УДК 621.039.686

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ И ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРА ДЕМО-ТИН

А.Ю. Паишков, В.С. Петров, Ю.С. Шпанский, Е.А. Филимонова

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Описана конструкция первой стенки ПС и дивертора ДЕМО-ТИН, объединённых в единую систему (ПСД) общей системой водяного охлаждения (СВО). Выполнены расчёты теплогидравлических параметров ПСД при различных распределениях тепловой нагрузки из плазмы. По результатам расчётов намечены пути оптимизации конструкции ПСД и СВО. Методами вероятностного анализа безопасности выполнена оценка надёжности работы ПСД и сделан вывод, что надёжность работы ПСД в значительной степени зависит от надёжности крепления бериллиевых тайлов и вероятности возникновения аварий с потерей теплоносителя в СВО.

Ключевые слова: ДЕМО-ТИН, первая стенка, дивертор, система водяного охлаждения, теплогидравлические расчёты, оценка надёжности.

THERMAL-HYDRAULIC CALCULATIONS AND RELIABILITY EVALUATION FOR WATER COOLING SYSTEM OF DEMO-FNS FIRST WALL AND DIVERTOR

A.Yu. Pashkov, V.S. Petrov, Yu.S. Shpanskiy, E.A. Filimonova

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The design of the DEMO-FNS first wall and divertor combined into the FWD system using general water cooling system (WCS) is described. The thermal-hydraulic parameters of the FWD at different plasma heat load distributions were calculated. On the basis of these calculations the ways of FWD and WCS optimization were laid down. Reliability of FWD system operation was evaluated using probabilistic methods of safety analysis and the conclusion was made that the reliability of the FWD operation to a great extent depends on the reliability of beryllium tiles fastening and the probability of the loss of coolant accidents in the WCS.

Key words: DEMO-FNS, first wall, divertor, water cooling system, thermal-hydraulic calculations, reliability assessment.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-3-36-47

ВВЕДЕНИЕ

Первая стенка (ПС) и дивертор — одни из самых энергонапряжённых и важных для надёжности и безопасности элементов установки ДЕМО-ТИН, проект которой предложен в [1]. Описана конструкция ПС и дивертора, объединённых в единую систему ПСД и охлаждаемых водой — одним из возможных теплоносителей [2]. Для уточнения характеристик СВО были выполнены расчёты теплогидравлических параметров ПСД, которые подтвердили работоспособность предложенной конструкции при различных распределениях тепловой нагрузки из плазмы. По результатам расчётов намечены пути оптимизации конструкции ПСД и СВО. Методами вероятностного анализа безопасности выполнена оценка надёжности работы ПСД и сделан вывод, что надёжность работы ПСД в значительной степени зависит от надёжности крепления бериллиевых тайлов и вероятности возникновения аварий типа LOCA (аварий с потерей теплоносителя) в СВО.

СИСТЕМЫ ТОКАМАКА, НУЖДАЮЩИЕСЯ В ВОДЯНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Основные параметры токамака:

Большой радиус R , м . . .	3,2
Аспектное отношение $A = R/a$. . .	3,2
Число секций N . . .	18
Мощность реакции D—T-синтеза в токамаке P_{th} , МВт . . .	~40
Нейтронный компонент термоядерной мощности P_n , МВт . . .	32
Часть термоядерной мощности, уносимая α -частицами P_α , МВт . . .	8
Мощность дополнительного нагрева $P_{доп}$, МВт . . .	36
Мощность, воспринимаемая поверхностью ПСД $P_{пов} = P_{доп} + P_\alpha$, МВт . . .	44
Объём плазмы V , м ³ . . .	~150
Средняя нейтронная нагрузка на первую стенку P_n/S , МВт/м ² . . .	~0,2
Площадь первой стенки (без учёта площади отверстий) $S_{ПС}$, м ² . . .	160

Следующие системы токамака будут обладать СВО: первая стенка и дивертор (ПСД), объединённые в единую систему; бланкет; вакуумная камера (ВК); обеспечивающие, диагностические и вспомогательные системы.

Из перечисленных СВО ПСД будет одной из самых мощных и разветвлённых, кроме того, она работает в очень сложных условиях, под действием интенсивных нейтронных и тепловых потоков, циклических и динамических нагрузок при срыве плазмы. Так как поверхность ПСД непосредственно контактирует с плазмой, то отказ её СВО делает невозможной термоядерную реакцию и работу всей установки. Всё это вызывает необходимость исследования надёжности СВО ПСД в первую очередь.

КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРА

Одним из требований к конструкции ПСД ДЕМО-ТИН является необходимость обеспечить дистанционную замену любого из её элементов [2]. Это связано с тем, что материалы конструкции ПСД теряют возможность сварки после облучения их нейтронами и, кроме того, металлы распухают.

ПСД состоит из верхних и нижних кассет диверторов (для 2-нулевого дивертора), а также набора тепловоспринимающих панелей ПС (ТВП₁) и дивертора (ТВП_д). Кассеты дивертора и ТВП₁ охлаждаются теплоносителем (вода—дистиллят под давлением), далее называемый просто водой.

На размеры частей конструкции ПСД накладываются ограничения, связанные с размерами патрубков доступа в ВК, через которые возможно с помощью манипуляторов обеспечить удаление дефектных элементов ПСД и установку новых.

Все конструкции ПСД выполнены в виде 18 нижних и 18 верхних охлаждаемых полусекций. Три секции объединены в один сегмент. Взаимное положение элементов токамака, ПСД и бланкета показано на рис. 1.

Схема нижней полусекции ПСД (далее рассматриваем только её, так как верхняя полусекция выполнена аналогично) представлена на рис. 2.

Рис. 1. Схема взаимного расположения основных элементов токамака ДЕМО-ТИН: 1 — механизм крепления верхнего дивертора; 2 — корпус криостата; 3 — экваториальный порт вакуумной камеры; 4 — катушка тороидального поля; 5 — первая стенка; 6 — бланкет; 7 — кассета нижнего дивертора

Рис. 2. Схема нижней полусекции ПСД: 1 — ТВП_{1В}; 2 — сочленение ТВП_{1В} с кассетой дивертора; 3 — кассета дивертора; 4 — натяжное устройство кассеты дивертора; 5 — виток управления; 6 — ТВП_{1М}; 7 — бланкет; 8 — вакуумная камера; 9 — напорные и сливные трубопроводы секции

В состав каждой полусекции входят кассета дивертора, ТВП₁, примыкающая к внутренней поверхности тора ВК (внутренняя ТВП_{1В}) и ТВП₁, примыкающая к элементам конструкции бланкета (наружная ТВП_{1Н}).

Конструкция тепловоспринимающих панелей. ТВП_{1В} имеет форму трапеции, основание которой находится в месте сопряжения с кассетой дивертора 2 (см. рис. 2). Форма панели изогнутая, повторяющая форму сепаратрисы. Длина ТВП_{1В} в вертикальном направлении составляет половину

Рис. 3. Схема течения воды в наружной части секции ПСД: 1 — экваториальный порт; 2 — панель с опускным участком течения воды; 3 — панель с подъёмным участком течения воды; 4 — малая панель; ↓ — направление течения воды

Рис. 4. Схема устройства ТВП₁: 1 — хромциркониевые трубки с водой; 2 — бериллиевые тайлы; 3 — стальное основание; 4 — продольное ребро жёсткости; 5 — поперечные рёбра жёсткости

Рис. 5. Основные размеры ТВП₁: 1 — трубка (хромциркониевая бронза); 2 — тайл (бериллий); 3 — основание (сталь); 4 — продольное ребро жёсткости; 5 — поперечное ребро жёсткости

от высоты внутренней поверхности тора ВК (~1,8 м). Это сделано для обеспечения удобной работы манипулятора при демонтаже и монтаже секции. Части каждой секции скреплены между собой при помощи трубчатых переходников (выполнены при помощи сварки), которые образуют каналы для прохода воды.

ТВП_{1Н} также имеет форму изогнутой трапеции, одна из частей которой вырезана — в этом месте находится экваториальный порт (рис. 3). ТВП_{1Н} подразделяется на три части: ТВП_{1М} малая, находящаяся под экваториальным портом, ТВП_{1О}, где находится опускной участок течения воды, и ТВП_{1П}, где находится подъёмный участок течения воды.

Конструктивной частью каждой ТВП является набор трубок из хромциркониевой бронзы диаметром 10×1 мм. Трубки сварены в цилиндрические напорные и сливные коллекторы и припаяны к основанию из немагнитной стали типа 12Х18Н10Т толщиной 10 мм (рис. 4).

Половина трубок в ТВП_{1М} и ТВП_{1В} образуют подъёмный участок течения воды (ТВП_{1МП} и ТВП_{1ВП}), другая половина — опускной участок течения воды (ТВП_{1МО} и ТВП_{1ВО}). Вода в опускных и подъёмных участках движется в противоположных направлениях.

В основании выполнены канавки глубиной 5 мм, в которые устанавливаются трубки. На каждую трубку панели напаяны тайлы из бериллия, при этом активная толщина тайла (для пропуска теплового потока) составляет 4 мм. Тайлы по ширине выполнены в виде клиньев и установлены друг относительно друга с зазором 0,4 мм (рис. 5).

Вид ТВП₁ в разрезе, её материальный состав и схема расположения на ней рёбер жёсткости представлены на рис. 4. На рис. 5 представлены основные размеры. Параметры ТВП_{1О} и ТВП_{1П}, ТВП_{1ВО} и ТВП_{1ВП}, ТВП_{1МО} и ТВП_{1МП} совпадают.

Конструкция кассеты дивертора. Кассета, входящая в состав секции, прикреплена к корпусу ВК с помощью натяжного устройства, которое обеспечивает удержание кассеты дивертора и связанных с ней ТВП при срыве тока плазмы, т.е. компенсируют появление больших неконтролируемых

руемых нагрузок на элементы конструкции каждой секции. Общий вид кассеты дивертора показан на рис. 6.

Корпус кассеты (1) выполнен из трёх изогнутых стальных пластин — нижней (2), средней (3), в которой есть перепускные отверстия (16), и верхней (4). В корпусе находятся также перепускные коллекторы воды, охлаждающей ТВП_{1В}.

На верхней пластине с помощью опорных конструкций (11) установлены пять мишеней дивертора, на мишенях — ТВП_Д. ТВП_{Д1} установлена на первой внешней мишени, ТВП_{Д2} — на второй внешней мишени, ТВП_{Д3} — на куполе (5), ТВП_{Д4} — на первой внутренней мишени и ТВП_{Д5} — на второй внутренней мишени. Первая и вторая внешние мишени примыкают к куполу, плотность тепловой нагрузки из плазмы на их отдельные участки может превышать 10 МВт/м², но её среднее значение значительно меньше.

На корпусе кассеты расположены трубчатые переходники 1—4 для воды, охлаждающей ТВП₁. С помощью захвата (6) транспортного устройства (17) производится замена кассеты. Трубчатые переходники 5, 6 предназначены для воды, охлаждающей корпус кассеты. Напорные коллекторы (14) подают воду, охлаждающую ТВП_Д, затем вода поступает в сливной коллектор (15).

Конструкция ТВП_Д близка к конструкции ТВП₁. Полная масса кассеты (с водой) составляет 1,8 т.

Основные геометрические параметры ТВП_Д приведены в табл. 1.

Рис. 6. Общий вид кассеты дивертора: 1 — корпус кассеты; 2 — нижняя пластина корпуса; 3 — средняя пластина корпуса; 4 — верхняя пластина корпуса; 5 — ТВП_Д; 6 — захват транспортного устройства кассеты; 7 — трубчатый переходник 1 воды из напорного трубопровода ТВП_{1В} в транзитный перепускной коллектор кассеты; 8 — трубчатый переходник 2 воды из транзитного перепускного коллектора кассеты в ТВП_{1В}; 9 — трубчатый переходник 3 воды из ТВП_{1В} в возвратный перепускной коллектор кассеты; 10 — трубчатый переходник 4 воды из возвратного перепускного коллектора кассеты в сливной трубопровод ТВП_{1В}; 11 — опорные конструкции ТВП_Д; 12 — трубчатый переходник 5 воды, охлаждающей корпус кассеты (вход); 13 — трубчатый переходник 6 воды, охлаждающей корпус кассеты (выход); 14 — напорные коллекторы воды, охлаждающей ТВП_Д; 15 — сливной коллектор воды, охлаждающей ТВП_Д; 16 — перепускные отверстия в средней пластине корпуса; 17 — транспортное устройство кассеты; 18 — заглушка

Таблица 1. Основные геометрические параметры элементов ПСД

Элемент ПСД	Параметр	
	Площадь поверхности, м ²	Число трубок с водой
ТВП _{1ВП}	0,92	24
ТВП _{1НП}	0,98	23
ТВП _{1МП}	0,32	14
ТВП _{Д1}	0,09	51
ТВП _{Д2}	0,12	67
ТВП _{Д3} (купол)	1	59
ТВП _{Д4}	0,7	51
ТВП _{Д5}	0,8	67

Полная площадь ТВП₁ в одной полусекции $S_{ТВП1} = S_{ПС}/2N = 4,44 \text{ м}^2$ и равна сумме площадей ТВП_{1О}, ТВП_{1П}, ТВП_{1ВО}, ТВП_{1ВП}, ТВП_{1МО} и ТВП_{1МП}. Полная площадь ТВП_Д в кассете 2,71 м².

РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРА

Тепловые нагрузки на ПСД. Панели ПСД подвержены двум видам тепловых нагрузок:

— внутренней, вызванной тепловыделением в конструкционных материалах под действием нейтронов и γ -квантов из плазмы;

— внешней, вызванной воздействием теплового потока из плазмы на обращённую к ней поверхность.

Полная тепловая мощность панели ПСД определится как

$$Q_{\text{пан}} = q_{\text{об сред}} S_{\text{пан}} h_{\text{экв}} + q_{\text{пов}} S_{\text{пан}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{об сред}}$ — средняя объёмная плотность тепловыделения в панели, МВт/м³; $S_{\text{пан}}$ — площадь поверхности панели, м²; $h_{\text{экв}} = V_{\text{пан}}/S_{\text{пан}}$ — эквивалентная толщина панели (0,042 м); $V_{\text{пан}}$ — суммарный объём материалов панели, м³; $q_{\text{пов}}$ — средняя плотность теплового потока, падающего из плазмы на панель, МВт/м².

$$q_{\text{об сред}} = \sum q_{\text{об } i} x_i, \quad (2)$$

где $q_{\text{об } i}$ — средняя объёмная плотность тепловыделения в i -м материале панели; x_i — объёмная доля i -го материала в панели.

Значение $q_{\text{пов}}$ в панелях ПСД может находиться в широком диапазоне величин. Возможны следующие значения в зависимости от режима горения плазмы и распределения термоядерной мощности:

— штатный режим работы — 80% от $P_{\text{пов}}$ приходится на ТВП_Д, 20% $P_{\text{пов}}$ приходится на ТВП₁. Тепловая нагрузка из плазмы на одну кассету $Q_{\text{пов касс 1}} = 0,8 P_{\text{пов}}/(2N) = 0,98$ МВт;

— экстремальный-1 — 100% от $P_{\text{пов}}$ приходится на ТВП_Д, на ТВП₁ нет теплового потока из плазмы. $Q_{\text{пов касс 1}} = P_{\text{пов}}/(2N) = 1,22$ МВт;

— экстремальный-2 — 100% от $P_{\text{пов}}$ приходится на ТВП₁, на ТВП_Д нет теплового потока из плазмы. $Q_{\text{пов касс 1}} = 0$ МВт;

— MARFE длительностью несколько секунд. 25% от $P_{\text{пов}}$ приходится на ТВП куполов диверторов, 25% от $P_{\text{пов}}$ приходится на остальные ТВП_Д, 50% от $P_{\text{пов}}$ приходится на ТВП₁. $Q_{\text{пов касс 1}} = 0,5 P_{\text{пов}}/(2N) = 0,61$ МВт;

— режимы ELM и срыва длятся порядка 10^{-3} с и здесь не рассматриваются.

Ожидаемые значения $q_{\text{пов}}$ для элементов ПСД при различных режимах горения плазмы приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Ожидаемые значения $q_{\text{пов}}$ для элементов ПСД, МВт/м²

Элемент ПСД	Режим горения плазмы			
	Штатный	Экстремальный-1	Экстремальный-2	MARFE
ТВП ₁	0,06	0	0,28	0,138
ТВП _{Д1}	1,98	2,6	0	0,55
ТВП _{Д2}	1,98	2,6	0	0,55
ТВП _{Д3} (купол)	0,33	0,3	0	0,32
ТВП _{Д4}	0,15	0,2	0	0,13
ТВП _{Д5}	0,15	0,2	0	0,13

Расчётные значения мощности теплового потока из плазмы на поверхности элементов ПСД при различных режимах горения плазмы представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Мощность теплового потока из плазмы на поверхности элементов ПСД при различных режимах горения плазмы, МВт

Элемент ПСД	Режим горения плазмы			
	Штатный	Экстремальный-1	Экстремальный-2	MARFE
ТВП ₁ вп	0,051	0	0,25	0,13
ТВП ₁ нп	0,054	0	0,27	0,14
ТВП ₁ мп	0,018	0	0,09	0,04
ТВП _{Д1}	0,178	0,24	0	0,05
ТВП _{Д2}	0,238	0,32	0	0,07
ТВП _{Д3} (купол)	0,33	0,33	0	0,31
ТВП _{Д4}	0,108	0,15	0	0,09
ТВП _{Д5}	0,123	0,18	0	0,11
ТВП ₁ в	0,092	0	0,51	0,25
ТВП ₁ н	0,101	0	0,72	0,36
ТВП ₁ суммарно	0,246	0	1,22	0,61
ТВП _Д суммарно ($Q_{\text{пов касс 1}}$)	0,976	1,22	0	0,61
ПСД суммарно	1,221	1,22	1,22	1,22

Средняя объёмная плотность тепловыделения в материалах ПСД будет зависеть от многих факторов: материального состава конструкции, места расположения, нейтронной нагрузки, длительности эксплуа-

тации, наличия в бланкете делящихся изотопов и др. Оценки, выполненные в ходе проектирования ДЕМО-ТИН с учётом наличия в бланкете делящихся изотопов, дают значения объёмной плотности тепловыделения в материалах, приведённые в табл. 4, колонка «Максимальная». Если делящиеся изотопы в бланкете отсутствуют, то объёмная плотность тепловыделения в материалах будет меньше. Её значения для этого варианта приведены в табл. 4, колонка «Минимальная». Дальнейшие расчёты выполнены для этих двух вариантов. В табл. 4 указан также материальный состав ТВП₁ (в процентах по объёму). Для стали учтён материал коллекторов. Считаем, что объёмная плотность тепловыделения в материалах не зависит от режима горения плазмы.

Т а б л и ц а 4. Материальный состав ТВП₁ и средняя объёмная плотность тепловыделения в её материалах

Материал	Объёмная доля материала в ТВП ₁ x_i , %	Объёмная плотность тепловыделения в материале $q_{об\ i}$, МВт/м ³	
		Минимальная	Максимальная
Сталь	80	12	21
Бериллий	15	3	5
Бронза	1	14	25
Вода	4	4	6
Панель в целом		10,35	18

Материальный состав кассеты дивертора, плотность и мощность тепловыделения в её материалах представлены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5. Материальный состав кассеты дивертора, плотность и мощность тепловыделения в её материалах

Материал	Масса материала в кассете, кг	Объём материала в кассете, м ³	Объёмная плотность тепловыделения в материале, МВт/м ³		Мощность тепловыделения в материале, МВт	
			Минимальная	Максимальная	Минимальная	Максимальная
Сталь	1580	0,2	10,5*	19*	2,1	3,8
Бериллий	25,2	0,014	3	5	0,042	0,07
Бронза	5,3	0,0006	14	25	0,0084	0,015
Вода	189,5	0,19	3,2*	5*	0,61	0,95

*Уменьшение средней объёмной плотности тепловыделения в материалах кассеты по сравнению с материалами ТВП₁ обусловлено ослаблением нейтронного потока слоями стали и воды.

Тепловая мощность элементов ПСД, обусловленная объёмным тепловыделением в материалах, представлена в табл. 6.

Т а б л и ц а 6. Тепловая мощность элементов ПСД, обусловленная объёмным тепловыделением в материалах

Элемент	Тепловая мощность, обусловленная объёмным тепловыделением в материалах, МВт	
	Минимальная	Максимальная
ТВП _{1В}	0,8	1,4
ТВП _{1Н}	1,13	1,97
ТВП ₁	1,93	3,37
Кассета дивертора	2,76	4,84
ПСД суммарно	4,69	8,21

Полная тепловая мощность элементов ПСД, обусловленная как тепловым потоком из плазмы, так и объёмным тепловыделением в материалах, представлена в табл. 7.

Т а б л и ц а 7. Полная тепловая мощность элементов ПСД, обусловленная тепловым потоком из плазмы и объёмным тепловыделением в материалах, МВт

Элемент ПСД	Режим горения плазмы							
	Штатный		Экстремальный-1		Экстремальный-2		MARFE	
	Мин.*	Макс.**	Мин.*	Макс.**	Мин.*	Макс.**	Мин.*	Макс.**
ТВП _{1В}	0,89	1,49	0,8	1,4	1,26	1,86	1,03	1,63
ТВП _{1Н}	1,26	2,1	1,13	1,97	1,78	2,62	1,46	2,3
ТВП ₁	2,15	3,59	1,93	3,37	3,04	4,48	2,49	3,93
Кассета дивертора	3,65	5,73	3,87	5,95	2,76	4,84	3,31	5,39
ПСД суммарно	5,8	9,32	5,8	9,32	5,8	9,32	5,8	9,32

*Указана полная тепловая мощность элементов ПСД при минимальных значениях объёмного тепловыделения в материалах.

**Указана полная тепловая мощность элементов ПСД при максимальных значениях объёмного тепловыделения в материалах.

Необходимо отметить, что будет иметь место радиационный теплообмен между поверхностью ПС и поверхностями ВК и бланкета, обращёнными к ПС. Оценка мощности этого теплообмена, сделанная в [3], показывает его малую величину по сравнению с тепловой мощностью ПСД, и в дальнейшем он не учитывается.

ВЫБОР СХЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СЕКЦИИ ПСД

Анализ конструкции ПСД показывает, что её можно разделить на четыре элемента — ТВП_{1В}, корпус кассеты, ТВП_{1Н}, ТВП_Д. Представляется рациональным производить их охлаждение по следующей схеме: ТВП_{1В}, корпус кассеты, ТВП_{1Н} охлаждаются водой с параметрами:

Температура воды на входе $T_{вх}$, °С . . .	50
Температура воды на выходе $T_{вых1}$, °С . . .	100
Давление воды на входе, МПа . . .	4

ТВП_Д охлаждаются отдельным потоком воды с параметрами:

Температура воды на входе $T_{вх}$, °С . . .	50
Температура воды на выходе из ТВП _Д $T_{вых\text{пд}}$, °С . . .	54—55
Давление воды на входе, МПа . . .	4

Использование воды с такими параметрами обусловлено следующими причинами:

— ТВП_Д подвержены воздействию мощных тепловых потоков из плазмы (локальные значения могут быть больше 10 МВт/м², и в этих местах будет поверхностное кипение воды). Использование воды температурой 54—55 °С при температуре насыщения $T_s \sim 250$ °С позволит иметь её значительный недогрев до температуры насыщения и тем самым даст большой запас до кризиса теплоотдачи;

— подогрев воды в ТВП_Д не должен превышать 4—5 °С, что обеспечивает скорость воды в трубках 3—8 м/с и коэффициент теплоотдачи к воде более 30 000 Вт/(м²·°С), и тем самым достигается требуемый температурный режим металлоконструкций и тайлов ТВП_Д. Проблема кризиса теплоотдачи в трубках и пути его предотвращения в работе не рассматривается;

— использование подогрева воды 4—5 °С при охлаждении корпуса кассеты представляется нерациональным, так как это потребует значительного расхода воды и значительного диаметра трубопроводов, подающих эту воду;

— при охлаждении ТВП_{1В} и ТВП_{1Н} подогрев воды не может быть менее 50 °С, так как при меньшем подогреве расход воды будет таким, что её скорость в трубках превысит допустимую. Поэтому принимаем суммарный подогрев воды в ТВП_{1В}, корпусе кассеты и ТВП_{1Н} 50 °С, что позволит снизить расход воды и её скорость и даст возможность избежать больших гидравлических потерь.

Возможны как минимум следующие схемы течения воды при охлаждении ТВП_{1В}, корпуса кассеты и ТВП_{1Н} (элементы, охлаждаемые одним потоком воды, указаны в скобках):

- № 1 (ТВП_{1В}, ТВП_{1Н}), (корпус кассеты);
- № 2 (ТВП_{1В}, корпус кассеты), (ТВП_{1Н});
- № 3 (ТВП_{1В}), (ТВП_{1Н}, корпус кассеты);
- № 4 (ТВП_{1В}), (корпус кассеты), (ТВП_{1Н});
- № 5 (ТВП_{1В}, часть корпуса кассеты), (ТВП_{1Н}, другая часть корпуса кассеты).

Оценки показывают, что в случае охлаждения одним потоком воды двух любых элементов ПСД при допустимом подогреве воды 50 °С её скорость в трубках будет превышать 10 м/с. Такое значение скорости воды представляется неприемлемым, поэтому выбираем схему охлаждения № 4, т.е. каждый элемент ПСД охлаждается отдельным потоком воды.

К каждому сегменту ПСД из трёх секций подведены четыре трубопровода с водой, которые уложены внутри одного из шести экваториальных портов доступа внутрь ВК токамака.

Первый — напорный трубопровод сегмента для воды, охлаждающей ТВП₁ и корпуса кассет одного сегмента; второй — сливной трубопровод сегмента для воды, охлаждающей ТВП₁ и корпуса кассет одного сегмента. Напорный трубопровод сегмента для воды, охлаждающей ТВП₁ и корпуса кассет, разделяется на три напорных трубопровода секции — по одному для каждой секции.

Сливные трубопроводы трёх секций для воды, охлаждающей ТВП₁ и корпуса кассет каждой секции, объединяются в сливной трубопровод сегмента для воды, охлаждающей ТВП₁ одного сегмента.

Третий — напорный трубопровод сегмента для воды, охлаждающей ТВП_д одного сегмента; четвёртый — сливной трубопровод сегмента для воды, охлаждающей ТВП_д одного сегмента.

Напорный трубопровод сегмента для воды, охлаждающей ТВП_д, разделяется на три напорных трубопровода секции — по одному для каждой секции.

Сливные трубопроводы трёх секций для воды, охлаждающей ТВП_д каждой кассеты, объединяются в сливной трубопровод сегмента для воды, охлаждающей ТВП_д каждой кассеты.

В конструкции бланкета необходимо предусмотреть лотки, в которых будут размещены напорные и сливные трубопроводы.

Корпус кассеты является своеобразным коллектором, который объединяет потоки воды для охлаждения самой кассеты и транзитные потоки для охлаждения ТВП_{1в}, расположенной на внутренней части тора ВК. Вследствие этого корпус кассеты дивертора снабжён рядом каналов и патрубков для подачи и слива воды.

Помимо 18 нижних и 18 верхних секций ПСД, предусмотрены ТВП, установленные на патрубках доступа в ВК, и, кроме того, ПСД содержит также дополнительные ТВП, которые установлены в атомопроводах инжекторов. Эти ТВП сейчас не рассматриваются. Схема течения воды через элементы ПСД представлена на рис. 7.

Вода, охлаждающая ТВП_{1н}, проходит через напорный трубопровод ТВП_{1н} (1), расположенный на бланкете, и поступает в напорный коллектор ТВП_{1о}, расположенный в её верхней части (2). Этот коллектор соединён напорным перепускным трубопроводом (3) с напорным коллектором опускного участка ТВП_{1мо} (4), расположенным в её верхней части. Далее вода поступает в опускные трубки ТВП_{1о} и ТВП_{1мо} (5), из них в общий сливной коллектор (6). Сливной коллектор (6) и напорный коллектор (19) объединены в общем корпусе, разделённом перегородкой (20). Из напорного коллектора (19) вода поступает в трубки ТВП_{1п} и подъёмный участок ТВП_{1мп} (21). Из трубок ТВП_{1п} вода попадает в сливной коллектор ТВП_{1п} (22), из подъёмного участка трубок ТВП_{1мп} — в сливной коллектор ТВП_{1мп} (23). Эти сливные коллекторы объединены сливным перепускным трубопроводом (24). Далее вода поступает в сливной трубопровод ТВП_{1н} (25).

Вода, охлаждающая ТВП_{1в}, проходит через напорный трубопровод ТВП_{1в} (на схеме не показан). Из этого напорного трубопровода через трубчатый переходник 1 (7) вода поступает в транзитный перепускной коллектор кассеты дивертора (8), а отсюда в трубчатый переходник 2 (9). Из трубчатого переходника 2 (9) вода поступает в напорный коллектор ТВП_{1вп} (10), соединённый с подъёмным участком трубок ТВП_{1вп} (11). Пройдя через эти трубки, вода поступает в сливной коллектор ТВП_{1вп} (12), который является также напорным коллектором для трубок опускного участка ТВП_{1во} (13). Пройдя эти трубки, вода поступает в сливной коллектор (14). Напорный коллектор (10) и сливной коллектор (14) объединены в общем корпусе, который разделён пополам перегородкой (15).

Рис. 7. Схема охлаждения секции ПСД: 1 — напорный трубопровод воды, охлаждающей ТВП_{1н}; 2 — напорный коллектор ТВП_{1о}; 3 — напорный перепускной трубопровод между напорным коллектором ТВП_{1о} и напорным коллектором ТВП_{1мо}; 4 — напорный коллектор ТВП_{1мо}; 5 — опускные трубки ТВП_{1о} и ТВП_{1мо}; 6 — общий сливной коллектор ТВП_{1о} и ТВП_{1мо}; 7 — трубчатый переходник 1 в транзитный перепускной коллектор кассеты; 8 — транзитный перепускной коллектор кассеты; 9 — трубчатый переходник 2 из транзитного перепускного коллектора кассеты; 10 — напорный коллектор ТВП_{1вп}; 11 — подъёмные трубки ТВП_{1вп}; 12 — сливной и напорный коллектор ТВП_{1вп} и ТВП_{1во}; 13 — опускные трубки ТВП_{1во}; 14 — сливной коллектор ТВП_{1во}; 15 — перегородка между коллекторами 10 и 14; 16 — трубчатый переходник 3 в возвратный перепускной коллектор кассеты; 17 — возвратный перепускной коллектор кассеты; 18 — трубчатый переходник 4 из возвратного перепускного коллектора кассеты; 19 — напорный коллектор ТВП_{1п} и ТВП_{1мп}; 20 — перегородка между коллекторами 6 и 19; 21 — подъёмные трубки ТВП_{1п} и ТВП_{1мп}; 22 — сливной коллектор ТВП_{1п}; 23 — сливной коллектор ТВП_{1мп}; 24 — сливной перепускной трубопровод между сливным коллектором ТВП_{1п} и сливным коллектором ТВП_{1мп}; 25 — сливной трубопровод воды, охлаждающей ТВП_{1н}; 26 — напорный трубопровод секции для воды, охлаждающей корпус кассеты; 27 — сливной трубопровод секции для воды, охлаждающей корпус кассеты

Из сливного коллектора (14) вода через трубчатый переходник 3 (16) поступает в возвратный перепускной коллектор в кассете дивертора (17), из него через трубчатый переходник 4 (18) в сливной трубопровод ТВП_{1В} (на схеме не показан).

Вода, охлаждающая корпус кассеты, проходит через напорный трубопровод корпуса кассеты (26), попадает в кассету и по выходе из неё попадает в сливной трубопровод корпуса кассеты (27). Движение воды в кассете удобнее рассматривать на рис. 6.

Вода из входного трубчатого переходника 5 (12) поступает в корпус кассеты, а именно в объём между нижней пластиной корпуса (2) и его средней пластиной (3). Через перепускные отверстия в средней пластине (16) вода поступает в объём между средней пластиной (3) и верхней (4) и движется в обратном направлении, к выходному трубчатому переходнику 6 (13).

Вода, охлаждающая ТВП_д, из напорного трубопровода кассеты поступает в общий напорный коллектор ТВП_д (на рис. 6 не показаны), а из него в напорные коллекторы всех пяти ТВП_д. Показаны напорный коллектор купола и напорный коллектор первой внутренней мишени (14). Пройдя ТВП_д, вода поступает в сливные коллекторы. Показан сливной коллектор купола (15). Из сливных коллекторов всех пяти ТВП_д вода поступает в общий сливной коллектор ТВП_д, который находится на противоположной от общего напорного коллектора ТВП_д стороне кассеты, из него в сливной трубопровод секции для воды, охлаждающей ТВП_д.

Теплогидравлические параметры СВО. Параметры СВО связаны следующими соотношениями:

$$Q_{эл} = GC_p(T_{вых} - T_{вх}), \quad (3)$$

где $Q_{эл}$ — тепловая мощность элемента ПСД, Вт; G — расход воды на охлаждение элемента, кг/с; C_p — средняя теплоёмкость воды при заданных параметрах, Дж/(кг·°C).

$$G_1 = rFw, \quad (4)$$

где G_1 — расход воды через трубопровод, кг/с; r — средняя плотность воды при заданных параметрах, кг/м³; F — проходное сечение трубопровода, м²; w — скорость воды в трубопроводе, м/с.

Характеристики трубопроводов элементов СВО приведены в табл. 8.

Т а б л и ц а 8. Характеристики трубопроводов элементов СВО

Элемент	Внутренний диаметр, м	Характерная скорость воды, м/с
Напорные и сливные трубопроводы сегментов	0,22	3,5—6,6
Напорные и сливные трубопроводы секции, общие напорные и сливные коллекторы ТВП _д	0,15	2,5—4,8
Напорные и сливные трубопроводы ТВП ₁ и корпуса кассеты, трубчатые переходники 5 и 6, напорные и сливные коллекторы ТВП _д	0,08	1,9—4,6
Напорные и сливные коллекторы ТВП ₁ , перепускные трубопроводы, трубчатые переходники 1, 2, 3 и 4, транзитный и возвратный перепускные коллекторы кассеты	0,05	4—6,5
Трубки ТВП ₁ и ТВП _д	0,008	3—8

Для определения теплогидравлических параметров элементов СВО берутся элементы с максимальной тепловой мощностью. Предполагаем, что при полной тепловой мощности кассеты $Q_{полн\ касс\ 1} = 5,95$ МВт поток воды, охлаждающий корпус и опорные конструкции, отводит мощность 4,6 МВт, а поток воды, охлаждающий ТВП_д и поддерживающие их конструкции, отводит мощность 1,35 МВт.

Результаты расчётов для ТВП_{1Н}, ТВП_{1В} и корпуса кассеты приведены в табл. 9.

Т а б л и ц а 9. Теплогидравлические параметры ТВП_{1Н}, ТВП_{1В} и корпуса кассеты

Параметр	ТВП _{1Н}	ТВП _{1В}	Корпус кассеты
Тепловая мощность, МВт	2,62	1,86	4,6
Расход воды на охлаждение, кг/с	12,5	8,9	22
Расход воды в одну трубку, кг/с	0,34	0,37	—
Скорость воды в трубке, м/с	7,13	7,8	0,8*
Гидравлические потери, с учётом коллекторов, МПа	0,45	0,76	0,01

*Скорость между стальными пластинами.

Допустимыми считаем гидравлические потери в 20 % от давления на входе (4 МПа), т. е. 0,8 МПа. Следовательно, потери давления в ТВП_{1В} близки к допустимым.

Суммарный расход воды на охлаждение ТВП_д при подогреве 4—5 °C — 65—80 кг/с. Результаты расчётов отдельных ТВП_д приведены в табл. 10.

Т а б л и ц а 10. Теплогидравлические параметры ТВП_д

Параметр	ТВП _{д1}	ТВП _{д2}	ТВП _{д3}	ТВП _{д4}	ТВП _{д5}
Тепловая мощность, МВт	0,26	0,35	0,36	0,18	0,2
Расход воды на охлаждение, кг/с	12,5—15,5	16,7—21	17—21,4	8,5—10,7	9,4—11,9
Расход воды в одну трубку, кг/с	0,25—0,3	0,25—0,31	0,29—0,37	0,17—0,21	0,14—0,18
Скорость воды в трубке, м/с	5,3—6,3	5,3—6,5	6,1—7,8	3,6—4,4	2,9—3,8
Гидравлические потери в трубках, МПа	0,04—0,06	0,04—0,06	0,09—0,14	0,04—0,06	0,024—0,04

ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМЫ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ И ДИВЕРТОРА

Возможные отказы в системе водяного охлаждения. По результатам анализа конструкции СВО ПСД наиболее вероятными причинами её отказов представляются следующие:

- потеря герметичности (течь воды LOCA) в любом элементе СВО;
- отрыв хотя бы одного бериллиевого тайла от ТВП.

Далее будем рассматривать только эти две причины.

Оценка вероятности отказа системы водяного охлаждения. Для оценки вероятности отказа СВО примем следующие допущения. Все трубопроводы и коллекторы СВО соединены для надёжности последовательно, т.е. отказ любого из них вызывает отказ всей СВО [4]. Так как оценки показывают, что длина трубок из хромциркониевой бронзы диаметром 10×1 мм в ТВП₁ и ТВП_д почти на порядок превышает длину всех остальных трубопроводов, то будем рассматривать только эти трубки. Все бериллиевые тайлы соединены для надёжности так же последовательно, т.е. отрыв любого из них вызывает отказ всей СВО.

Характеристики трубок и тайлов, необходимые для оценки их надёжности:

- полная длина трубок в 36 секциях ПСД $l_{\text{сумм}} = 14\,100$ м;
- число сварных швов на трубках (в предположении, что на 1 м длины трубки три сварных шва) $N_{\text{шв}} = 42\,300$;
- число гибов трубок (в предположении, что на 1 м длины трубки два гига) $N_{\text{гиб}} = 28\,200$;
- средний размер поверхности тайла 17×100 мм;
- полное число тайлов в 36 секциях ПСД $N_{\text{т}} = 129\,400$;
- интенсивность отказов трубок суммарной длиной $l_{\text{сумм}}$ можно оценить по

$$\Lambda_{\text{тр сумм}} = \lambda_{\text{тр уд}} l_{\text{сумм}} + N_{\text{шв}} l_{\text{шв 1}} \lambda_{\text{шв 1}} + N_{\text{гиб}} \lambda_{\text{гиб}}, \text{ ч}^{-1}, \quad (5)$$

где $\lambda_{\text{тр уд}}$ — удельная интенсивность отказов прямой трубки, $\text{м}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$; $l_{\text{шв 1}}$ — длина одного сварного шва, м; $\lambda_{\text{шв 1}}$ — удельная интенсивность отказов одного погонного метра сварного шва, $\text{м}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$; $N_{\text{гиб}}$ — число гибов трубок; $\lambda_{\text{гиб}}$ — интенсивность отказов одного гига трубки, ч^{-1} .

Интенсивность отказов одного тайла $\lambda_{\text{тайл}}$ оценим экспертным путём, тогда

$$\Lambda_{\text{тайл сумм}} = N_{\text{т}} \lambda_{\text{тайл}}, \text{ ч}^{-1}. \quad (6)$$

В [5] 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 совпадает с определённой в [5] $\lambda_{\text{тр уд}}$ для трубопроводов близкого диаметра.

Значения минимальных и максимальных характеристик надёжности элементов СВО приведены в табл. 11. При отсутствии данных о надёжности элементов в условиях ТЯР приведенные величины носят условный характер.

Т а б л и ц а 11. Характеристики надёжности элементов СВО

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
$\lambda_{\text{тр уд}}, \text{ м}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-10}$
$\lambda_{\text{шв 1}}, \text{ м}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$
$\lambda_{\text{гиб}}, \text{ ч}^{-1}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$
$\Lambda_{\text{тр сумм}}, \text{ ч}^{-1}$	$4,36 \cdot 10^{-6}$	$1,26 \cdot 10^{-5}$
$\lambda_{\text{тайл}}, \text{ ч}^{-1}$	10^{-9}	10^{-8}
$\Lambda_{\text{тайл сумм}}, \text{ ч}^{-1}$	$1,29 \cdot 10^{-4}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$
$\Lambda_{\text{СВО}}, \text{ ч}^{-1}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$

Сделаем оценку надёжности работы системы трубок ПСД без учёта надёжности тайлов.

Считаем, что вероятность безотказной работы системы трубок $R_{\text{тр сумм}}$, которая работала период времени t , описывается экспоненциальным законом надёжности

$$R_{\text{тр сумм}} = \exp(-\Lambda_{\text{тр сумм}} t). \quad (7)$$

Вероятность отказа системы трубок

$$F_{\text{тр сумм}} = 1 - R_{\text{тр сумм}}. \quad (8)$$

Результаты расчётов надёжности системы трубок ПСД 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. Вероятности отказов и безотказной работы системы трубопроводов ПСД

Время работы t , ч	$R_{\text{тр сумм}}$	$F_{\text{тр сумм}}$
100	0,9996 (0,9987)	0,0004 (0,0013)
500	0,9978 (0,9937)	0,0022 (0,0063)
1000	0,9956 (0,9875)	0,0044 (0,0125)
5000	0,978 (0,9389)	0,022 (0,0611)
10 000	0,957 (0,8816)	0,043 (0,1184)
30 000	0,877 (0,6852)	0,123 (0,3148)

Результаты расчётов показывают, что надёжность системы трубок ПСД рассматриваемой конструкции можно условно считать удовлетворительной. В течение длительного времени вероятность её безотказной работы будет достаточно велика.

Сделаем оценку надёжности работы системы трубок ПСД с учётом надёжности тайлов.

Считаем, что вероятность безотказной работы $R_{\text{СВО}}$, которая работала период времени t , описывается экспоненциальным законом надёжности

$$R_{\text{СВО}} = \exp(-\Lambda_{\text{СВО}} t), \quad (9)$$

где $\Lambda_{\text{СВО}} = \Lambda_{\text{тр сумм}} + \Lambda_{\text{тайл сумм}}$ — интенсивность отказов СВО, ч^{-1} . Вероятность отказа СВО

$$F_{\text{СВО}} = 1 - R_{\text{СВО}}. \quad (10)$$

Результаты расчётов надёжности СВО при минимальных ожидаемых и максимальных ожидаемых интенсивностях отказов элементов приведены в табл. 13. Во всех дальнейших расчётах в скобках даны значения при максимальных ожидаемых интенсивностях отказов.

Т а б л и ц а 13. Вероятности отказов и безотказной работы СВО

Время работы t , ч	$R_{\text{СВО}}$	$F_{\text{СВО}}$
100	0,987 (0,878)	0,013 (0,122)
500	0,936 (0,522)	0,064 (0,478)
1000	0,875 (0,273)	0,125 (0,727)
5000	0,514 (0,015)	0,486 (0,985)
10 000	0,264 (0)	0,736 (1)
30 000	0,0185 (0)	0,9815 (1)

Результаты расчётов показывают, что надёжность СВО ПСД рассматриваемой конструкции нельзя признать удовлетворительной. После сравнительно короткого времени эксплуатации вероятность её отказа резко возрастает.

ВЫВОДЫ

Теплогидравлический расчёт показывает, что при выбранной схеме СВО можно обеспечить охлаждение элементов ПСД. Скорость воды в трубопроводах и гидравлические потери при её прокачке не превышают допустимые.

Полная тепловая мощность элементов ПСД в значительной степени (более 80%) определяется объёмной плотностью тепловыделения в конструкционных материалах. Тепловые нагрузки из плазмы составляют менее 20% от полной тепловой мощности элементов ПСД.

В свою очередь, максимальной мощности внутреннее тепловыделение достигает в стальных конструкциях. Если уменьшить массовую долю стали в конструкциях ПСД (сделать конструкции более тонкими, сплошные рёбра жёсткости заменить на решётчатые и т.п.), то можно снизить их тепловую мощность и расход воды на охлаждение.

Необходима оптимизация системы прокачки теплоносителя через ТВП₁ и кассету дивертора.

Необходимо разработать систему охлаждения опорных конструкций ТВП_д.

Основным фактором, определяющим надёжную работу СВО, является надёжность бериллиевых тайлов и охлаждающих их трубок. Необходимо добиться максимально надёжного крепления тайлов к стальной основе ТВП₁ и ТВП_д.

REFERENCES

1. **Azizov E.A. et al.** Tokamak DEMO-FNS: concepts of magnet system and vacuum chamber. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2015, vol. 38, issue 2, pp. 5—18 (in Russian).
2. **Sergeev V.Yu., Kuteev B.V. et al.** Conceptual design of divertor and first wall for DEMO-FNS. — Nuclear Fusion, 2015, vol. 55, p. 123013.
3. **Pashkov A.Yu., Filimonova E.A.** The transition processes in the vacuum vessel of the FNS installation at loca and lofa in its coolant system and in the coolant systems of plasma facing components. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2017, vol. 40, issue 3, p. 78 (in Russian).
4. **Bakhmet'ev A.M. et al.** Estimation methods and safety support of nuclear power facilities. — M.: Energoatomizdat, 1988 (in Russian).
5. **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

Petrov V.S. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Petrov_VS@nrcki.ru

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

Filimonova E.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; alb@fc.iterru.ru

Received 14 April 2018
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2018, vol. 41, issue 3, pp. 36—47