт эксплуатации и проектирования ТЗСМ термоядерных установок Т-7 и Т-15, а также опыт разработки ИТЭР.

При расчёте ТЗСМ для обоснования её работоспособности обычно уделяется внимание теплофизическим и прочностным аспектам, а также проблемам электроизоляции отдельных частей [2, 3], но для обоснования её надёжности представляется необходимым оценить вероятность безотказной работы. Необходимо также проанализировать причины возникновения аварийных ситуаций в ТЗСМ, их последствия и выбрать наиболее надёжный вариант конструкции. Задача обеспечения надёжности представляется актуальной и потому, что существующая концепция ТЗСМ не предусматривает её ремонта после аварии в силу следующих причин:

- значительная часть ТЗСМ находится в местах, доступ к которым практически невозможен;
- после начала эксплуатации ДЕМО-ТИН ТЗСМ и смежные с ней системы будут активированы нейтронами из плазмы и бланкета, содержащего делящиеся изотопы (если он будет установлен).

КОНСТРУКЦИЯ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ МАГНИТОВ И СМЕЖНЫХ СИСТЕМ УСТАНОВОК ДЕМО-ТИН, Т-7, Т-15 И ИТЭР

Установка ДЕМО-ТИН. Проектируемая установка ДЕМО-ТИН предназначена для научных исследований, тестирования конструкционных материалов будущих ТЯР, утилизации радиоактивных отходов, наработки топлива и др. [4]. На рис. 1, где показан ДЕМО-ТИН в разрезе, представлено взаимное расположение его основных элементов. В настоящее время рассматриваются два варианта конструкции ДЕМО-ТИН, называемых условно «малый» и «большой». В «малом» большой радиус плазмы $R = 2,75$ м, средняя толщина вакуумной камеры (ВК) $\Delta \sim 0,5$ м. В «большом» $R = 3,2$ м, $\Delta \sim 0,85$ м. Увеличение толщины ВК сделано с целью уменьшить потоки нейтронов и γ -квантов на СМС и тем самым снизить ядерное тепловыделение в ней.

Некоторые параметры ДЕМО-ТИН и для сравнения установок Т-7, Т-15 и ИТЭР приведены в табл. 1.

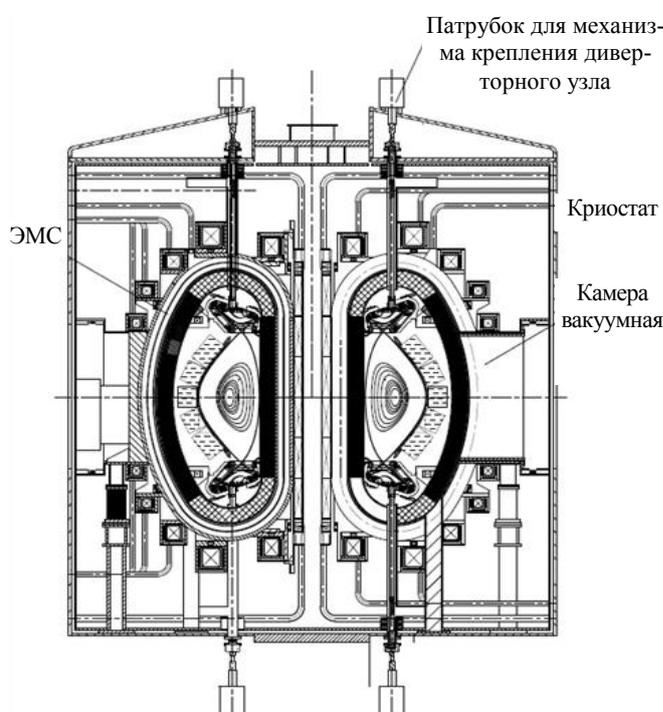


Рис. 1. Принципиальная схема взаимного расположения основных элементов ДЕМО-ТИН

Таблица 1. Параметры ДЕМО-ТИН, ИТЭР и действовавших в России термоядерных установок с СМС

Параметр	Т-7	Т-15	ИТЭР	ДЕМО-ТИН «малый»	ДЕМО-ТИН «большой»
Большой радиус плазмы R , м	1,22	2,43	6,2	2,75	3,2
Малый радиус плазмы r , м	0,35	0,7	2	1	1
Форма катушек тороидального поля (КТП)	Круглая, средний радиус 0,5 м	Круглая, средний радиус 1,25 м	Трапецидальная, максимальный размер 9×15 м	Трапецидальная, максимальный размер 4,5×9,5 м	Трапецидальная, максимальный размер 6×10,5 м
Число КТП	48	12	18	18	18
Суммарный ток в одной катушке, кА	4—5	5—8	60—65	26	28
Площадь ТЗСМ $S_{ТЗСМ}$, м ²	46	380	6000	2500	3500

Следует отметить, что окончательные параметры ДЕМО-ТИН ещё не определены, но оценки, выполненные для ТЗСМ, будут справедливы при любых размерах установки.

В любой из рассматриваемых установок работа ТЗСМ тесно связана с работой СМС и криостата, а также ВК.

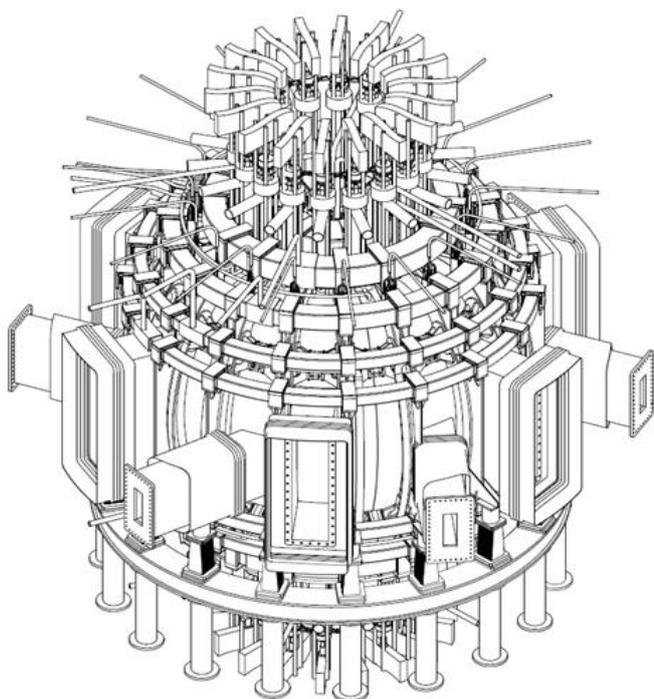


Рис. 2. Вакуумная камера ДЕМО-ТИН в сборе с СМС

СМС ДЕМО-ТИН. Её конструкция предложена в [5]. СМС состоит из 18 катушек тороидального поля, 10 катушек полоидального поля и центрального соленоида (индуктора) и включает в себя также корректирующие катушки, межблочные механические структуры (опоры), систему экранов ТЗСМ, токовые и криогенные коммуникации. Все элементы СМС заключены в криостат. На рис. 2 показаны общий вид СМС в сборе и элементы ВК.

Внутренние вертикальные части КТП — «внутренние ноги» образуют центральную колонну магнитов, внутри которой размещён центральный соленоид. Это накладывает ограничения на размеры колонны. Основные параметры системы КТП приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Основные параметры системы КТП

Параметры системы КТП	ДЕМО-ТИН «малый»	ДЕМО-ТИН «большой»
Внутренний радиус центральной колонны магнитов, м	0,5	0,625
Наружный радиус центральной колонны магнитов, м	1,2	1,35
Площадь поперечного кольцеобразного сечения центральной колонны магнитов $S_{кол}$, м ²	3,7	4,5
Площадь трапециевидального сечения одной катушки $S_{кат}$, м ²	0,207	0,25
Периметр поперечного сечения КТП P_c , м	1,59	2,14
Длина части периметра поперечного сечения КТП, обращённой к ТЗСМ, P_{c1} , м	0,42	0,47
Длина образующей КТП $L_{обр}$ (линия, проходящая через центры тяжести всех поперечных сечений катушки), м	23	28
Высота «внутренней ноги» $L_{внут}$, м	~8	~9
Площадь наружной поверхности одной КТП $S_{пов} = P_c L_{обр}$, м ²	36,5	60
Полная площадь наружной поверхности одной КТП, на которую падает тепловое излучение, $S_{изл}$, м ² *	29,5	52
Площадь наружной поверхности одной «внутренней ноги», на которую падает тепловое излучение, $S_{изл1} = P_{c1} L_{внут}$, м ²	3,33	4,23
Объём одной КТП $V_{кат} = S_{кат} L_{обр}$, м ³	4,8	7
Объём одной «внутренней ноги» КТП $V_{внут} = S_{кат} L_{внут}$, м ³	1,66	2,25
Толщина ВК в области центральной колонны магнитов, м	0,47	0,8

*Необходимо учесть, что в области центральной колонны магнитов катушки тесно соприкасаются друг с другом и с центральным соленоидом. В местах соприкосновения катушек установка ТЗСМ невозможна, но в этих местах нет и теплопритока к катушкам. Площадь мест соприкосновения в одной катушке $S_{сопр}$ для варианта «малый» ~7 м², для варианта «большой» ~8 м². Соответственно $S_{изл} = S_{пов} - S_{сопр}$

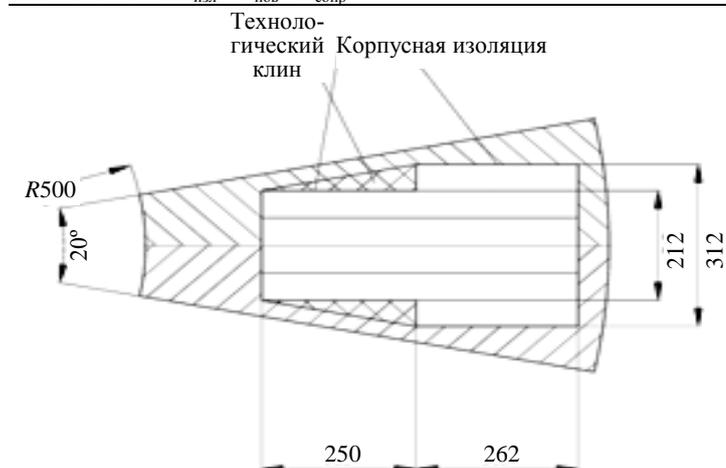


Рис. 3. Поперечное сечение внутренней части катушки тороидального магнитного поля

Заданные параметры обуславливают большую конструктивную плотность тока в КТП и предъявляют высокие требования к их механической прочности. На рис. 3 представлено поперечное сечение одной КТП.

Высокая доля конструкционного материала — стали в катушке обусловлена необходимостью обеспечить её прочность.

Вакуумная камера. Для снижения потоков нейтронов на СМС и обеспечения санитарных норм в здании токамака вокруг плазменного шнура необходимо разместить радиационную защиту, функцию которой

частично выполняет корпус ВК — стальная тороидальная конструкция D-образного поперечного сечения (см. рис. 1) из двух коаксиальных оболочек толщиной 30 мм.

Наружная и внутренняя стенки соединены системой рёбер жёсткости, между которыми установлены защитные стальные плиты и циркулирует охлаждающая вода. ВК может находиться в двух режимах — рабочем и прогрева.

В рабочем режиме температура охлаждающей воды на входе 70 °С, на выходе 100 °С. В режиме прогрева температура воды на выходе 200 °С. Соответственно максимальная температура поверхности ВК в рабочем режиме 100 °С, в режиме прогрева 200 °С.

В конструкцию ВК входят 18 вертикальных верхних и 18 вертикальных нижних патрубков для вакуумной откачки диверторов и для размещения механизмов крепления диверторных узлов, 18 экваториальных патрубков, шесть для инжекторов и для устройств дополнительного нагрева плазмы, шесть для обслуживания зоны бланкета и шесть для интеграции с другими системами токамака, опоры, узлы крепления, система охлаждения и др.

ВК является первым барьером безопасности. В ней создаются физические условия, необходимые для инициирования и поддержания термоядерной реакции.

Криостат. Он окружает СМС и ВК и создаёт второй барьер безопасности для удержания радиоактивных загрязнений. Криостат представляет собой плотный вакуумный корпус (рис. 4), окружающий весь токамак установки ДЕМО-ТИН. Функциями криостата являются крепление и поддержка ТЗСМ внутри него. Криостат включает в себя следующие основные компоненты:

- верхнюю круглую крышку с люками, снабжённую для увеличения механической прочности системой кольцевых и радиальных рёбер жёсткости;

- цилиндрическую секцию, которая имеет необходимое число проходов для соединения с патрубками ВК;

- нижнюю часть криостата, встроенную в основание токамака;

- обеспечивающие, управляющие и защитные системы.

ТЗСМ предназначена для того, чтобы защитить СМС, находящуюся при криогенных температурах, от тепловых потоков, излучаемых ВК, и от тепловых потоков, излучаемых корпусом криостата, находящегося при температуре окружающего воздуха.

Исходя из теплофизических и конструктивных требований, ТЗСМ будет состоять из отдельных панелей, принудительно охлаждаемых газообразным гелием на азотном уровне температуры 80—100 К, что позволит снизить тепловой поток на СМС. Выбор гелия, а не азота как теплоносителя обусловлен тем, что азот сильно активизируется нейтронами. Специальная обработка поверхностей панелей до степени черноты $\varepsilon = 0,05$ (электрополировка, нанесение покрытий и др.) позволит дополнительно снизить тепловой поток на СМС.

Конструктивно ТЗСМ — оболочка из немагнитной и малоактивируемой стали, состоящая из двух частей: внутренняя ТЗСМ, перехватывающая потоки тепла, идущие от ВК, и внешняя, конформная с корпусом ВК и его патрубками. Она, в свою очередь, делится на характерные части:

- ТЗСМ-1. Панели защиты центральной колонны магнитов, расположенные между поверхностями «внутренних ног» КТП и ВК;

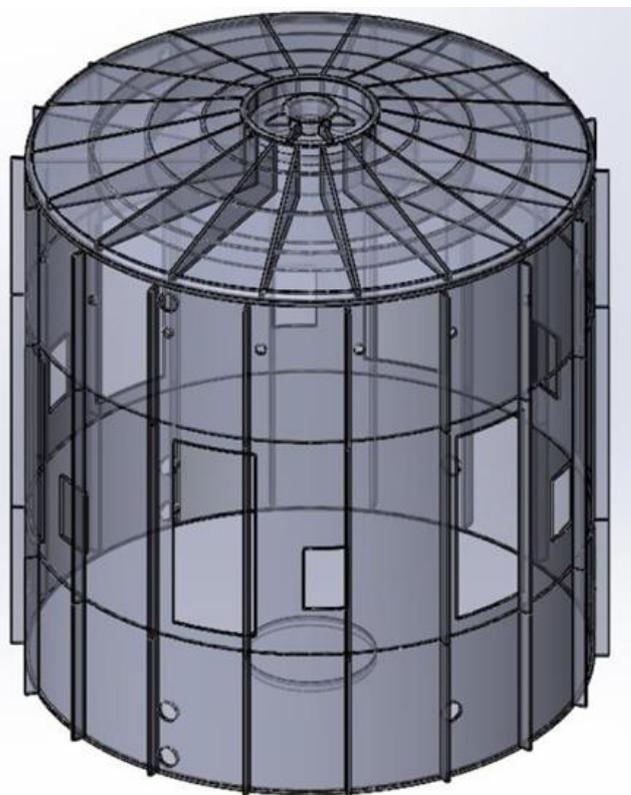


Рис. 4. Схема корпуса криостата ДЕМО-ТИН

— ТЗСМ-2. Панели защиты поверхностей катушек СМС, расположенных вне центральной колонны магнитов, установленные на корпусе ВК;

— ТЗСМ-3. Панели защиты, установленные на патрубках ВК.

Внешняя ТЗСМ — оболочка, конформная с поверхностью корпуса криостата ТЗСМ-4. Её панели крепятся на внутренней поверхности корпуса криостата. Конструкция панелей в различных частях ТЗСМ может различаться. Панели имеют изогнутую форму, повторяющую форму поверхности, на которой они установлены. Площадь одной панели обычно менее $0,5 \text{ м}^2$, и их общее число составляет несколько тысяч.

Кроме панелей защиты с интегрированными в них трубками гелиевого охлаждения, существуют также другие конструктивные элементы ТЗСМ:

— устройства, соединяющие соседние панели между собой в оболочечную структуру;

— узлы крепления панелей защиты к ВК;

— лабиринтные соединения, которые позволяют производить вакуумную откачку внутреннего объёма криостата.

Рассматриваются несколько вариантов конструкции панелей ТЗСМ. Вариант конструкции панели № 1, предложенный в НИИЭФА им Д.В. Ефремова, условно назовём «плиточный». Вариант конструкции панели № 2, предложенный в НИЦ «Курчатовский институт», условно назовём «подушечный». Вариант конструкции панели № 3, предложенный в НИЦ «Курчатовский институт», условно назовём «радиаторный».

Принятые предположения о конструкции «плиточного» варианта ТЗСМ. В ТЗСМ-1 и ТЗСМ-4 панель выполнена в виде однослойной конструкции из плиты переменной толщины (10 или 20 мм) (рис. 5). В ТЗСМ-2 и ТЗСМ-3 панель выполнена в виде двуслойной конструкции с толщиной плит 5 и 10 мм (рис. 6).

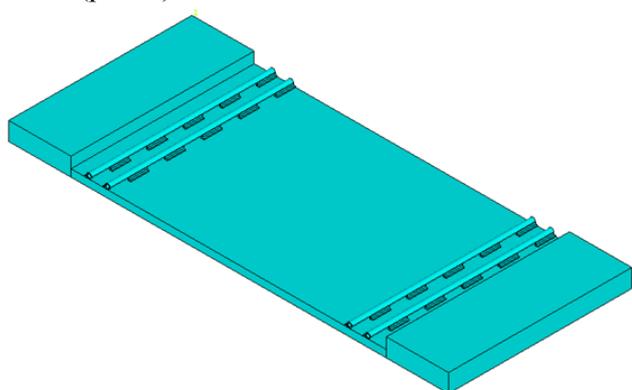


Рис. 5. Однослойная панель ТЗСМ с трубками охлаждения



Рис. 6. Двуслойная панель ТЗСМ с трубками охлаждения

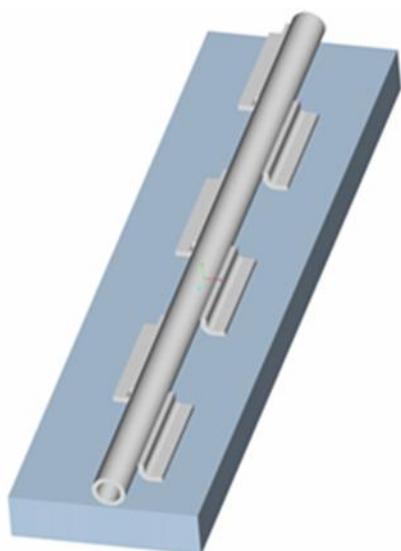


Рис. 7. Соединение трубки охлаждения с панелью

Для организации охлаждения газообразным гелием применяется стальная трубка теплоносителя (далее просто трубка) диаметром 14×2 мм, прикрепленная к плите стяжками толщиной 3 и длиной 50 мм, расположенными в шахматном порядке (рис. 7). Конструкция обладает однократным резервированием. Трубки проведены попарно — одна задействована в охлаждении, другая — резервная — в рабочем режиме пустая. Она заполняется гелием и используется только в случае повреждения первой. Для реализации этого необходима и резервная система коллекторов, так как установка внутри криостата клапанов, позволяющих отсечь повреждённые трубки, представляется практически невозможной. Материал плит — нержавеющей сталь, облицованная с внешних поверхностей (обращённых к ВК и СМС) серебряным покрытием для уменьшения степени черноты.

Анализ ранее полученных результатов для «плиточного» варианта ТЗСМ. При проектировании ДЕМО-ТИН был выполнен анализ температурного состояния нескольких панелей ТЗСМ, охлаждаемых двумя прямыми параллельными трубками, т.е. $n = 2$ (n — число действующих параллельных трубок, охлаждающих одну панель). Трубки закреплены вблизи краёв панели. Расчёт проводится на основе 3D-моделирования. Результаты расчётов температуры панелей в ТЗСМ-1 и ТЗСМ-2 для рабочего режима (температура поверхности ВК $T_{\text{ВК}} = 373 \text{ К}$) представлены на рис. 8. Полученные результаты показывают, что в этом случае на каждой панели ТЗСМ-1 в её центре будет участок площадью около четверти от общей площади панели с температурой $\sim 250 \text{ К}$. Плотность теплового потока излучением с ТЗСМ-1 на поверхность КТП $q_{\text{пад}}$ составит $\sim 5,8\text{—}17,9 \text{ Вт/м}^2$. Эта величина значительно превышает рекомендуемое для СМС максимальное значение $q_{\text{пад}} = 1 \text{ Вт/м}^2$.

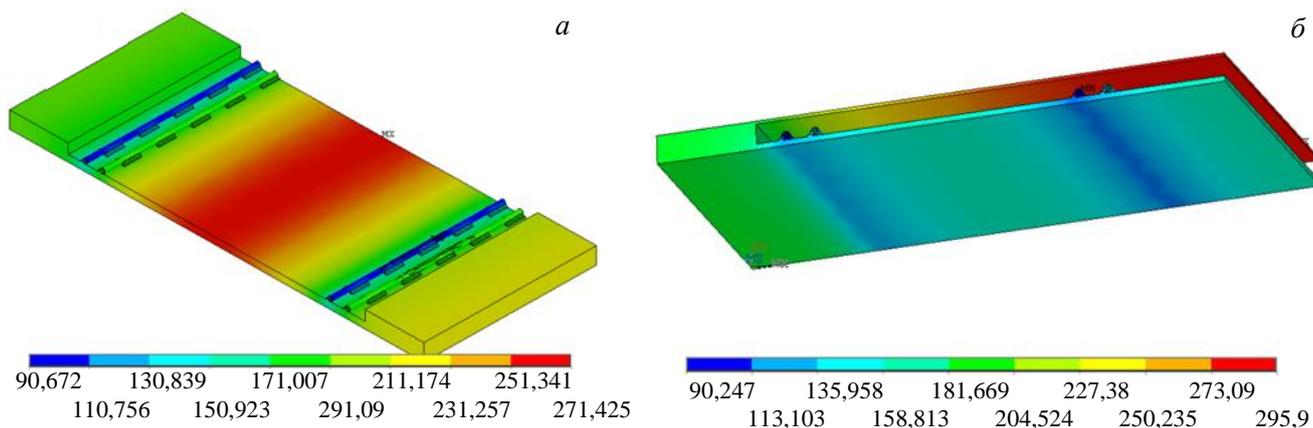


Рис. 8. Температурное распределение по панелям тепловой защиты: *а* — для внутреннего цилиндра ВК (однослойная); *б* — для внешней части ВК (двухслойная). Рабочий режим

С учётом этого представляется разумным изменить конструкцию панели — трубки с охлаждающим гелием сделать изогнутыми, так, чтобы не было больших неохлаждаемых участков поверхности панели (рис. 9). Предлагается также увеличить количество независимых трубок для одной панели с двух до четырёх ($n = 4$).

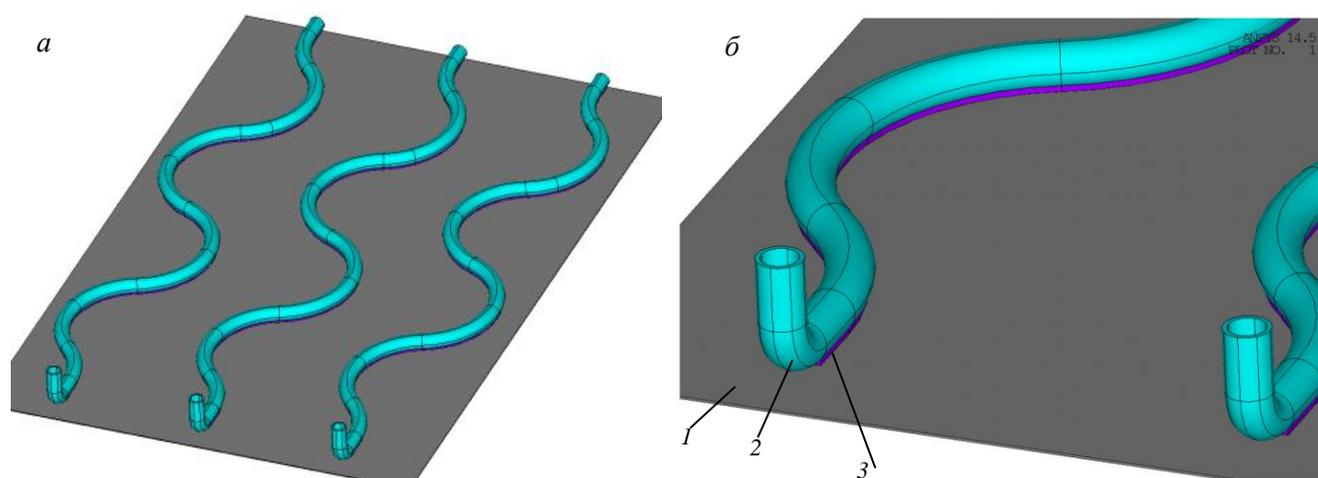


Рис. 9. Модифицированная «плиточная» панель: *а* — общий вид; *б* — фрагмент; 1 — плита; 2 — трубка охлаждения; 3 — пайка или сварка

Принятые предположения о конструкции «подушечного» варианта ТЗСМ. ТЗСМ выполнена из однотипных панелей толщиной $\sim 20\text{—}25 \text{ мм}$, образованных двумя поверхностями (обечайками). «Подушечная» конструкция получается следующим образом. Два листа из нержавеющей стали — обечайки размером, близким к требуемому размеру панели, и толщиной 2 мм кладутся друг на друга. Края заготовок свариваются сплошным швом, за исключением четырёх небольших участков, куда закладываются и привариваются два входных и два выходных штуцера. В пространстве между швами обечайки в нескольких местах свариваются между собой точечной сваркой. Затем закрываются выходные штуцеры, во вход-

ные подаётся жидкость под давлением. Панель надувается и приобретает нужную форму и толщину, её общий вид показан на рис. 10, а. Панели подобной конструкции применены в установке SST-1, сооружённой в Индии.

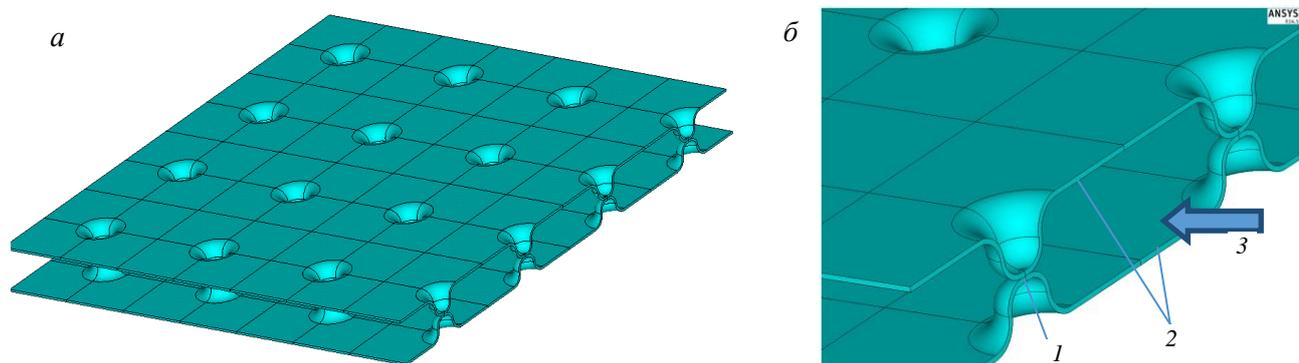


Рис. 10. Принципиальная схема «подушечной панели» (а), поперечное сечение «подушечной панели» (фрагмент) (б): 1 — точечная сварка; 2 — обечайки; 3 — направление течения газа

Если необходима панель сложной изогнутой формы, то обечайкам нужная форма придаётся штамповкой, затем они свариваются и надуваются.

Панели собираются в оболочечную структуру, выходные штуцеры каждой панели соединяются с входными штуцерами следующей панели, и образуется тракт прокачки гелия. Тракт прокачки представляет собой «плоскую щель» между обечайками с поперечным сечением, близким к прямоугольному (рис. 10, б). Материал панелей покрыт с внешних поверхностей, обращённых к ВК и СМС, серебряным покрытием для уменьшения степени черноты. Конструкция является нерезервируемой — в случае течи газа из одной панели вся конструкция теряет работоспособность.

Принятые предположения о конструкции «радиаторного» варианта ТЗСМ. ТЗСМ выполнена из однотипных панелей переменной толщины, образованных двумя поверхностями. «Радиаторная» конструкция получается следующим образом. Берутся два листа из нержавеющей стали — обечайки размером, близким к требуемому размеру панели, и толщиной 2 мм. В обечайках штампуются углубления, изгибы которых повторяют изгибы трубок с охлаждающим гелием диаметром 14×2 мм (как в варианте «плиточный»). Затем трубки закладываются в углубления, а обечайки накладываются друг на друга и скрепляются в нескольких местах точечной сваркой. На внутреннюю поверхность обечаек наносится слой герметика, чтобы исключить образование пустот. Края обечаек свариваются сплошным швом. Поперечное сечение панели представлено на рис. 11.

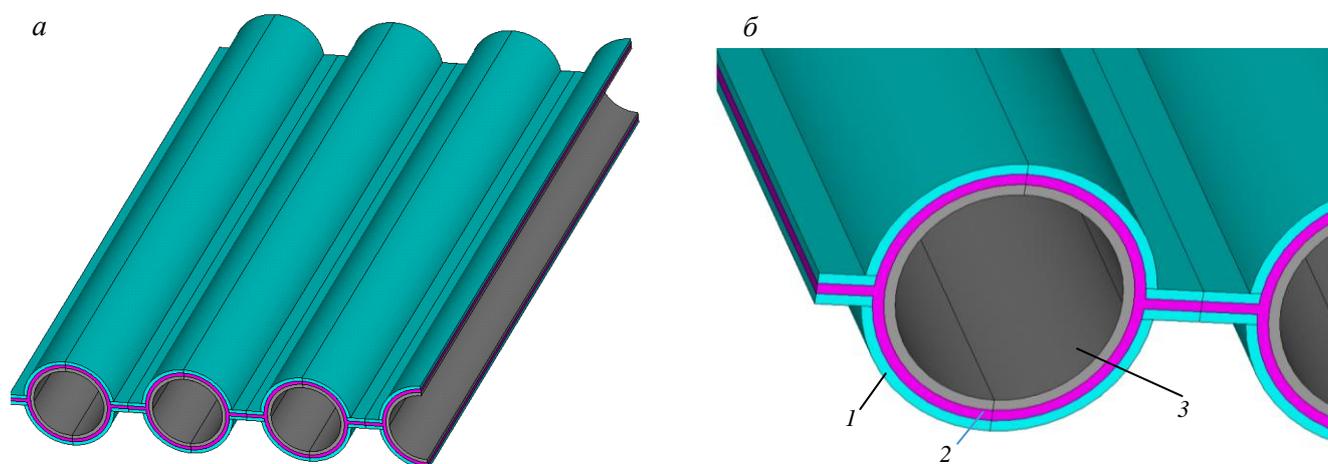


Рис. 11. Поперечное сечение радиаторной панели: а — общий вид; б — фрагмент; 1 — обечайка; 2 — слой герметика; 3 — охлаждающая трубка с гелием

Панели собираются в оболочечную структуру, на выходе из каждой панели трубки соединяются с трубками следующей панели, и образуется тракт прокачки гелия. Материал панелей облицован с внешних поверхностей, обращённых к ВК и СМС, серебряным покрытием для уменьшения степени черноты.

Конструкция может быть выполнена как резервируемой (если трубки установлены попарно — одна задействована в охлаждении, другая — резервная — в рабочем режиме пустая), так и нерезервируемой — в этом случае при течи газа из одной панели вся конструкция теряет работоспособность.

При проектировании СМС и ТЗСМ ДЕМО-ТИН представляется необходимым учесть опыт проектирования и эксплуатации установок с СМС.

Установка Токамак-7. Установка эксплуатировалась в РИЦ «Курчатовский институт» с 1979 по 1987 г. Основные параметры Т-7 — первого токамака с СМС приведены в табл. 1 [6, 7].

Конструктивно токамак состоит из пяти тороидальных оболочек, вложенных одна в другую:

- рабочая (разрядная) камера;
- внутренняя ТЗСМ;

— тороидальный арочный каркас (корпус) из алюминиевого сплава, охватывающий КТП и состоящий из 96 клиновых колец, который воспринимает силы, действующие на обмотки. Каркас воспринимает также тепловые потоки от внутренней и наружной ТЗСМ. Он охлаждается гелием из каналов СМС. Конструктивно каркас состоит из восьми сборочных секций — «октантов»;

- наружная ТЗСМ;
- криостат.

Для достижения высоких параметров установки зазоры между всеми пятью тороидальными оболочками сделаны небольшими — по 10—20 мм.

Стальной наружный вакуумный корпус криостата тороидальной формы максимально приближен к наружной ТЗСМ и состоит из 16 секций. Корпус разборный, его толщина 6 мм. 16 люков диаметром 0,5 м на корпусе криостата, повторяющиеся в наружной ТЗСМ, обеспечивают лёгкий доступ к сосредоточенным под ними местам многочисленных паяк трубок охлаждающих каналов на гелиевых коллекторах.

ТЗСМ — оболочка из меди толщиной 15 мм состоит из двух частей. Внутренняя часть установлена между разрядной камерой и арочным каркасом. Она имеет тороидальную форму, её большой радиус совпадает с большим радиусом установки, малый радиус $r_{\text{внут}} = 0,38$ м. Внешняя часть установлена между арочным каркасом и криостатом, имеет тороидальную форму, её большой радиус совпадает с большим радиусом установки, малый радиус $r_{\text{внеш}} = 0,58$ м. ТЗСМ защищает КТП от нагрева как импульсными магнитными полями, так и тепловыми потоками от криостата, а также используется для пассивной стабилизации плазмы.

Для снижения тепловых потоков поверхности, которые находятся при криогенных температурах, в том числе поверхности ТЗСМ, оклеены алюминиевой фольгой. При нормальном режиме работы мощность теплового потока на ТЗСМ $Q_s \sim 150$ Вт. При суммарной площади поверхности внутренней и внешней ТЗСМ $S_{\text{ТЗСМ}} = 46,2$ м² средняя плотность теплового потока на ТЗСМ $q_s = Q_s/S_{\text{ТЗСМ}} \sim 3,2$ Вт/м².

Охлаждение ТЗСМ осуществляется путём прокачки жидкого азота через трубки диаметром 8×1 мм, припаянные к медным оболочкам. Для поддержания температуры оболочек на уровне 80 К пар, образующийся при прокачке азота через трубки, сбрасывается в атмосферу. Для понижения температуры азота до 65 К необходима откачка его пара. Система азотного обеспечения работает на привозном жидком азоте. Она может подавать азот при температуре от 80 до 300 К, что достигается смешиванием жидкого и газообразного азота.

Установка Т-15. Основные параметры установки Т-15 и её СМС приведены в табл. 1 [6, 8]. Установка была введена в эксплуатацию в 1988 г., в настоящее время демонтирована и находится в стадии глубокой модернизации.

Криостат выполнен в виде цилиндрического сварного корпуса диаметром 10,8 м и высотой 5,9 м из нержавеющей стали толщиной 30—40 мм, который создаёт теплоизоляционный вакуумный объём между элементами с криогенными температурами и элементами с комнатной или более высокой температурой. Внутри корпуса находятся СМС, замкнутый двенадцатиярёмный магнитопровод, разрядная камера, диагностическое оборудование и пр. Корпус изолирован от балок магнитопровода стеклотекстолитовыми прокладками.

ТЗСМ — оболочка из нержавеющей стали состоит из двух частей — внутренней и внешней. Внутренняя часть уменьшает тепловой поток от разрядной камеры к КТП как при прогреве камеры до темпе-

ратуры ~ 700 К, так и при рабочем режиме установки, когда температура камеры ~ 425 К. Внутренняя ТЗСМ имеет тороидальную форму и разделена на 12 механически и электрически не связанных между собой секторов из листовой нержавеющей стали толщиной 2—4 мм, которые закреплены на корпусах КТП на кронштейнах с низкой теплопроводностью. Охлаждающие трубки из той же стали диаметром 8×1 мм припаяны к поверхности секторов. Каждый сектор для снижения вихревых токов разделён в вертикальной плоскости на четыре электрически изолированные секции, скреплённые фланцевыми соединениями.

При температуре разрядной камеры ~ 700 К мощность теплового потока на внутреннюю ТЗСМ равна $Q_s \sim 0,5$ МВт. Охлаждение ТЗСМ производится водой, прокачиваемой по трубкам водяной системы охлаждения. При температуре камеры ~ 425 К охлаждение ТЗСМ производится жидким азотом с температурой 80 К, прокачиваемым по трубкам азотной системы охлаждения. На каждом секторе имеются две ветви водяного охлаждения и четыре азотного.

Внешняя часть ТЗСМ расположена внутри корпуса криостата параллельно его стенкам и охлаждается жидким азотом с температурой 80 К. Она выполнена в виде цилиндрического каркаса с рёбрами, к которым на болтах крепятся пластины из нержавеющей стали толщиной 3 мм. К пластинам припаяны охлаждающие трубки диаметром 16×1 мм, через которые принудительно прокачивается жидкий азот. Предусмотрена возможность снятия пластин через люки в корпусе криостата. В тороидальном направлении внешняя ТЗСМ разделена на шесть секторов, изолированных друг от друга стеклотекстолитовыми прокладками. В вертикальном направлении ТЗСМ состоит из четырёх рядов секторов. Секторы крепятся друг к другу болтовыми соединениями.

Внешняя ТЗСМ дополнительно покрыта матами из слоисто-вакуумной тепловой изоляции. Медь в конструкции экранов не применяется для обеспечения быстрого проникновения в плазму управляющего магнитного поля и уменьшения электродинамических сил, действующих на экраны при срыве плазмы.

Установка ИТЭР. Основные параметры установки ИТЭР, которая в настоящее время находится в стадии сооружения [9], приведены в табл. 1.

ТЗСМ ИТЭР [3] конструктивно близка к ТЗСМ ДЕМО-ТИН. Материал панелей и охлаждающих трубок — сталь 304 LN. Внутренняя ТЗСМ, окружающая ВК, имеет тороидальную форму высотой 12 м и максимальным диаметром 20 м. Отдельные панели собраны в секторы, их общее число в тороидальном направлении девять. Секторы механически и электрически изолированы друг от друга и от ВК.

Серебряное покрытие панелей имеет степень черноты $\epsilon = 0,05$. Температура охлаждающего газобразного гелия 80 К. Трубки диаметром $13,72 \times 2,24$ мм приварены к панелям, средняя толщина которых ~ 5 мм. Конструкция панелей в различных частях ТЗСМ может различаться.

ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕПЛОЙ ЗАЩИТЫ УСТАНОВОК Т-7 И Т-15

В конструкции ТЗСМ установки Т-7 крепление охлаждающих трубок к медному кожуху осуществлялось пайкой. По результатам эксплуатации ТЗСМ показала высокую надёжность, аварий не было. В установке Т-15 охлаждающие трубки приваривались к панелям ТЗСМ. Флюс, применяемый при этом, оказался коррозионно-активным, что вызвало повреждение трубок и многочисленные течи азота из них. После изменения технологии сварки течи из трубок прекратились. Опыт эксплуатации свидетельствует о надёжности конструкции ТЗСМ, но следует отметить следующие обстоятельства:

- период работы ТЗСМ установок Т-7 и Т-15 был сравнительно короток (около одного года для каждой установки);
- общая длина охлаждающих трубок в этих установках была значительно меньше, чем предполагается в установке ДЕМО-ТИН;
- плотность теплового потока на панели была меньше, чем предполагается в ДЕМО-ТИН;
- условия работы ТЗСМ в этих установках были сравнительно мягкими. Отсутствовали такие факторы воздействия на ТЗСМ, как нейтронное и γ -излучение, встряски при срывах плазмы.

На установке SST-1 не наблюдалось отказов ТЗСМ с «подушечными» панелями, но общий срок эксплуатации этой установки также невелик.

МЕТОДИКА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЁТА И РАСЧЁТ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ

Методика теплового расчёта в рабочем режиме. Для любого варианта конструкции панели ТЗСМ существуют три способа подвода тепла к ней и два способа отвода тепла от неё. Каждый из этих способов характеризуется своей мощностью: $Q_{\text{внут}}$ — мощность внутреннего объёмного тепловыделения, вызванного нейтронным и γ -излучением; $Q_{\text{пад}}$ — мощность падающего теплового потока, вызванного излучением ВК и/или корпуса криостата; $Q_{\text{креп}}$ — суммарная мощность локальных тепловых потоков в местах крепления опор панелей. Крепление ТЗСМ к ВК подразумевает наличие локального теплового потока от камеры к панели защиты, а в случае крепления панели к СМС появляется дополнительный тепловой поток к СМС; $Q_{\text{изл}}$ — мощность теплового потока, излучаемого с панели на СМС; $Q_{\text{охл}}$ — тепловая мощность, отводимая при прокачке теплоносителя.

Уравнение теплового баланса в режиме нормальной эксплуатации, когда осуществляется охлаждение прокачкой гелия, для одной (любой) панели ТЗСМ запишется в виде

$$Q_{\text{пад}} + Q_{\text{внут}} + Q_{\text{креп}} = Q_{\text{изл}} + Q_{\text{охл}}, \text{ Вт.} \quad (1)$$

В дальнейшем рассматриваем внутреннюю ТЗСМ-1, на которую падает тепловой поток от ВК. Это связано с тем, что температура ВК всегда выше температуры корпуса криостата и внутренняя ТЗСМ подвергается максимальной тепловой нагрузке. В нормальном режиме работы плотность падающего теплового потока излучением на ТЗСМ от ВК определяется по формуле [10]

$$q_{\text{пад}} = Q_{\text{пад}}/S_{\text{пад}} = c_0 \varepsilon_{\text{эф1}} ((T_{\text{ВК}}/100)^4 - (T_{\text{пад}}/100)^4), \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

где $S_{\text{пад}}$ — площадь поверхности панели, на которую падает тепловое излучение, м^2 ; c_0 — коэффициент излучения абсолютно чёрного тела $5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $T_{\text{ВК}}$ — температура поверхности ВК, К; $T_{\text{пад}}$ — температура поверхности панели, на которую падает излучение, К; $\varepsilon_{\text{эф1}}$ — приведённая степень черноты при излучении с поверхности ВК на панель, которая определяется по

$$\varepsilon_{\text{эф1}} = 1/(1/\varepsilon_{\text{ВК}} + 1/\varepsilon_{\text{пад}} - 1), \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\text{ВК}}$ — степень черноты поверхности ВК; $\varepsilon_{\text{пад}}$ — степень черноты поверхности панели, на которую падает излучение.

Плотность теплового потока излучением с ТЗСМ на поверхность СМС

$$q_{\text{изл}} = Q_{\text{изл}}/S_{\text{изл}} = c_0 \varepsilon_{\text{эф2}} ((T_{\text{изл}}/100)^4 - (T_{\text{м}}/100)^4), \text{ Вт/м}^2, \quad (4)$$

где $S_{\text{изл}}$ — площадь излучающей поверхности панели, м^2 ; $T_{\text{изл}}$ — температура излучающей поверхности панели, К; $T_{\text{м}}$ — температура поверхности СМС, К; $\varepsilon_{\text{эф2}}$ — приведённая степень черноты при излучении с поверхности панели на поверхность СМС, которая определяется по

$$\varepsilon_{\text{эф2}} = 1/(1/\varepsilon_{\text{изл}} + 1/\varepsilon_{\text{м}} - 1), \quad (5)$$

где $\varepsilon_{\text{изл}}$ — степень черноты излучающей поверхности панели; $\varepsilon_{\text{м}}$ — степень черноты поверхности СМС, на которую падает излучение.

Мощность внутреннего объёмного тепловыделения в панели

$$Q_{\text{внут}} = q_{\text{впан}} V_{\text{п}}, \text{ Вт}, \quad (6)$$

где $q_{\text{впан}}$ — плотность внутреннего объёмного тепловыделения в панели, $\text{Вт}/\text{м}^3$; $V_{\text{п}}$ — объём металла в панели, м^3 .

Конструкция креплений ТЗСМ на данном этапе проектирования детально не разработана, и, исходя из оценочных расчётов, можно предварительно сделать два вывода:

— опоры креплений ТЗСМ необходимо устанавливать на ВК, в случае установки их на СМС теплоприток к ней будет недопустимо большим;

— суммарные теплопритоки от опор не должны превышать 30% суммарной мощности теплового потока излучением от ВК на ТЗСМ. В дальнейшем считаем

$$Q_{\text{креп}} = 0,3 Q_{\text{пад}}, \text{ Вт.} \quad (7)$$

Методика гидравлического расчёта варианта «плиточный». Мощность охлаждения панели, обеспечиваемая течением гелия через прикреплённые к ней параллельные трубки, определяется как

$$Q_{\text{охл}} = Gc_p\Delta T, \text{ Вт}, \quad (8)$$

где G — расход гелия через все параллельные трубки панели, кг/с; c_p — теплоёмкость гелия, Дж/(кг·К); ΔT — подогрев гелия в панели, К.

Расход гелия через одну трубку

$$G_1 = G/n, \text{ кг/с}. \quad (9)$$

Расход гелия на охлаждение ТЗСМ-1

$$G_{\text{ТЗСМ1}} = N_{\text{тр1}}G_1, \text{ кг/с}, \quad (10)$$

где $N_{\text{тр1}}$ — общее число трубок в ТЗСМ-1.

Подстановка исходных данных в (2), (4), (6), (7) и (8), а их в (1) даёт уравнение, из которого находим G . Далее по (9) определяем G_1 ; по (10) $G_{\text{ТЗСМ1}}$ — расход гелия на охлаждение ТЗСМ-1; по методике [11] w — скорость гелия в трубке; ΔP — потеря давления гелия при течении его в трубках одного сегмента.

Методика гидравлического расчета варианта «подушечный». Мощность охлаждения панели, обеспечиваемая течением гелия через «плоскую щель» между обечайками, определяется по формуле (8), в этом случае G — расход гелия через «плоскую щель». Дальнейшие расчёты проводятся аналогично, но с учётом того, что гелий течёт не в трубках, а в «плоской щели».

Методика теплового расчёта при аварийном режиме. Одной из возможных аварийных ситуаций в ТЗСМ является прекращение прокачки гелия через неё. Причинами этого могут быть появление постороннего предмета в тракте прокачки, деформация или разрыв трубопровода, остановка газодувки и др.

В случае возникновения такой аварийной ситуации возможны два варианта её протекания: первый — термоядерная реакция продолжается, существует нейтронный поток и внутреннее тепловыделение в панелях ТЗСМ; второй — термоядерная реакция прекратится и внутреннего тепловыделения в панелях не будет, $q_{\text{впан}} = 0$ (остаточным тепловыделением пренебрегаем). В первом варианте уравнение теплового баланса запишется в виде, зависящем от отношения температуры $T_{\text{пад}} = T_{\text{изл}}$ и $T_{\text{ВК}}$, т.е. возможны два режима охлаждения панели.

Первый режим. Если $T_{\text{пад}} \geq T_{\text{ВК}}$, то в этом случае будет иметь место локальный тепловой поток от ТЗСМ к ВК. Панель ТЗСМ будет излучать тепло в две стороны к ВК и СМС. Тогда

$$Q_{\text{внут}} - Q_{\text{креп}} = Q_{\text{изл1}} + Q_{\text{изл2}}, \text{ Вт}, \quad (11)$$

где $Q_{\text{внут}}$ — определяем по (6), $Q_{\text{изл2}}$ — по (4);

$$Q_{\text{креп}} = 0,3 \cdot Q_{\text{изл1}}; \quad (12)$$

$$Q_{\text{изл1}} = S_{\text{пад}}c_0\varepsilon_{\text{эф1}}((T_{\text{пад}}/100)^4 - (T_{\text{ВК}}/100)^4). \quad (13)$$

Затем определяем $T_{\text{пад}}$ и плотность тепловых потоков от панели к ВК и СМС.

Второй режим. Если $T_{\text{пад}} \leq T_{\text{ВК}}$, то в этом случае ВК будет излучать тепло на панель ТЗСМ, а панель, в свою очередь, будет переизлучать это тепло и выделившееся в ней тепло на СМС. Тогда используем (1), в котором $Q_{\text{охл}} = 0$. Затем определяем $T_{\text{пад}}$ и плотность тепловых потоков от ВК к панели и от панели к СМС. При втором варианте протекания аварии возможен только второй режим охлаждения панели.

Исходные данные, общие для расчёта всех вариантов ТЗСМ. В дальнейшем в качестве примера будем рассматривать ТЗСМ-1 для варианта «малый». В этом месте панели образуют цилиндрическую поверхность со средним радиусом ~1,23 м и высотой ~8 м. Полная площадь ТЗСМ-1 $S_{\text{ТЗСМ1}} \sim 62 \text{ м}^2$. В тороидальном направлении ТЗСМ-1 разделена на шесть секторов. В этом направлении сектор состоит из двух панелей, а в вертикальном направлении из 20 панелей, последовательно охлаждаемых одним потоком гелия. Эти 20 панелей образуют один сегмент, общее число сегментов в ТЗСМ-1, охлаждаемых параллельными потоками гелия, $N_{\text{сегм1}} = 12$.

Общее число панелей в ТЗСМ-1 $N_{\text{пан1}} = 20N_{\text{сегм1}} = 240$. При одинаковых размерах всех панелей каждая имеет размер 0,64×0,4 м и площадь $S_{\text{пан}} = 0,256 \text{ м}^2$. Панель представляет собой участок цилиндрической поверхности, но в дальнейшем для упрощения расчётов считаем её плоской. Подвод охлаждающе-

го гелия осуществляется с длинной стороны панели (как показано на рис. 5). На выходе из одной панели гелий поступает на вход в другую. Примем средний подогрев гелия в каждой из 20 последовательно установленных панелей $\Delta T = 1$ К.

Основные характеристики ТЗСМ:

Теплоноситель . . .	Газообразный гелий
Входные температура/давление теплоносителя, К/МПа . . .	80/1
Максимально допустимая потеря давления теплоносителя при течении его в ТЗСМ, МПа . . .	0,1
Максимальный подогрев теплоносителя, К . . .	20
Проектная степень черноты покрытия поверхностей панелей ϵ . . .	Не более 0,05
Коэффициент ослабления плотности теплового потока . . .	Более 100

Следует отметить, что значение степени черноты поверхностей может изменяться в процессе эксплуатации (например, из-за намерзания газов на поверхности, изменения свойств материалов под нейтронным облучением и т.п.), и это необходимо учесть. В дальнейших расчётах рассматриваем два варианта значений степени черноты поверхностей — «проектное» и «максимальное», возникшее под действием указанных факторов. Значения возможных степеней черноты и приведённых степеней черноты даны в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Возможные степени черноты поверхностей

Степень черноты	Проектное значение	Максимальное значение
$\epsilon_{ВК}$	0,35	0,45
$\epsilon_{пад}$	0,05	0,15
$\epsilon_{изл}$	0,05	0,15
ϵ_m	0,05	0,15
$\epsilon_{эф1}$	0,046	0,126
$\epsilon_{эф2}$	0,026	0,081

Величину $q_{v\text{ пан}}$ можно оценить по известной формуле, используемой для расчёта ВК, основанной на опыте проектирования ИТЭР и его аналогичной железобетонной защиты. В этой защите $q_{v\text{ ВК}}$ на толщине 18 см спадает на порядок. Отсюда $q_{v\text{ ВК}}$ может быть записано в виде

$$q_{v\text{ ВК}} = q_{v\text{ ВК}0} \exp(-12,67 \times x), \text{ Вт/м}^3, \quad (14)$$

где x — расстояние по нормали от внутренней поверхности ВК, м; $q_{v\text{ ВК}0} = 1,77 \text{ МВт/м}^3$ — плотность внутреннего объёмного тепловыделения на внутренней поверхности ВК. Величину $q_{v\text{ ВК}}$ для внешней поверхности ВК можно использовать в качестве плотности объёмного тепловыделения в панелях ТЗСМ. Для варианта «малый» $q_{v\text{ пан}} = 4,6 \text{ кВт/м}^3$, для варианта «большой» $q_{v\text{ пан}} = 0,07 \text{ кВт/м}^3$.

Принимаем $T_{ВК} = 373 \text{ К}$ для рабочего режима и $T_{ВК} = 473 \text{ К}$ для режима прогрева, $T_m = 4,5 \text{ К}$. Теплофизические свойства гелия приведены в [12].

При принятых допущениях суммарный подогрев теплоносителя во всех 20 панелях составит 20 К и не превысит допустимого значения. Последняя по потоку гелия панель будет иметь температуру $\sim 100 \text{ К}$, и расчёты будем вести для этой панели, так как излучаемый с неё на КТП тепловой поток имеет максимальную плотность.

Считаем температуру панели одинаковой на всех участках её поверхностей и равной температуре гелия на выходе из ТЗСМ, т.е. $T_{пад} = T_{изл} = 100 \text{ К}$. Принимаем $S_{пад} = S_{изл} = S_{пан} = 0,256 \text{ м}^2$.

Исходные данные для расчёта «плиточного» варианта ТЗСМ. Считаем, что половина панели имеет толщину 10, половина 20 мм. С учётом металла в трубках и их креплениях объём металла в панели $V_n = 0,0045 \text{ м}^3$.

Общее число трубок в ТЗСМ-1 $N_{тр1} = nN_{сегм1} = 48$. При этом для 20 последовательных по потоку гелия панелей (сегмента) общая длина одной из четырёх трубок $l_1 = 20 \text{ м}$, число гибов на ней $N_{гиб1} = 100$.

Исходные данные для расчёта «подушечного» варианта ТЗСМ. В этом варианте количество панелей, сегментов, их размеры и взаимное расположение такие же, как в варианте «плиточный». С учётом металла в штуцерах и креплениях объём металла в панели $V_n = 0,0012 \text{ м}^3$.

Теплогидравлический расчёт «плиточной» панели ТЗСМ для вариантов «малый» и «большой». Режим нормальной эксплуатации. Результаты расчётов для «малого» и «большого» вариантов конструкции ДЕМО-ТИН приведены в табл. 4. Значения для «большого» варианта даны в скобках.

Т а б л и ц а 4. Теплогидравлические характеристики «плиточной» панели в режиме нормальной эксплуатации

Параметр	$T_{BK} = 373 \text{ К}$		$T_{BK} = 473 \text{ К}$	
	Степень черноты проектная	Степень черноты максимальная	Степень черноты проектная	Степень черноты максимальная
G , кг/с	0,007 (0,0032)	0,0128 (0,0089)	0,0123 (0,0084)	0,0267 (0,0228)
G_1 , кг/с	0,0017 (0,0008)	0,0032 (0,0022)	0,0031 (0,0021)	0,0067 (0,0057)
$G_{ТЗСМ1}$, кг/с	0,084 (0,039)	0,153 (0,106)	0,147 (0,1)	0,32 (0,27)
W , м/с	4,5 (2)	8,2 (5,6)	7,9 (5,4)	17,1 (14,5)
ΔP , кПа	5,1 (1)	16,6 (7,9)	15,6 (7,1)	73 (52,7)
$q_{пад}$, Вт/м ²	50,1 (50,1)	138,3 (138,3)	130,3 (130,8)	356,9 (356,9)
$q_{изл}$, Вт/м ²	0,15 (0,15)	0,46 (0,46)	0,15 (0,15)	0,46 (0,46)

Аварийный режим. В случае аварийной ситуации, протекающей по первому варианту (с прекращением прокачки гелия через панель, но с сохранением внутреннего тепловыделения), режим охлаждения панели — первый или второй — будет зависеть от соотношения величин T_{BK} , $q_{v \text{ пан}}$, $\epsilon_{эф1}$ и $\epsilon_{эф2}$. Результаты расчётов для «малого» и «большого» вариантов конструкции ДЕМО-ТИН приведены в табл. 5. Значения для «большого» варианта даны в скобках.

Т а б л и ц а 5. Тепловые характеристики «плиточной» панели в аварийном режиме с сохранением внутреннего тепловыделения

Параметр	$T_{BK} = 373 \text{ К}$		$T_{BK} = 473 \text{ К}$	
	Степень черноты проектная	Степень черноты максимальная	Степень черноты проектная	Степень черноты максимальная
$T_{пад} = T_{изл}$, К	402,2 (343)	370 (338)	476 (433)	445 (427,8)
$q_{изл1}$, Вт/м ²	17,8 (14,4)	4,4 (45,1)	3,4 (39,1)	77,5 (117,8)
$q_{изл2}$, Вт/м ²	38,5 (20,4)	86,1 (59,9)	75,7 (51,8)	180,1 (152,7)

Результаты расчётов аварийной ситуации, протекающей по второму варианту (с отсутствием внутреннего тепловыделения в панели), приведены в табл. 6. В этом случае нет разницы значений для «малого» и «большого» вариантов, так как $q_{v \text{ пан}} = 0$. T_{BK} в первый период аварийной ситуации считаем постоянной, но со временем она будет уменьшаться из-за отсутствия внутреннего тепловыделения в ней.

Т а б л и ц а 6. Тепловые характеристики «плиточной» панели в аварийном режиме без внутреннего тепловыделения

Параметр	$T_{BK} = 373 \text{ К}$		$T_{BK} = 473 \text{ К}$	
	Степень черноты проектная	Степень черноты максимальная	Степень черноты проектная	Степень черноты максимальная
$T_{пад} = T_{изл}$, К	341	337	432,2	427,6
$q_{изл1}$, Вт/м ²	15,2	46,2	39,5	118,7
$q_{изл2}$, Вт/м ²	19,9	59,2	51,4	152,1

Результаты расчётов показывают возможность реализации ТЗСМ «плиточной» конструкции. При всех возможных тепловых нагрузках на неё в режиме нормальной эксплуатации возможно поддержание заданной температуры панелей, при этом гидравлические потери при прокачке гелия и плотность теплового потока на СМС не превышают допустимые.

В случае аварийной ситуации с прекращением прокачки гелия через панели, но с сохранением внутреннего тепловыделения в них температура панелей значительно повысится. К разрушению панелей аварийный режим не приведёт, их температура не превысит допустимую, но плотность теплового потока на СМС значительно превысит допустимую.

В случае аварийной ситуации с прекращением прокачки гелия через панели и при отсутствии внутреннего тепловыделения в них температура панелей повысится на меньшую величину, чем при аварийной ситуации с сохранением внутреннего тепловыделения в них, но плотность теплового потока на СМС всё же значительно превысит допустимую.

Теплогидравлический расчёт «подушечной» панели ТЗСМ для вариантов «малый» и «большой». Режим нормальной эксплуатации. Результаты расчётов для «малого» и «большого» вариантов конструкции ДЕМО-ТИН приведены в табл. 7. Значения для «большого» варианта даны в скобках.

Т а б л и ц а 7. Теплогидравлические характеристики «подушечной» панели в режиме нормальной эксплуатации

Параметр	$T_{BK} = 373 \text{ K}$		$T_{BK} = 473 \text{ K}$	
	Степень черноты проектная	Степень черноты максимальная	Степень черноты проектная	Степень черноты максимальная
$G = G_{\text{сегм}}$, кг/с	0,0043 (0,0032)	0,0098 (0,0088)	0,0094 (0,0083)	0,024 (0,023)
$G_{\text{ТЗСМ}}$, кг/с	0,052 (0,038)	0,118 (0,106)	0,113 (0,1)	0,29 (0,28)
W , м/с	0,072 (0,053)	0,16 (0,15)	0,16 (0,14)	0,4 (0,38)
ΔP_1 , Па	0,058 (0,032)	0,29 (0,25)	0,28 (0,22)	1,8 (1,6)
ΔP , Па	1,17 (0,64)	5,8 (5)	5,6 (4,4)	36 (32)
$q_{\text{пад}}$, Вт/м ²	50,1 (50,1)	138,3 (138,3)	130,3 (130,8)	356,9 (356,9)
$q_{\text{изл}}$, Вт/м ²	0,15 (0,15)	0,46 (0,46)	0,15 (0,15)	0,46 (0,46)

Аварийный режим. В случае аварийной ситуации, протекающей по первому варианту (с прекращением прокачки гелия через панель, но с сохранением внутреннего тепловыделения), режим охлаждения панели — первый или второй — будет зависеть от соотношения величин T_{BK} , $q_{\text{план}}$, $\varepsilon_{\text{эф1}}$ и $\varepsilon_{\text{эф2}}$. Результаты расчётов для «малого» и «большого» вариантов конструкции ДЕМО-ТИН приведены в табл. 8. Значения для «большого» варианта даны в скобках.

Т а б л и ц а 8. Тепловые характеристики «подушечной» панели в аварийном режиме с сохранением внутреннего тепловыделения

Параметр	$T_{BK} = 373 \text{ K}$		$T_{BK} = 473 \text{ K}$	
	Степень черноты проектная	Степень черноты максимальная	Степень черноты проектная	Степень черноты максимальная
$T_{\text{пад}} = T_{\text{изл}}$, К	368 (340)	347 (338)	445 (432)	433 (428)
$q_{\text{изл1}}$, Вт/м ²	2,7 (15,6)	34,7 (45,1)	28,3 (39,7)	106,4 (117,8)
$q_{\text{изл2}}$, Вт/м ²	27 (19,7)	66,6 (59,9)	57,8 (51,3)	161,4 (154,1)

Расчёты показывают, что во всех случаях реализуется второй режим охлаждения панели — её температура ниже, чем температура ВК.

Результаты расчётов аварийной ситуации, протекающей по второму варианту (с отсутствием внутреннего тепловыделения в панели), совпадают с результатами, приведёнными в табл. 6. Это объясняется тем, что в этом варианте результаты расчётов зависят только от температуры и степени черноты поверхности панели, а они такие же, как в варианте «плиточный».

Результаты расчётов показывают возможность реализации ТЗСМ «подушечной» конструкции. При всех возможных тепловых нагрузках на неё в режиме нормальной эксплуатации возможно поддержание заданной температуры панелей, при этом гидравлические потери при прокачке гелия и плотность теплового потока на СМС не превышают допустимые.

В случае аварийной ситуации с прекращением прокачки гелия через панели, но с сохранением внутреннего тепловыделения в них температура панелей значительно повысится. К разрушению панелей аварийный режим не приведёт, их температура не превысит допустимую, но плотность теплового потока на СМС значительно превысит допустимую.

В случае аварийной ситуации с прекращением прокачки гелия через панели и при отсутствии внутреннего тепловыделения в них температура панелей повысится на меньшую величину, чем при аварийной ситуации с сохранением внутреннего тепловыделения в них, но плотность теплового потока на СМС всё же значительно превысит допустимую.

Теплогидравлический расчёт «радиаторной» панели ТЗСМ для вариантов «малый» и «большой». Режим нормальной эксплуатации. Так как объём металла в «радиаторной» панели совпадает с объёмом металла в «подушечной» панели, то расход гелия на её охлаждение будет таким же (см. табл. 8). Далее расчёт проводится по методике для «плиточной» панели, но с учётом меньшего расхода гелия достаточно иметь три независимых трубки охлаждения ($n = 3$).

Результаты расчётов для «малого» и «большого» вариантов конструкции ДЕМО-ТИН приведены в табл. 9. Значения для «большого» варианта даны в скобках.

Т а б л и ц а 9. Теплогидравлические характеристики «радиаторной» панели в режиме нормальной эксплуатации

Параметр	$T_{BK} = 373 \text{ K}$		$T_{BK} = 473 \text{ K}$	
	Степень черноты проектная	Степень черноты максимальная	Степень черноты проектная	Степень черноты максимальная
G , кг/с	0,0043 (0,0032)	0,0098 (0,0088)	0,0094 (0,0083)	0,024 (0,023)
G_1 , кг/с	0,0014 (0,0011)	0,0033 (0,0029)	0,0031 (0,0028)	0,008 (0,008)
$G_{ТЗСМ1}$, кг/с	0,052 (0,038)	0,12 (0,106)	0,113 (0,1)	0,29 (0,28)
W , м/с	3,6 (2,8)	8,4 (7,4)	7,9 (7,1)	20,4 (19,5)
ΔP , кПа	3,2 (2)	17,6 (13,7)	15,6 (12,6)	104 (95,2)
$q_{\text{пад}}$, Вт/м ²	50,1 (50,1)	138,3 (138,3)	130,3 (130,8)	356,9 (356,9)
$q_{\text{изл}}$, Вт/м ²	0,15 (0,15)	0,46 (0,46)	0,15 (0,15)	0,46 (0,46)

Аварийный режим. Так как объём металла в «радиаторной» панели совпадает с объёмом металла в «подушечной» панели, то результаты расчётов аварийных режимов совпадают с результатами, приведёнными в табл. 6 и 8.

Результаты расчётов показывают возможность реализации ТЗСМ «радиаторной» конструкции. При всех возможных тепловых нагрузках на неё в режиме нормальной эксплуатации возможно поддержание заданной температуры панелей, при этом гидравлические потери при прокачке гелия и плотность теплового потока на СМС не превышают допустимые.

В случае аварийной ситуации с прекращением прокачки гелия через панели, но с сохранением внутреннего тепловыделения в них температура панелей значительно повысится. К разрушению панелей аварийный режим не приведёт, их температура не превысит допустимую, но плотность теплового потока на СМС значительно превысит допустимую.

В случае аварийной ситуации с прекращением прокачки гелия через панели и при отсутствии внутреннего тепловыделения в них температура панелей повысится на меньшую величину, чем при аварийной ситуации с сохранением внутреннего тепловыделения в них, но плотность теплового потока на СМС всё же значительно превысит допустимую.

СРАВНЕНИЕ МОЩНОСТИ ЯДЕРНОГО ТЕПЛОЫДЕЛЕНИЯ В КТП С МОЩНОСТЬЮ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА, ПАДАЮЩЕГО НА КТП С ПАНЕЛЕЙ ТЗСМ

Тепловая мощность каждой КТП, которая будет определять необходимую мощность системы её охлаждения, в рабочем режиме будет зависеть от двух факторов.

Первый фактор. Ядерное тепловыделение в конструкционных материалах катушки, вызванное потоками нейтронов и γ -квантов из плазмы.

Выполненные для варианта ДЕМО-ТИН «малый» оценки дают полное ядерное тепловыделение в центральной колонне магнитов $Q_{\text{в. центр. кол}} \sim 7,2$ кВт, т.е. для одной «внутренней ноги» КТП $Q_{\text{в. вн. ноги}} \sim 400$ Вт. Если учесть ядерное тепловыделение в остальных частях катушки, то полное ядерное тепловыделение в одной катушке $Q_{\text{в. кат. мал}} \sim 550$ Вт.

Согласно данным проекта ИТЭР для отвода такой мощности жидким гелием при температуре 4,5 К потребуются криогенная станция, потребляющая электроэнергию масштаба $\sim 3,2$ МВт (эл.). Подобное значение представляется неприемлемым. Необходимость снизить ядерное тепловыделение в системе КТП привела к разработке варианта ДЕМО-ТИН «большой» с увеличенной толщиной ВК. Увеличение толщины ВК на ~ 30 см согласно формуле (14) приведёт к уменьшению плотности объёмного тепловыделения в катушках в $K \sim 50$ раз.

В этом случае (вариант «большой») полную мощность ядерного тепловыделения в одной катушке можно оценить как $Q_{\text{в. кат. бол}} = (Q_{\text{в. кат. мал}}/K)(V_{\text{кат. «большой»}}/V_{\text{кат. «малый»}}) = 16$ Вт.

Следует заметить, что согласно опыту проектирования ИТЭР, находящемуся на более продвинутой стадии конструирования, чем ДЕМО-ТИН, первоначальные оценки полного ядерного тепловыделения в КТП увеличились почти в 2 раза. Такое увеличение обусловлено более детальной проработкой конструкции катушек, blankets, ВК и дивертора, более детальным представлением геометрии в расчётных моделях переноса излучения, течения жидкого гелия, моделированием разных пусковых режимов, а также улучшением точности расчётов.

В этой связи на данной стадии проектирования ТИН представляется целесообразным учесть это обстоятельство в оценках полного ядерного тепловыделения в СМС.

Второй фактор. Тепловой поток излучением на поверхность КТП с ТЗСМ.

Плотность теплового потока излучением на поверхность КТП с ТЗСМ $q_{изл}$ в режиме нормальной эксплуатации при $T_{изл} = 100$ К приведена в табл. 5. Значение $q_{изл}$ будет переменным — максимальным ($q_{изл. макс}$) при $T_{изл} = 100$ К и минимальным ($q_{изл. мин}$) при $T_{изл} = 80$ К. Для оценки мощности теплового потока излучением используем среднее значение

$$q_{изл. сред} = (q_{изл. макс} + q_{изл. мин})/2, \text{ Вт/м}^2. \quad (15)$$

Мощность теплового потока, излучаемого с панелей ТЗСМ на полную площадь наружной поверхности одной КТП, на которую падает тепловое излучение:

$$Q_{изл} = q_{изл. сред} S_{изл}, \text{ Вт}. \quad (16)$$

Мощность теплового потока, излучаемого с панелей ТЗСМ на поверхность «внутренней ноги» КТП, на которую падает тепловое излучение:

$$Q_{изл1} = q_{изл. сред} S_{изл1}, \text{ Вт}. \quad (17)$$

Результаты расчётов мощности ядерного тепловыделения в одной КТП и мощности падающего на неё теплового потока излучением в режиме нормальной эксплуатации по (15)—(17) приведены в табл. 10.

Т а б л и ц а 10. Мощность ядерного тепловыделения в КТП и мощность теплового потока излучением на нее в режиме нормальной эксплуатации

Параметр	Вариант «малый»		Вариант «большой»	
	Степень черноты проектная	Степень черноты максимальная	Степень черноты проектная	Степень черноты максимальная
$q_{изл. макс}$, Вт/м ²	0,15	0,46	0,15	0,46
$q_{изл. мин}$, Вт/м ²	0,06	0,19	0,06	0,19
$q_{изл. сред}$, Вт/м ²	0,11	0,33	0,11	0,33
$Q_{изл}$, Вт	3,25	9,75	5,72	17,2
$Q_{изл1}$, Вт	0,37	1,11	0,47	1,4
$Q_{v кат}$, Вт	550	550	16	16
$Q_{v внут. ноги}$, Вт	400	400	10,8	10,8
$Q_{изл}/Q_{v кат}$	0,0059	0,018	0,36	1,08
$Q_{изл1}/Q_{v внут. ноги}$	0,0009	0,0028	0,044	0,13

Данные табл. 10 показывают, что для варианта «малый» величина $Q_{изл}$ составляет незначительную часть от $Q_{v кат}$. В области центральной колонны магнитов доля $Q_{изл1}$ от $Q_{v внут. ноги}$ составляет еще меньшую часть. Для варианта «большой» величина $Q_{изл}$ составляет значительную часть от $Q_{v кат}$, а в некоторых случаях $Q_{изл}$ может быть даже больше $Q_{v кат}$. Это обстоятельство необходимо учесть при проектировании системы охлаждения КТП.

ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ

Возможные причины отказа ТЗСМ. Под отказом ТЗСМ условимся понимать такое её состояние, при котором она не может выполнять свою функцию поддерживать плотность падающих на СМС тепловых потоков на уровне, не превышающем допустимый. К отказу ТЗСМ могут привести различные причины, основными из которых представляются следующие.

Для варианта «плиточный»:

1. Прекращение течения гелия в трубках без нарушения их герметичности и, как следствие, повышение температуры панелей;
2. Отказ креплений трубок, появление промежутков между трубками и панелью и ухудшение охлаждения панели с соответствующим ростом её температуры;
3. Потеря герметичности хотя бы одной трубки и истечение гелия в вакуумный объём криостата. Это приведёт к ухудшению вакуума в криостате, нарушению его теплоизолирующей способности и вызовет повышенный теплоприток к элементам, находящимся при криогенных температурах, что, в свою

очередь, вызовет их отказ. К таким же последствиям приведёт попадание воздуха или воды в вакуумный объём криостата [13]. Такие события могут протекать в двух вариантах:

— течь — количество поступающих в криостат газов незначительно и может быть удалено системой откачки без остановки ДЕМО-ТИН;

— прорыв — количество поступающих в криостат газов велико и не может быть удалено системой откачки без остановки и ремонта ДЕМО-ТИН;

4. Смещение панелей ТЗСМ со своего места (вследствие, например, повреждения их креплений) или повреждение лабиринтных соединений и, соответственно, появление «тепловых мостов» между панелями и ВК или СМС.

Суммарная длина трубок в ТЗСМ весьма велика. Только в ТЗСМ-1 общая длина трубок $L_{\text{общ}} \sim 1000$ м, не считая длины коллекторов и подводящих трубопроводов. Поэтому потеря герметичности трубок представляется наиболее вероятной причиной отказа ТЗСМ.

Для варианта «подушечный»:

1. Прекращение течения гелия в «плоской щели» без нарушения её герметичности и, как следствие, повышение температуры панели;

2. Изменение формы панели, например, из-за разъединения обечаек в одном из мест точечной сварки под действием внутреннего давления гелия. В этом случае толщина панели может превысить расчётную и возможен контакт обечаек с СМС или ВК с появлением «тепловых мостов»;

3. Потеря герметичности хотя бы одной обечайки и истечение гелия в вакуумный объём криостата. Далее как для варианта «плиточный»;

4. Смещение панелей ТЗСМ со своего места. Далее как для варианта «плиточный».

Для варианта «радиаторный»:

1. Прекращение течения гелия в трубках без нарушения их герметичности и, как следствие, повышение температуры панелей;

2. Нарушение контакта трубки с обечайкой и ухудшение охлаждения панели с соответствующим ростом её температуры;

3. Совместная потеря герметичности трубки и обечайки и истечение гелия в вакуумный объём криостата. Далее как для варианта «плиточный»;

4. Смещение панелей ТЗСМ со своего места. Далее как для варианта «плиточный».

Оценка вероятности отказа ТЗСМ-1 и всей ТЗСМ для варианта «плиточный» из-за потери герметичности трубок. Для оценки вероятности отказа ТЗСМ примем следующие допущения.

Все панели ТЗСМ соединены по надёжности последовательно, т.е. отказ любой панели вызывает отказ всей ТЗСМ [14]. Вероятность безотказной работы любого элемента ТЗСМ $R_{эл}$ (в том числе панелей и трубок), который работал период времени t , описывается экспоненциальным законом надёжности

$$R_{эл} = \exp(-\Lambda_{эл}t), \quad (18)$$

где $\Lambda_{эл}$ — интенсивность отказов элемента, ч^{-1} .

Интенсивность отказов трубки длиной l_1 можно оценить по

$$\Lambda_{\text{тр1}} = \lambda_{\text{тр.уд}} l_1 + N_{\text{гиб1}} \lambda_{\text{гиб}}, \quad \text{ч}^{-1}, \quad (19)$$

где $\lambda_{\text{тр.уд}}$ — удельная интенсивность отказов прямой трубки, $\text{м}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$; $\lambda_{\text{гиб}}$ — интенсивность отказов одногогиба трубки, ч^{-1} .

Так как в сегменте ТЗСМ-1 установлены четыре трубки длиной l_1 и они соединены между собой по надёжности последовательно (отказ любой приводит к отказу всего сегмента), то интенсивность отказов одного сегмента $\Lambda_{\text{сегм1}} = 4\Lambda_{\text{тр1}}$.

Так как сегменты соединены между собой по надёжности последовательно (отказ любого приводит к отказу всей защиты), то интенсивность отказов ТЗСМ-1, состоящей из 12 сегментов, $\Lambda_{\text{зкс1}} = 12 \cdot \Lambda_{\text{сегм1}}$.

В [15] определены параметры потока отказов для трубопроводов различного диаметра, установленных на АЭС. В период времени до первого отказа параметр потока отказов совпадает с удельной интенсивностью отказов. Примем, что $\lambda_{\text{тр.уд}}$ для рассматриваемых трубок с гелием совпадает с определённой в

[15] $\lambda_{тр. уд}$ для трубопроводов близкого диаметра. Следует отметить, что существуют вероятность отказов сварных швов на трубках и соответствующая интенсивность их отказов. В связи с неопределённостью количества сварных швов на трубках эту вероятность отказов не учитываем. Значения минимальных и максимальных ожидаемых значений $\lambda_{тр. уд}$ и $\lambda_{гиб}$ приведены в табл. 11.

Т а б л и ц а 11. Удельная интенсивность отказов элементов ТЗСМ для варианта «плиточный»

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
$\lambda_{тр. уд}, M^{-1} \cdot ч^{-1}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-10}$
$\lambda_{гиб}, ч^{-1}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$
$\Lambda_{тр1}, ч^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$
$\Lambda_{сегм1}, ч^{-1}$	$4,8 \cdot 10^{-8}$	$1,12 \cdot 10^{-7}$
$\Lambda_{ТЗСМ1}, ч^{-1}$	$5,8 \cdot 10^{-7}$	$1,34 \cdot 10^{-6}$

Вероятность безотказной работы ТЗСМ-1

$$R_{ТЗСМ1} = \exp(-\Lambda_{ТЗСМ1}t), \tag{20}$$

вероятность отказа ТЗСМ-1

$$F_{ТЗСМ1} = 1 - R_{ТЗСМ1}. \tag{21}$$

Результаты расчётов надёжности ТЗСМ-1 при минимальных ожидаемых и максимальных ожидаемых интенсивностях отказов элементов приведены в табл. 12. В скобках даны значения при максимальных ожидаемых интенсивностях отказов.

Т а б л и ц а 12. Вероятность отказов и безотказной работы ТЗСМ-1 для варианта «плиточный»

Время работы t , ч	$R_{ТЗСМ1}$	$F_{ТЗСМ1}$
1000	0,99942 (0,9987)	0,00058 (0,013)
5000	0,9971 (0,9933)	0,0029 (0,0067)
8760 (1 год)	0,995 (0,988)	0,005 (0,012)
26 280 (3 года)	0,985 (0,965)	0,015 (0,035)
52 560 (6 лет)	0,97 (0,932)	0,03 (0,068)
105 520 (12 лет)	0,942 (0,867)	0,058 (0,133)

Результаты расчётов показывают, что надёжность ТЗСМ-1 рассматриваемой конструкции можно считать удовлетворительной. В течение длительного времени вероятность безотказной работы ТЗСМ-1 будет достаточно велика. Но следует учесть, что при эксплуатации ДЕМО-ТИН необходимо обеспечить надёжную работу всей ТЗСМ. Любая, даже маленькая течь гелия из неё приведёт к необходимости прекращения эксплуатации ДЕМО-ТИН. Для оценки вероятности безотказной работы всей ТЗСМ примем следующее допущение. Интенсивность отказов любой характерной части ТЗСМ пропорциональна количеству трубок с гелием в ней, а количество трубок пропорционально площади рассматриваемого участка ТЗСМ. Интенсивность отказов всей ТЗСМ определится как

$$\Lambda_{ТЗСМ} = \Lambda_{ТЗСМ1}(S_{ТЗСМ}/S_{ТЗСМ1}) \sim 40\Lambda_{ТЗСМ1}. \tag{22}$$

Далее расчёты ведутся по формулам (20) и (21).

Результаты расчётов надёжности всей ТЗСМ для варианта «плиточный» при минимальной ожидаемой и максимальной ожидаемой интенсивности её отказов приведены в табл. 13. В скобках даны значения при максимальной ожидаемой интенсивности отказов.

Т а б л и ц а 13. Вероятность отказов и безотказной работы всей ТЗСМ для варианта «плиточный»

Время работы, ч	$R_{ТЗСМ}$	$F_{ТЗСМ}$
1000	0,977 (0,948)	0,023 (0,052)
5000	0,891 (0,765)	0,109 (0,235)
8760 (1 год)	0,818 (0,625)	0,182 (0,375)
26 280 (3 года)	0,549 (0,244)	0,451 (0,756)

Результаты расчётов показывают, что надёжность всей ТЗСМ для варианта «плиточный» нельзя считать удовлетворительной. Уже к концу трёхлетнего срока эксплуатации вероятность отказа ТЗСМ будет достаточно велика.

Оценка вероятности отказа ТЗСМ-1 и всей ТЗСМ для варианта «подушечный» из-за потери герметичности панели. Все ранее принятые для «плиточного» варианта допущения для оценки вероятности отказа ТЗСМ действительны.

Интенсивность отказов «подушечной» панели можно оценить по

$$\Lambda_{\text{пан}} = 2\lambda_{\text{пов. уд}}S_{\text{пан}} + l_{\text{шв}}\lambda_{\text{шв1}}, \text{ ч}^{-1}, \quad (23)$$

где $\lambda_{\text{пов. уд}}$ — удельная интенсивность отказов поверхности обечайки, $\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$; $\lambda_{\text{шв1}}$ — удельная интенсивность отказов одного погонного метра сварного шва, $\text{м}^{-1}\cdot\text{ч}^{-1}$; $l_{\text{шв}}$ — длина сварных швов в одной панели $\sim 2,2$ м.

Так как в сегменте ТЗСМ-1 установлены 20 панелей и они соединены между собой по надёжности последовательно (отказ любой приводит к отказу всего сегмента), то интенсивность отказов одного сегмента $\Lambda_{\text{сегм1}} = 20\Lambda_{\text{пан}}$.

Так как сегменты соединены между собой по надёжности последовательно (отказ любого приводит к отказу всей защиты), то интенсивность отказов ТЗСМ-1, состоящей из 12 сегментов, $\Lambda_{\text{ТЗСМ1}} = 12\Lambda_{\text{сегм1}}$.

Значения минимальных и максимальных ожидаемых удельных интенсивностей отказов для поверхности и сварных швов по данным [12] и экспертным оценкам приведены в табл. 14.

Т а б л и ц а 14. Удельная интенсивность отказов элементов ТЗСМ для варианта «подушечный»

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
$\lambda_{\text{пов. уд}}, \text{ м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$	$1\cdot 10^{-12}$	$1\cdot 10^{-11}$
$\lambda_{\text{шв}}, \text{ ч}^{-1}$	$1\cdot 10^{-10}$	$1\cdot 10^{-9}$
$\Lambda_{\text{пан}}, \text{ ч}^{-1}$	$2,21\cdot 10^{-10}$	$2,21\cdot 10^{-9}$
$\Lambda_{\text{сегм1}}, \text{ ч}^{-1}$	$4,42\cdot 10^{-9}$	$4,42\cdot 10^{-8}$
$\Lambda_{\text{ТЗСМ1}}, \text{ ч}^{-1}$	$5,3\cdot 10^{-8}$	$5,3\cdot 10^{-7}$

Результаты расчётов надёжности ТЗСМ-1 по формулам (20) и (21) при минимальных ожидаемых и максимальных ожидаемых интенсивностях отказов элементов приведены в табл. 15. В скобках даны значения при максимальных ожидаемых интенсивностях отказов.

Т а б л и ц а 15. Вероятность отказов и безотказной работы ТЗСМ-1 для варианта «подушечный»

Время работы t , ч	$R_{\text{ТЗСМ1}}$	$F_{\text{ТЗСМ1}}$
1000	0,99995 (0,9995)	0,00005 (0,0005)
5000	0,99974 (0,9974)	0,00026 (0,0026)
8760 (1 год)	0,99954 (0,9954)	0,00046 (0,0046)
26 280 (3 года)	0,9986 (0,9862)	0,0014 (0,0138)
52 560 (6 лет)	0,9972 (0,9725)	0,0028 (0,0275)
105 520 (12 лет)	0,9944 (0,9456)	0,0056 (0,0544)

Результаты расчётов показывают, что надёжность ТЗСМ-1 рассматриваемой конструкции можно считать удовлетворительной. В течение длительного времени вероятность безотказной работы ТЗСМ-1 будет достаточно велика.

При принятых допущениях о связи надёжности ТЗСМ-1 и всей ТЗСМ интенсивность отказов всей ТЗСМ определится по формуле (22). Далее расчёты ведутся по (20) и (21).

Результаты расчётов надёжности всей ТЗСМ для варианта «подушечный» при минимальной ожидаемой и максимальной ожидаемой интенсивности её отказов приведены в табл. 16. В скобках даны значения при максимальной ожидаемой интенсивности отказов.

Т а б л и ц а 16. Вероятность отказов и безотказной работы всей ТЗСМ для варианта «подушечный»

Время работы, ч	$R_{ТЗСМ}$	$F_{ТЗСМ}$
1000	0,9979 (0,978)	0,0022 (0,022)
5000	0,9895 (0,899)	0,011 (0,101)
8760 (1 год)	0,9816 (0,831)	0,0184 (0,169)
26 280 (3 года)	0,9458 (0,5728)	0,0542 (0,4272)

Результаты расчётов показывают, что надёжность всей ТЗСМ для варианта «подушечный» нельзя считать удовлетворительной. Уже к концу трёхлетнего срока эксплуатации вероятность отказа ТЗСМ будет достаточно велика.

Оценка вероятности отказа ТЗСМ-1 и всей ТЗСМ для варианта «радиаторный» из-за потери герметичности панели. Все ранее принятые для «плиточного» варианта допущения для оценки вероятности отказа ТЗСМ действительны.

«Радиаторную» панель можно представить состоящей из трёх частей: первая — система трубок, вторая — система обечаек и третья — слой герметика. Для отказа «радиаторной» панели необходим совместный отказ всех трёх систем — течь трубок, течь системы обечаек и отказ слоя герметика (он должен пропускать гелий).

Интенсивность отказов системы трубок $\Lambda_{\text{труб}}$ можно оценить по формуле (19). Интенсивность отказов системы обечаек $\Lambda_{\text{об}}$ совпадает с $\Lambda_{\text{пан}}$, определённой по формуле (23) для «подушечной» панели в табл. 15.

Предположим, что система обечаек и слой герметика составляют одну систему с интенсивностью отказов $\Lambda_{\text{об. рад}}$, в которой слой герметика уменьшает $\Lambda_{\text{об}}$ из табл. 15 в 10 раз, т.е.

$$\Lambda_{\text{об. рад}} = \Lambda_{\text{об}}/10.$$

Так как система трубок и система обечаек со слоем герметика соединены по надёжности параллельно, то интенсивность отказов «радиаторной» панели $\Lambda_{\text{пан. рад}}$ определится по

$$\Lambda_{\text{пан. рад}} = \Lambda_{\text{труб}}\Lambda_{\text{об. рад}}/(\Lambda_{\text{труб}} + \Lambda_{\text{об. рад}}), \text{ ч}^{-1}. \quad (24)$$

Панели в ТЗСМ-1 по надёжности соединены последовательно (отказ любой панели означает отказ всей ТЗСМ-1), и

$$\Lambda_{ТЗСМ1} = \Lambda_{\text{пан. рад}}N_{\text{пан1}}, \text{ ч}^{-1}. \quad (25)$$

Минимальные и максимальные ожидаемые значения $\lambda_{\text{труб}}$, $\lambda_{\text{об}}$, $\Lambda_{\text{пан. рад}}$ и $\Lambda_{ТЗСМ1}$ приведены в табл. 17.

Т а б л и ц а 17. Удельная интенсивность отказов элементов ТЗСМ для варианта «радиаторный»

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
$\lambda_{\text{труб}}, \text{ ч}^{-1}$	$8 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$
$\lambda_{\text{об. рад}}, \text{ ч}^{-1}$	$2,21 \cdot 10^{-11}$	$2,21 \cdot 10^{-10}$
$\Lambda_{\text{пан. рад}}, \text{ ч}^{-1}$	$2,15 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-10}$
$\Lambda_{ТЗСМ1}, \text{ ч}^{-1}$	$5,2 \cdot 10^{-9}$	$4,9 \cdot 10^{-8}$

Результаты расчётов надёжности ТЗСМ-1 при минимальных ожидаемых и максимальных ожидаемых интенсивностях отказов элементов приведены в табл. 18.

Т а б л и ц а 18. Вероятность отказов и безотказной работы ТЗСМ-1 для варианта «радиаторный»

Время работы t , ч	$R_{ТЗСМ1}$	$F_{ТЗСМ1}$
1000	0,999995 (0,99995)	0,000005 (0,00005)
5000	0,99997 (0,99975)	0,00003 (0,00025)
8760 (1 год)	0,99996 (0,9997)	0,00004 (0,0003)
26 280 (3 года)	0,99986 (0,9987)	0,00014 (0,0013)
52 560 (6 лет)	0,99973 (0,9974)	0,00027 (0,0026)
105 520 (12 лет)	0,9994 (0,9949)	0,0006 (0,0051)

Результаты расчётов показывают, что надёжность ТЗСМ-1 рассматриваемой конструкции можно считать удовлетворительной. В течение длительного времени вероятность безотказной работы ТЗСМ-1 будет достаточно велика. Интенсивность отказов всей ТЗСМ определяется по формуле (22).

Результаты расчётов надёжности всей ТЗСМ для варианта «радиаторный» при минимальной ожидаемой и максимальной ожидаемой интенсивности её отказов приведены в табл. 19.

Т а б л и ц а 19. Вероятность отказов и безотказной работы всей ТЗСМ для варианта «радиаторный»

Время работы, ч	$R_{ТЗСМ}$	$F_{ТЗСМ}$
1000	0,9998 (0,998)	0,0002 (0,002)
5000	0,999 (0,99)	0,001 (0,01)
8760 (1 год)	0,9982 (0,982)	0,0018 (0,018)
26 280 (3 года)	0,995 (0,947)	0,005 (0,053)

Результаты расчётов показывают, что надёжность всей ТЗСМ для варианта «радиаторный» можно считать условно удовлетворительной. К концу трёхлетнего срока эксплуатации вероятность отказа ТЗСМ будет значительно меньше, чем для вариантов «плиточный» и «подушечный».

Как представляется, достоверные данные о надёжности панелей различной конструкции можно получить только по результатам испытаний.

ВЫВОДЫ

Рассмотренные варианты конструкции ТЗСМ обладают удовлетворительными теплофизическими характеристиками. Они обеспечивают допустимые тепловые потоки на СМС, при этом расход гелия на охлаждение панелей и гидравлические потери при его прокачке являются приемлемыми.

В конструкции панели желательно иметь минимальную массу металла, так как тепловыделение в панели пропорционально массе металла, а рост тепловыделения увеличивает расход гелия на охлаждение ТЗСМ.

Наибольший расход охлаждающего гелия требуется при «плиточной» конструкции панелей, что обусловлено значительным тепловыделением в толстых металлических плитах. Этот вариант конструкции обладает также минимальной надёжностью, но обладает однократным резервированием — в случае течи одной трубки возможно подключение параллельной резервной.

«Подушечная» конструкция панелей требует меньшего расхода гелия на её охлаждение, гидравлические потери при его прокачке незначительны. Показатели надёжности этого варианта выше, чем «плиточного», но в нём отсутствует резервирование.

Для «радиаторной» конструкции панели расход гелия приблизительно такой же, как для «подушечной», но она обладает максимальной надёжностью по сравнению с вариантами «плиточный» и «подушечный». В этом варианте также возможно резервирование, что ещё повышает надёжность. Для более детальной разработки ТЗСМ рекомендуется «радиаторный» вариант панели.

Для дальнейшего проектирования требуется уточнение всех характеристик элементов конструкции ТЗСМ (трубок, поверхностей, коллекторов и др.), для чего необходимы их испытания.

Рассмотренными вариантами не исчерпываются все возможные варианты конструкции панелей и всей ТЗСМ. Необходим поиск более надёжных концепций.

В настоящее время слабо разработаны конструкции, соединяющие панели в оболочку, лабиринтные уплотнения, крепления и др. Без сомнения, надёжность всей ТЗСМ будет определяться в значительной мере надёжностью этих элементов.

Отсутствие аварий в ТЗСМ действовавших термоядерных установок не может служить гарантией возможности безаварийной эксплуатации ТЗСМ ДЕМО-ТИН. Задача создания ТЗСМ, способной проработать без ремонта весь срок службы ДЕМО-ТИН, представляется весьма сложной. Вероятно, следует разработать концепцию ТЗСМ, которую можно ремонтировать.

Существует проблема возникновения индукционных токов в панелях. Необходима оценка влияния явления на работу панелей.

REFERENCES

1. **Ivanov D.P. et al.** Necessity of reliability enhancement for forced cooled superconducting magnet systems. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2012, issue 1, pp. 5—16 (in Russian).
2. **International** Thermonuclear Experimental Reactor. Technical Basis for the ITER Final Design Report, Cost Review and Safety Analysis (FDR). — Vienna: IAEA, 1998.
3. **Chang Hyun Noh et al.** Final design of ITER vacuum vessel thermal shield. — Fusion Engineering and Design, 2013, vol. 88, pp. 1896—1899.
4. **Anan'ev S.S. et al.** Fuel cycle for a fusion neutron source. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2014, vol. 37, issue 4, pp. 11—21 (in Russian).
5. **Ivanov D.P. et al.** Superconducting magnet system for russian tokamak — fusion neutron source DEMO-FNS. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2014, vol. 37, issue 3, pp. 5—14 (in Russian).
6. **Superconducting** magnet system for tokamaks. Edited by N.A. Chernoplekov — M.: Pub.house MAS «Chernobyl'-atom», 1997 (in Russian).
7. **Ivanov D.P. et al.** Design of the Tokamak-7 facility.: Preprint IAE 3413/7. M., 1981 (in Russian).
8. **Description** of Tokamak-15 fusion facility. D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus, Inv. № 1197/T. — L., 1986 (in Russian).
9. **Strelkov V.S.** Thermonuclear power engineering: 60 years of investigations. What next? — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2016, vol. 39, issue 1, pp. 5—14 (in Russian).
10. **Isachenko V.P. et al.** Heat transfer. — M.: Energiya (Energy), 1975 (in Russian).
11. **Idel'chik I.E.** Reference book on hydraulic resistances. — M.: Mashinostroenie (Machine-building), 1975 (in Russian).
12. **Sychev V.V. et al.** Thermodynamic properties of helium. — M.: Pub.house of standarts, 1984 (in Russian).
13. **Ivanov D.P. et al.** Analysis of possible accidents in the ITER cryostat. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 1996, issue 1, pp. 3—18 (in Russian).
14. **Bakhtmet'ev A.M. et al.** Estimation methods and safety support of nuclear power facilities. — M.: Energoatomizdat, 1988 (in Russian).
15. **Klemin A.I. et al.** Reliability analysis of pipelines and pressure vessels in nuclear power plants. — Atomnaya energiya (Atomic energy), 1979, vol. 47, issue 4 (in Russian).

AUTHORS

Pashkov A.Yu. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; A_Yu_pashkoff@mail.ru

Shpanskiy Yu.C. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Shpanskiy_YS@nrcki.ru

Kuteev B.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Kuteev_BV@nrcki.ru

Received 25 May 2016
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2016, vol. 39, issue 3, pp. 12—33.