### УДК 621.039.634

# ОЦЕНКА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ УСТАНОВКИ ДЕМО-ТИН

А.Ю. Пашков, Ю.С. Шпанский, В.С. Петров

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Сделана оценка тепловой мощности и теплогидравлических параметров системы охлаждения внутрикорпусного объёма вакуумной камеры (ВК) проектируемого термоядерного источника нейтронов ДЕМО-ТИН. Рассмотрены варианты конструкции внутрикорпусного объёма ВК — железоводной защиты (ЖВЗ) из цилиндрических слоёв стали, стальных сферических элементов и др., а также различные схемы течения воды в ЖВЗ. Описана методика теплогидравлического расчёта. Сделаны предложения по совершенствованию конструкции ВК и ЖВЗ.

Ключевые слова: ДЕМО-ТИН, вакуумная камера, железоводная защита, теплогидравлические расчёты.

# ASSESSMENT OF THERMAL-HYDRAULIC PARAMETERS VACUUM CHAMBER COOLING SYSTEM OF FNS INSTALLATIOSIONS

A.Yu. Pashkoff, Yu.S. Shpanskiy, V.S. Petrov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The paper contains estimation of thermal power as well as thermal and hydraulic characteristics of in-vessel components cooling systems for fusion neutron source DEMO-FNS that is now under development. Several options of in-vessel components structure, in particular iron-water shielding (IWS) made of steel cylindrical layers or steel spherical elements, and different schemes of water flow in the IWS are considered. Method of thermo-hydraulic calculations is described. Recommendations for improvements of the vacuum chamber and IWS structure are given.

Key words: DEMO-FNS, vacuum chamber, iron-water shielding, thermo-hydraulic calculations.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-3-25-36

### введение

Вакуумная камера (ВК) — один из основных элементов конструкции токамака установки ДЕМО-ТИН, проект которой предложен в [1].

Основные параметры токамака:	
Большой радиус <i>R</i> , м	3,2
Аспектное отношение $A = R/a$	3,2
Число секций N	18
Мощность термоядерной реакции в токамаке P <sub>f</sub> , MBT	~40
Нейтронный компонент термоядерной мощности $P_n$ , МВт	32
Часть термоядерной мощности, уносимая α-частицами, P <sub>α</sub> , MBT	8
Мощность дополнительного нагрева $P_{\text{доп}}$ , МВт	36
Мощность, воспринимаемая поверхностями первой стенки и	
дивертора, $P_{\text{пов}} = P_{\alpha} + P_{\text{доп}}$ , MBт	44
Объём плазмы $V_{nn}$ , м <sup>3</sup>	~150
Площадь первой стенки $S_{nc}$ , м <sup>2</sup>	~180
Средняя нейтронная нагрузка на первую стенку $P_n/S_{nc}$ , MBт/м <sup>2</sup>	~0,2

ВК является также важнейшей системой, обеспечивающей работоспособность и безопасность всей установки ДЕМО-ТИН. Она выполняет следующие основные функции:

— служит основой для крепления компонентов, обращённых к плазме, диагностических и обеспечивающих систем;

обеспечивает поддержание вакуума в разрядной камере токамака;

создаёт барьер безопасности при аварийных ситуациях;

— снижает потоки нейтронов и гамма-квантов на магнитные катушки и обеспечивает радиационные санитарные нормы в здании токамака [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; 8 — вакуумная камера (зелёным цветом выделен внутренний обход, синим цветом — внешний обход); 9 — центральный соленоид

На рис. 1 показана схема взаимного расположения основных элементов токамака ДЕМО-ТИН. Основные конструкционные материалы ВК — сталь и вода (теплоноситель).

Под воздействием нейтронного и гаммаизлучения из плазмы, а также из бланкета с делящимися изотопами (если он будет установлен), в конструкционных материалах будет значительное внутреннее тепловыделение (максимальное более 1 МВт/м<sup>3</sup>), поэтому в ВК необходимо иметь систему охлаждения (СО).

Настоящая работа выполнена с целью более детального определения характеристик СО. ВК имеет довольно сложную геометрическую форму (даже без учёта патрубков) и условно разделяется на две части — внутренний и наружный обход. Во внутреннем обходе выделяется центральная цилиндрическая часть.

Расчёты производятся для центральной цилиндрической части, так как она имеет наиболее простую геометрическую форму. Выводы, сделанные по результатам расчётов этой части, в дальнейшем называемой центральной частью, применимы ко всей ВК.

### КОНСТРУКЦИЯ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ И СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

**Проектная конструкция ВК.** Проектная конструкция ВК, предложенная в [1], состоит из следующих элементов: корпуса, внутрикорпусного объёма с металлоконструкциями и водой, внутреннего объёма. Один из последних вариантов конструкции ВК предложен в пояснительной записке АО «НИИ-ЭФА» «Разработка электромагнитной системы и вакуумной камеры ТИН. Этап 2018».



Рис. 2. Общий вид сектора вакуумной камеры: *1* — экваториальный патрубок; 2 — патрубок системы нейтральной инжекции; *3* — вертикальный патрубок; *4* — внутренняя оболочка вакуумной камеры; *5* — железоводная защита; *6* — внешняя оболочка вакуумной камеры

В процессе проектирования при сохранении основных размеров ВК изменилась её толщина (на внутреннем обходе 0,72 м и на наружном обходе 0,6 м).

Корпус ВК — стальная конструкция тороидальной формы D-образного вертикального сечения, состоящая из двух коаксиальных оболочек толщиной 0,04 м — внутренней, обращённой к первой стенке (ПС), и внешней, обращённой к криостату и катушкам тороидального поля.

Корпус состоит из 18 сегментов, в каждом из которых есть верхний, нижний и средний патрубок. Три сегмента составляют один сектор (всего шесть секторов, одинаковых по размеру). Общий вид сектора показан на рис. 2. Секторы свариваются между собой в единое целое на монтажной площадке после предварительной сборки с тремя катушками тороидального поля. Для подачи и отвода воды, охлаждающей ЖВЗ, в каждом секторе ВК установлены подводящие и отводящие коллекторы, т.е. на ВК установлено по шесть подводящих и отводящих коллекторов.

Наличие требований по замене в течение жизненного цикла установки отдельных секторов ВК ставит задачу по размещению в конструкции камеры специальных монтажных узлов, которые позволят обеспечить неоднократное соединение секторов. Для этого размеры секторов в тороидальном направлении выбраны такими, чтобы между ними при сборке по внутренней оболочке обеспечивался зазор 0,31 м, по наружной оболочке зазор — 0,2 м. В зазор между наружными оболочками секторов изнутри ВК устанавливаются металлические пластины-вставки из стали и выполняются монтажные сварные

швы. После сварки вставок наружная оболочка образует вакуумную границу камеры.

Для снижения степени радиационного облучения, приходящегося во время работы установки на сварные соединения вставок с секторами, монтажные швы наружной оболочки защищают блоками защиты.

Каждый элемент блока защиты представляет собой коробчатую конструкцию с толщиной стенок 0,03 м, внутри которой размещена её собственная ЖВЗ. Взаимное расположение секторов ВК, пластинвставок, ЖВЗ и блока защиты показано на рис. 3.

Внутрикорпусной объём ограничен внутренней и внешней оболочками, которые связаны между собой системой тороидальных и полоидальных рёбер жёст-кости. Свободное пространство между рёбрами и оболочками частично заполнено пластинами из стали 304В7, имеющими форму цилиндрических слоёв. Остальной внутрикорпусной объём заполнен циркулирующей водой. В совокупности корпус, внутрикорпусные металлоконструкции и вода образуют ЖВЗ с соотношением по объёму 70% стали, 30% воды. Таким образом, отношение объёма стали к полному объёму ЖВЗ J = 0,7.

Внутренний объём ВК ограничен внутренней оболочкой корпуса, в нём находятся первая стенка (ПС), дивертор, бланкет и разрядная камера, в которой протекает термоядерная реакция.

Система охлаждения и прогрева ВК. Система охлаждения (СО) предназначена для обеспечения требуемого температурного состояния ВК. Она должна обеспечить надёжный отвод тепловой мощности, выделяющейся в конструкционных материалах ВК. Тепловая мощность складывается из тепловыделения в оболочках ВК, во внутрикорпусных металлоконструкциях и воде, заполняющей корпус.

Помимо этого, в аварийном режиме СО ВК должна обеспечить отвод остаточного тепловыделения как от самой ВК, так и от находящихся в ней ПС, дивертора и бланкета даже в условиях отсутствия их собственного охлаждения.

Схема течения воды во внутрикорпусном объёме проектной конструкции ВК показана на рис. 4. Вода через подводящий коллектор, расположенный под нижним дивертором, поступает во внутрикорпусной объём ВК и омывает нижние раздаточные



Рис. 3. Элемент сечения смежных секторов центральной части ВК горизонтальной плоскостью для проектной конструкции: *1* — блок защиты; *2*, *7* — секторы вакуумной камеры с ЖВЗ; *3* — болт; *4*, *5* — каналы охлаждения; *6* — штифт; *8* — внешняя оболочка; *9* — вставка



Рис. 4. Схема течения воды во внутрикорпусном объёме проектной конструкции ВК: 1 — участок подогрева А; 2 — участок подогрева В; 3 — участок подогрева С; 4 — подвод воды; 5 — отвод воды; 6 — участок подогрева D

пластины ЖВЗ, которые выполнены перфорированными. Далее поток воды разделяется на два. Внутренний поток охлаждает внутренний обход ВК, включая центральную часть. Наружный поток охлаждает наружный обход ВК, на котором установлен бланкет.

Перфорация раздаточных пластин ЖВЗ выполнена в шахматном порядке. Распределение расхода воды на внутреннюю и внешнюю части ВК может регулироваться различной перфорацией нижних раздаточных пластин. В области верхних перфорированных пластин, расположенных над верхним дивертором, внутренний и внешний потоки воды сливаются и отводятся из внутрикорпусного объёма ВК.

В расчётах используются проектные [1] параметры CO, которые в дальнейшем могут измениться. В штатном режиме средняя температура воды на входе в ВК  $T_{\rm BX}$  находится диапазоне 60—80 °C при её давлении  $P_{\rm BX} = 0.5$ —1,1 МПа.

### ОЦЕНКА ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

**Принятые допущения.** ВК состоит из двух материалов — стали и воды. Полная тепловая мощность ВК *Q*<sub>полн</sub>, обусловленная внутренним тепловыделением в её материалах, определится как

$$Q_{\text{полн}} = \int q_{\nu \text{ cr}} dV_{\text{cr}} + \int q_{\nu \text{ воды}} dV_{\text{воды}}, \text{ BT},$$
(1)

где  $q_{v cr}$  — плотность внутреннего тепловыделения в стали, Вт/м<sup>3</sup>;  $q_{v воды}$  — плотность внутреннего тепловыделения в воде, Вт/м<sup>3</sup>;  $V_{cr}$  — объём стали в ВК, м<sup>3</sup>;  $V_{воды}$  — объём воды в ВК, м<sup>3</sup>.

Величины  $q_{v \, cr}$  и  $q_{v \, воды}$  зависят от многих факторов: времени и режима работы ВК, характеристик бланкета, места расположения элементарного объёма dV, для которого определяется плотность внутреннего



Рис. 5. Схема сечения одной секции центральной части ВК горизонтальной плоскостью для проектной конструкции: I — внутренняя оболочка ВК — цилиндрический слой стали № 1; 2— I5 — цилиндрические слои стали № 2—15; I6 — внешняя оболочка ВК — цилиндрический слой стали № 16; I7 — канал для охлаждающей воды № 17; I8—31 — каналы для охлаждающей воды № 18—31; 32 — катушка тороидального поля; 33 — центральный соленоид; 34 — первая стенка; 35 — вакуумный зазор

тепловыделения. В связи со сложностью определения  $Q_{полн}$  рассмотрим центральную часть ВК, расположенную в области центрального соленоида с внутренней тепловой мощностью  $Q_{\rm ц \, тепл}$ . Схема сечения одной секции центральной части ВК горизонтальной плоскостью для проектной конструкции представлена на рис. 5. Она состоит из чередующихся цилиндрических слоёв стали (ЦСС): 14 слоёв толщиной  $2\partial = 0,03$  м, 14 слоёв воды шириной 0,014 м (далее называемых каналами), охлаждаемых текущей водой, и один канал между внутренней оболочкой ВК и ближайшим к ней ЦСС шириной 0,024 м.

Первый ЦСС — внутренняя оболочка ВК имеет порядковый № 1, следующий по направлению к внешней оболочке — № 2, ближайший к внешней оболочке ВК — № 15, последний ЦСС — внешняя оболочка ВК № 16. ЦСС (кроме оболочек) выполнены перфорированными, что

способствует выравниванию гидравлических потерь при течении воды между ними.

Первый водяной канал (самый широкий), ближайший к внутренней оболочке ВК, имеет порядковый № 17, следующий — № 18, ближайший к внешней оболочке ВК — № 31.

Высота цилиндрических слоёв стали и воды (центральной части ВК) H = 4,8 м. Внутренний радиус ЦСС № 1  $R_{1 \text{ внут}} = 2,09$  м, внешний радиус  $R_{1 \text{ внеш}} = 2,13$  м. Внутренний радиус ЦСС № 16  $R_{16 \text{ внут}} = 1,41$  м, внешний радиус  $R_{16 \text{ внеш}} = 1,45$  м.

Плотность внутреннего тепловыделения в материалах ВК. Основываясь на ранее выполненных оценках характеристик ВК для ДЕМО-ТИН [2], можно предположить, что  $q_{v \, cr}$  и  $q_{v \, воды}$  максимальны на поверхности внутренней оболочки, обращённой к ПС. При удалении от этой поверхности внутренней оболочки и приближении к внешней оболочке величины  $q_{v \, cr}$  и  $q_{v \, воды}$  уменьшаются и на расстоянии 18 см от поверхности внутренней оболочки снижаются на порядок. Отсюда  $q_{v \, cr}$  в ВК может быть записана в виде

$$q_{\rm v\,cr} = q_{\rm v\,cr\,\,makc}(x=0)\exp(-12,67x),\,{\rm Br/M}^3,$$
(2)

где *x* — расстояние по нормали от поверхности внутренней оболочки ВК, обращённой к ПС, м;  $q_{v \, cr \, max}(x=0)$  — максимальная плотность внутреннего тепловыделения на поверхности внутренней оболочки ВК (*x* = 0), Вт/м<sup>3</sup>. Зависимость  $q_{v \, воды}$  от *x* определяется аналогично.

В каждом слое стали или воды величины  $q_{v \text{ ст}}$  и  $q_{v \text{ воды}}$ , как следует из (2), существенно зависят от координаты *x*. В дальнейшем будем пользоваться средними значениями  $q_{v \text{ ст}}$  и  $q_{v \text{ воды}}$ , постоянными для каждого слоя стали или воды. Для внутренней оболочки ВК принимаем  $q_{v \text{ ст} 1} = 1,8 \text{ MBT/m}^3$ , для водяного канала № 17  $q_{v \text{ воды} 17} = 0,6 \text{ MBT/m}^3$ . Зависимость  $q_{v \text{ ст}}(x)$  показана на рис. 6.

В качестве материала корпуса ВК предполагается использовать сталь, близкую по характеристикам к стали марки 316LN-IG, использованной в проекте ИТЭР. Максимально допустимая температура этой стали не более 450 °C.



Рис. 6. График зависимости плотности внутреннего тепловыделения в стали ВК от расстояния по нормали от поверхности внутренней оболочки ВК, обращённой к первой стенке

Геометрические и теплофизические параметры ЦСС для проектной конструкции приведены в табл. 1.

i u o n n d u i. Hupuwerpbi diningph feeting enoeb erunn						
Номер слоя	Средний радиус, м	Площадь поперечного сечения, м <sup>2</sup>	Объём, м <sup>3</sup>	Среднее значение $q_{\rm v  cr}$ <i>i</i> , кВт/м <sup>3</sup>	Тепловая мощ- ность Q <sub>ст i</sub> , кВт	
1	2,11	0,53	2,54 1800		4570	
2	2,051	0,386	1,85	853	1578	
3	2,007	0,378	1,81	503	910	
4	1,963	0,37	1,78	297	529	
5	1,919	0,362	1,74	175	305	
6	1,875	0,353	1,7	103	175	
7	1,831	0,345	1,66	61	101	
8	1,787	0,337	1,62	36	58,3	
9	1,743	0,328	1,57	21	33	
10	1,699	0,32	1,54	12,5	19,4	
11	1,655	0,312	1,5	7,4	11,1	
12	1,611	0,304	1,46	4,4	6,4	
13	1,567	0,295	1,42	2,6	3,7	
14	1,523	0,287	1,38	1,5	2,1	
15	1,479	0,279	1,34	0,9	1,2	
16	1,43	0,359	1,72	0,53	0,9	
Суммарно		5,55	26,62	_	8304	

Таблица 1. Параметры цилиндрических слоёв стали

Полная тепловая мощность ЦСС определится как

$$Q_{\rm ct. \, IIMI} = \sum_{i=1}^{i=16} Q_{\rm ct.\,i} = 8,3 \,\rm MBt.$$
(3)

Геометрические и теплофизические параметры водяных каналов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры водяных каналов

		i u o n n g u 2: iiupunio	-per bogannen nam		
Цомор кононо	Средний	Площадь поперечного	Объём воды в	Среднее значение	Тепловая мощ-
помер канала	радиус, м	сечения $S_{\text{воды }i}$ , м <sup>2</sup>	канале, м <sup>3</sup>	$q_{\text{v} \text{ воды } i}$ , к $\text{Bt/m}^3$	ность $Q_{\text{воды }i}$ , кВт
17	2,078	0,313	1,502	600	901
18	2,029	0,178	0,854	284	243
19	1,985	0,175	0,84	168	141
20	1,941	0,171	0,821	99	81,3
21	1,897	0,167	0,802	58,3	46,8
22	1,853	0,163	0,782	34,4	26,9
23	1,809	0,159	0,763	20,3	15,5
24	1,765	0,155	0,744	12	8,9
25	1,721	0,151	0,725	7,1	5,1
26	1,677	0,147	0,706	4,2	3
27	1,633	0,143	0,686	2,5	1,7
28	1,589	0,14	0,667	1,5	1
29	1,545	0,136	0,653	0,86	0,56
30	1,501	0,132	0,634	0,5	0,32
31	1,457	0,128	0,614	0,3	0,18
Суммарно		$S_{norm} = 2.46$	10.16		1476

Полная тепловая мощность цилиндрических водяных каналов определится как

$$Q_{\text{водыцил}} = \sum_{i=17}^{i=31} Q_{\text{воды } i} = 1,48 \text{ MBT.}$$
(4)

Полная тепловая мощность центральной части ВК

$$Q_{\text{цил}} = Q_{\text{ст цил}} + Q_{\text{воды цил}} = 9,78 \text{ MBT.}$$
 (5)

Анализ данных табл. 1 и 2 показывает, что максимальная тепловая мощность будет у канала № 17, в который поступает вся тепловая мощность из внутренней оболочки (ЦСС № 1), приблизительно половина тепловой мощности из ЦСС № 2 и вся тепловая мощность, выделяющаяся в воде канала № 17. Следующим по мощности будет канал № 18, затем № 19 и т.д.

Оценки, выполненные в [3], показывают, что в штатном режиме работы суммарная тепловая мощность, поступающая к ВК путём теплообмена излучением с окружающими конструкциями и через крепления этих конструкций к ВК, незначительна по сравнению с тепловой мощностью ВК, обусловленной внутренним тепловыделением, и в дальнейшем этой величиной пренебрегаем.

Полная тепловая мощность внутреннего обхода ВК  $Q_{внут}$  будет складываться из тепловых мощностей изогнутого участка A (см. рис. 4), прямого участка B (центральная часть) и изогнутого участка C. Суммарная длина поверхности внутренней оболочки BK на участках A и C в тороидальном направлении составляет приблизительно половину длины поверхности внутренней оболочки BK на участке B. Плотность тепловыделения в материалах участков A и C составит приблизительно 20% от плотности тепловыделения в материалах участка B, так как на участках A и C расположены кассеты дивертора, ослабляющие нейтронное и гамма-излучение из плазмы. Следовательно, тепловая мощность участков A и C составит приблизительно 10% от тепловой мощности участка B, и тогда

$$Q_{\rm BHYT} = 1.1 \ Q_{\rm IJMT} = 10.8 \ \rm MBT.$$
 (6)

Внутренний поток воды при течении в ВК проходит участки подогрева (см. рис. 4) А, В и С. Наружный поток воды проходит один участок подогрева D. Так как длина наружного обхода ВК приблизительно в 1,5 раза больше длины внутреннего обхода, то тепловая мощность наружного обхода

$$Q_{\rm hap} = 1,5Q_{\rm BHyT} = 16,2 \text{ MBT.}$$
(7)

Полная тепловая мощность ВК

$$Q_{\text{полн}} = Q_{\text{внут}} + Q_{\text{нар}} = 27 \text{ MBT.}$$
(8)

## ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ВНУТРИКОРПУСНОГО ОБЪЁМА ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

Методика расчёта. Суммарный расход воды на охлаждение внутренней части G<sub>внут</sub> определится по

$$G_{\rm BHyT} = Q_{\rm BHyT} / (\Delta T_{\rm nog} \ C_{\rm Bogbl}), \tag{9}$$

где  $C_{\text{воды}}$  — средняя массовая теплоёмкость охлаждающей воды в ВК, Дж/(кг. °С); средний подогрев воды в ВК

$$\Delta T_{\text{под}} = T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}, \,^{\circ}\text{C}, \tag{10}$$

где *Т*<sub>вых</sub> — средняя температура воды на выходе из ВК.

Расход воды G<sub>i</sub> в каждом *i*-ом канале определится как

$$G_i = G_{\text{внут}} S_{\text{воды } i} / S_{\text{воды цен}}, \, \text{кг/c.}$$
(11)

Средняя скорость воды в *i*-ом канале w<sub>i</sub> определится как

$$w_i = G_i / (S_{\text{воды}} r_{\text{воды}}), \, \text{M/c}, \tag{12}$$

где  $r_{воды}$  — средняя плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

Тепловая мощность канала № 17  $Q_{17} \sim 1,1(Q_{ct\,1} + 0.5Q_{ct\,2} + Q_{воды\,17})$ , канала № 18  $Q_{18} \sim 1,1(0.5Q_{ct\,2} + 0.5Q_{ct\,3} + Q_{воды\,18})$ . Тепловая мощность остальных каналов определяется аналогично.

Подогрев воды в *i*-ом канале  $\Delta T_{\text{под }i}$  определится по (9) при подстановке  $Q_i$  и  $G_i$ . Перепад температуры между температурой поверхности внутренней оболочки ВК (обращённой к ПС) радиусом

 $R_{1 \text{ внеш}} = 2,13$  м и температурой её поверхности, омываемой водой канала № 17 радиусом  $R_{1 \text{ внут}} = 2,09$  м, определится по уравнению для цилиндрической стенки [4]

$$\Delta T_{\rm ct\,1} = q_{\rm v\,ct\,1} \left( R_{\rm 1\,\,BHem} \right)^2 / (4\lambda_{\rm ct}) \left[ 2\ln(R_{\rm 1\,\,BHem}/R_{\rm 1\,\,BHyt}) + (R_{\rm 1\,\,BHyt}/R_{\rm 1\,\,BHem})^2 - 1 \right],\tag{13}$$

где  $\lambda_{cr}$  — коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м·К). При температуре 200—300 °С  $\lambda_{cr} = 18$  Вт/(м·К).

Перепад температуры между максимальной температурой цилиндрического слоя стали и температурой его поверхности (для слоёв № 2—15, омываемых водой с двух сторон) можно оценить по формуле для плоской стенки. Когда отношение наружного радиуса цилиндрического слоя к его внутреннему радиусу близко к 1, эта формула применима. Для *i*-го слоя

$$\Delta T_{\rm cr\,i} = q_{\rm v\,cr\,i}\,\partial^2 / (2\lambda_{\rm cr}). \tag{14}$$

Скорость воды в *i*-ом кольцевом канале определится по (12). В проектной конструкции скорость воды во всех каналах одинакова.

Средний коэффициент теплоотдачи α<sub>*i*</sub> при турбулентном течении воды в *i*-ом кольцевом канале определится по уравнению [4]

$$Nu_{d \ 3KB \ i} = 0.017 (Re_{d \ 3KB \ i})^{0.8} Pr^{0.4} (Pr_{k}/Pr_{c})^{0.25},$$
(15)

где  $d_{3\kappa B i} = 2(R_{BHem i} - R_{BHyT i})$ , где  $R_{BHem i}$  — внешний радиус *i*-го кольцевого канала, м;  $R_{BHyT i}$  — внутренний радиус *i*-го кольцевого канала, м.

Перепад температуры между температурой поверхности внутренней оболочки ВК с радиусом  $R_{1 \text{ внут}}$  и температурой воды в канале № 17 определится по

$$\Delta T_{1-17} = (q_{\rm v \, cr \, 1} R_{1 \, \rm BHyT})/(2 \, \alpha_{17}) [(R_{1 \, \rm BHem}/R_{1 \, \rm BHyT})^2 - 1]. \tag{16}$$

Перепад температуры между температурой поверхности слоя стали № 2 и температурой воды в слое № 18 определится по формуле для плоской стенки

$$\Delta T_{2-18} = q_{\rm v \, cr \, 18} \partial / \alpha_{18}. \tag{17}$$

Максимальная температура внутренней оболочки ВК ожидается на её поверхности, обращённой к ПС, и определится как

$$T_{\rm ct \ 1 \ make} = T_{\rm bx} + \Delta T_{\rm nog \ 17} + \Delta T_{\rm 1-17} + \Delta T_{\rm ct \ 1}, \,^{\circ}{\rm C}.$$
(18)

Максимальная температура ЦСС, кроме внутренней оболочки, ожидается на центральном радиусе цилиндрического слоя № 2 и определится как

$$T_{\rm ct\,2\,Makc} = T_{\rm bx} + \Delta T_{\rm nog\,18} + \Delta T_{2-18} + \Delta T_{\rm ct\,2}, \,^{\rm o}{\rm C}.$$
(19)

Температура воды в каналах № 19—31 и металла с слоях № 3—16 будет близка к *Т*<sub>вх</sub> из-за малой величины плотности тепловыделения в материалах.

Гидравлические потери при течении воды в канале кольцевого поперечного сечения  $\Delta P_i$  определяются по [5, с. 77]. При  $P_{\text{вх}} = 1$  МПа считаем допустимыми гидравлические потери  $\Delta P_{\text{доп}} = 0, 1P_{\text{вх}} = 100$  кПа.

Исходные данные:  $T_{\text{вх}} = 70$  °C,  $P_{\text{вх}} = 1$  МПа,  $T_{\text{вых}} = 80$  °C. Малая величина среднего подогрева воды (в каждом водяном канале подогрев воды может быть различным)  $\Delta T_{\text{под}}$  обусловлена тем, что при более значительном подогреве расход охлаждающей воды будет настолько малым, что её режим течения будет не турбулентным, а переходным или даже ламинарным. Соответственно коэффициент теплоотдачи от ЦСС к воде будет малым, что приведёт к неприемлемо высокой температуре металлоконструкций ВК.

Расход воды на охлаждение внутреннего обхода определяется по (9) и составляет  $G_{\text{внут}} = 257,8 \text{ кг/с}$ . Перепад температур во внутренней оболочке ВК  $\Delta T_{\text{ст 1}} = 121,8 \text{ °C}$ . Перепад температур  $\Delta T_{\text{ст 2}} = 5,3 \text{ °C}$  (при течении воды в каналах № 17 и 18 снизу вверх). При принятой схеме охлаждения возможны различные варианты течения воды во внутрикорпусном объёме ВК.

Вариант № 1 — проектная схема течения воды (см. рис. 4). Расход воды в каждом канале пропорционален площади его поперечного сечения, гидравлические потери во всех каналах приблизительно одинаковы. Результаты расчётов приведены в табл. 3, вариант № 1.

Анализ варианта № 1. Результаты расчётов показывают, что при проектной схеме течения воды максимальная температура поверхности ВК, обращённой к ПС, может достигать  $T_{ct \ 1 \ Makc} = 340 \ ^{\circ}$ С. Такая температура представляется приемлемой, так как не превышает допустимую температуру стали 450 °С.

При использовании в конструкции ПС жидкого лития желательно иметь температуру поверхности ВК не менее 200 °C, чтобы избежать конденсации паров лития. Гидравлические потери в каналах значительно меньше допустимых.

Параметр	Вариант, №				
	1	2	3	4	5
<i>G</i> <sub>17</sub> , кг/с	32,8	160,6	51,8	257,8	129,4
$G_{18}$ , кг/с	18,7	39,6	17,5	21,9*	43,7
$Q_{17}$ , MBt	6,73	6,73	6,4	6,4	16
$Q_{18}$ , MBt	1,66	1,66	1,5	1,5	3,75
<i>w</i> <sub>17</sub> , м/с	0,11	0,53	0,11	0,54	0,27
<i>w</i> <sub>18</sub> , м/с	0,11	0,23	0,11	0,14	0,27
α <sub>17</sub> , Bt/(m <sup>2.o</sup> C)	720	2440	630	2210	1290
α <sub>18</sub> , Bt/(m <sup>2</sup> .°C)	770	1390	780	930	1610
$\Delta T_{\text{под 17}}, ^{\circ}\text{C}$	49	10	29	6	29
$\Delta T_{\text{под 18}}, ^{\circ}\text{C}$	21	10	20	16	20
$\Delta T_{1-17}$ , °C	99	30	115	33	56
$\Delta T_{2-18}$ , °C	17	9	16	14	8
$T_{\rm ct\ 1\ make}, {}^{\rm o}{\rm C}$	340	232	336	231	277
$T_{\rm ct\ 2\ make}, {}^{\rm o}{\rm C}$	113	94	111	**	103
$\Delta P_{17}$ , кПа	0,04	1	0,04	1	0,62
<u>Δ</u> <i>P</i> <sub>18</sub> , кПа	0,04	0,2	0,04	0,07	0,62

Таблица 3. Теплогидравлические параметры внутрикорпусного объёма ВК

\* Течение сверху вниз.

\*\* В связи со сложным характером теплообмена  $T_{\text{ст 2 макс}}$  не определяется аналитически, но эта температура будет близка к  $T_{18 \text{ вых}}$ , т.е. не превысит допустимую.

Подогрев воды в канале № 17 составит  $\Delta T_{\text{под 17}} \sim 49$  °C, подогрев воды в остальных каналах значительно меньше. При выходе воды из каналов в области её отвода из ВК будет иметь место смешивание потоков воды с различной температурой, что является недостатком конструкции. Для устранения этого недостатка предлагается схема течения воды с одинаковым подогревом воды в каналах.

Вариант № 2 — схема течения с одинаковым подогревом воды в каналах. Схема течения потоков воды такая же, как в варианте № 1. Подогрев воды в каждом канале  $\Delta T_{\text{под }i} = 10$  °C. Расход воды  $G_i$  в каждом *i*-ом канале определится как

$$G_i = G_{\rm BHyT} Q_i / Q_{\rm BHyT}, \, \kappa \Gamma / c \tag{20}$$

и будет пропорционален тепловой мощности канала. Результаты расчётов приведены в табл. 3, вариант № 2.

Анализ варианта № 2. Результаты расчётов показывают, что при этой схеме течения воды температура металлоконструкций будет меньше, чем в варианте № 1. Гидравлические потери вырастут, но останутся значительно меньше допустимых.

Недостатком данной конструкции является значительная разница гидравлических потерь в каналах, что может вызвать перераспределение расхода воды между каналами и нарушить принятую схему охлаждения. Для предотвращения этого можно использовать профилирование расхода в каналах, что позволит выровнять гидравлические потери в них.

Одним из возможных способов обеспечить равенство гидравлических потерь и подогрева воды в каналах представляется изменение расстояния между ЦСС.

Вариант № 3 — конструкция с увеличенным расстоянием между слоями стали № 1 и 2. Схема течения потоков воды такая же, как в варианте № 1. Толщина слоя воды № 17 между слоями стали № 1 и 2 увеличена до 0,038 м, а толщина остальных водяных слоёв уменьшена до 0,013 м. Таким образом, толщина ВК на внутреннем обходе не изменилась.

В этом варианте изменятся плотности внутреннего тепловыделения в слоях стали и воды и соответственно тепловая мощность каналов:  $S_{17 \text{ воды}} = 0,494 \text{ м}^2$  и  $S_{18 \text{ воды}} = 0,167 \text{ м}^2$ .

Результаты расчётов приведены в табл. 3, вариант № 3.

Анализ варианта № 3. Результаты расчётов показывают, что при этой схеме течения воды температура металлоконструкций и гидравлические потери будут допустимыми. При этом разница температур воды на выходе из каналов № 17 и 18 значительно уменьшится. Представляется возможным подобрать такие расстояния между слоями металла № 1—16, чтобы температура воды на выходе из каналов и гидравлические потери в них были одинаковыми. При этом должно выполняться условие J = 0,7.

Вариант № 4 — конструкция с переменным расстоянием между слоями стали и возвратнопоступательным течением воды. Результаты расчётов вариантов № 1—3 показывают, что гидравлические потери при принятой схеме течения воды через ЖВЗ сравнительно малы. Поэтому представляется возможным изменить схему течения воды (рис. 7). При расстоянии между ЦСС № 1 и 2 как в варианте № 3 тепловая мощность канала № 17 близка к тепловой мощности остальных каналов. В рассматриваемом варианте внутренний поток воды поступает сначала в канал № 17 и проходит снизу вверх участки подогрева А, В и С. Далее в области верхнего дивертора происходит разворот потока (там установлена перегородка) и он распределяется между остальными каналами. Поток сверху вниз последовательно проходит участки подогрева С, В и А.

В этом варианте подводящий и отводящий коллекторы воды расположены в области нижнего дивертора. Результаты расчётов приведены в табл. 3, вариант № 4. Температура воды на выходе из канала № 18 определится как

$$T_{18 \text{ вых}} = T_{\text{вх}} + \Delta T_{\text{под } 17} + \Delta T_{\text{под } 18} = 92 \text{ °C.}$$
(21)

Максимальные гидравлические потери при течении воды через ВК

$$\Delta P_{\text{make}} = \Delta P_{17} + \Delta P_{18} = 1,1 \text{ k}\Pi a.$$
(22)

Анализ варианта № 4. Результаты расчётов показывают, что при этой схеме течения воды температура металлоконструкций и гидравлические потери будут допустимыми. При этом максимальная температура поверхности ВК, обращённой к ПС, существенно ниже, чем в вариантах № 1 и 3. Представляется возможным подобрать такие расстояния между слоями металла № 3—16, чтобы температура воды на выходе из каналов и гидравлические потери в них были одинаковыми. При этом должно выполняться условие J = 0,7.

Вариант № 5 — конструкция с переменным расстоянием между слоями стали и циркуляционным течением воды. Схема течения воды представлена на рис. 8. В этом варианте поток воды является одновременно внешним и внутренним, сначала он движется, как в варианте № 3, а затем поступает в участок D. Вода проходит последовательно участки подогрева A, B, C и D. Расход воды определяется по (9) при подстановке  $Q_{полн}$ .

В этом варианте подводящий и отводящий коллекторы воды расположены в области нижнего дивертора. Результаты расчётов приведены в табл. 3, вариант № 5.



Рис. 7. Схема течения воды во внутрикорпусном объёме конструкции ВК с переменным расстоянием между слоями стали и возвратно-поступательным течением воды: *1* — участок подогрева А; *2* — участок подогрева В; *3* — участок подогрева С; *4* — вход воды; *5* — выход воды; *6* — участок подогрева D; *7* — перегородка



Рис. 8. Схема течения воды во внутрикорпусном объёме конструкции ВК с переменным расстоянием между слоями стали и циркуляционным течением воды: *1* — участок подогрева А; *2* — участок подогрева В; *3* — участок подогрева С; *4* — вход воды; *5* — выход воды; *6* — участок подогрева D

Анализ варианта № 5. Результаты расчётов показывают, что при этой схеме течения воды температура металлоконструкций и гидравлические потери, которые будут максимальными из всех вариантов, но не превысят 1 кПа, т.е. будут допустимыми. При этом максимальная температура поверхности ВК, обращённой к ПС, будет выше, чем в варианте № 4, но существенно ниже, чем в вариантах № 1 и 3. Представляется возможным подобрать такие расстояния между слоями металла № 3—16, чтобы температура воды на выходе из каналов и гидравлические потери в них были одинаковыми. При этом должно выполняться условие J = 0,7.

Аварийные ситуации в ВК. Особенностью ВК является невозможность её замены или крупного ремонта без длительного простоя всей установки ДЕМО-ТИН, что предъявляет повышенные требования к её надёжности и безопасности. Аварии с потерей охлаждения ВК частично разобраны в [2].

При анализе аварийных ситуаций во внутрикорпусном объёме ВК представляют значительный интерес процессы в ЖВЗ, вызванные нарушением режима охлаждения ЦСС. Это, в свою очередь, может быть вызвано их смещением от своего проектного положения.

Вопрос о возможности или невозможности смещения ЦСС может быть решён после уточнения конструкции их креплений и дистанционирующих элементов. Но при любой конструкции креплений будет наблюдаться деградация свойств стали под действием облучения и термоциклирования. Причиной нарушения режима охлаждения ЦСС может быть попадание постороннего предмета (например, фрагмента разрушившейся металлоконструкции) в канал охлаждения.

Одним из возможных способов, позволяющих предотвратить подобную ситуацию, является изменение конструкции ВК.

## МОДИФИЦИРОВАННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

**ВК со сферической засыпкой.** Внутрикорпусной объём заполнен стальными сферическими элементами (СЭЛами) диаметром *d* порядка нескольких см. Охлаждение этой сферической засыпки (шарового слоя) производится прокачкой через него воды, методика теплогидравлического расчёта приведена в [6]. Пористость засыпки *m* определяется отношением объёма воды в слое ко всему его объёму.

Площадь сечения горизонтальной плоскостью одной секции центральной части ВК между внутренней и внешней оболочками  $F_{\text{секц}} = 0,35 \text{ м}^2$ . Эквивалентный диаметр секции  $D_{\text{секц экв}} = 0,67 \text{ м}$ . Характерным параметром шарового слоя является его относительный диаметр  $N = D_{\text{секц экв}}/d$ . При  $N \ge 3,5$  величина *m* зависит только от *N*, в нашем случае m = 0,4. Тогда J = 1 - m = 0,6. С учётом находящихся между оболочками рёбер жёсткости и самих оболочек значение *J* будет близко к требуемому значению J = 0,7. Результаты расчёта теплогидравлических параметров сферической засыпки для центральной части ВК при различных значениях *d* с исходными данными из варианта № 1 приведены в табл. 4.

Папаматт*	Диаметр СЭЛ d, м				
Параметр*		0,05	0,1		
Гидравлические потери при прокачке воды, кПа	8	3	1,5		
Коэффициент теплоотдачи от СЭЛ к воде, Вт/(м <sup>2.</sup> °С)	4250	3540	4190		
Температура поверхности СЭЛ, °С	120	123	126		
Температура в центре СЭЛ, °С	122	134	168		
$T_{\rm ct\ 1\ make},  {}^{\circ}\!{\rm C}$	258	262	259		
*Температура определена при максимальном значении $q_{\rm VCT Marc} = 1.8  {\rm MBr/m^3}$ и $T_{\rm phy} = 119  {\rm ^oC}$ .					

Таблица4. Теплогидравлические параметры сферической засыпки в центральной части ВК

Данные табл. 4 показывают, что использование сферической засыпки во внутрикорпусном объёме ВК допустимо. В такой конструкции практически невозможна аварийная ситуация со смещением СЭЛа со своего проектного положения, как невозможна и потеря охлаждения любого СЭЛа, так как они омываются водой со всех сторон. Растрескивание любого СЭЛа не приведёт к потере охлаждения остальных.

При сравнительно небольших гидравлических потерях при прокачке возможна как проектная схема течения воды, так и возвратно-поступательная и циркуляционная.

«Сотовая» конструкция ВК. Стальные пластины во внутрикорпусном объёме соединены таким образом, что образуют шестигранные каналы для течения воды. Схема горизонтального сечения одной секции ВК между внутренней и внешней оболочками показана на рис. 9. Подбирая соответствующую толщину стальных пластин, можно получить требуемое отношение J = 0,7. Толщина пластин может быть переменной, увеличивающейся по мере удаления от внутренней оболочки ВК.

Потеря течения в одном из каналов не приведёт к аварийной ситуации, так как пластины будут охлаждаться водой соседних каналов.

Стальные слои с оребрением или выступами. В этом варианте ЦСС во внутрикорпусном объёме выполнены оребрёнными (схема представлена на рис. 10). Другой вариант — ЦСС имеют выступы, как это рекомендовано в [7] (рис. 11). В случае смещения ЦСС невозможно их «слипание», так как рёбра (выступы) препятствуют взаимному сближению слоёв. При любом взаимном расположении ЦСС исключена ситуация, когда какая-нибудь сторона стального слоя не охлаждается водой. Кроме того, рёбра (выступы) могут служить турбулизаторами потока, что будет способствовать улучшению теплообмена между ЦСС и водой и снижению температуры металлоконструкций.



Рис. 9. Схема горизонтального сечения одной секции ВК при «сотовом» расположении стальных пластин: 1 — стальные пластины; 2 — канал с водой; 3 — внутренняя оболочка ВК; 4 — внешняя оболочка ВК





Рис. 11. Схема конструкции стального слоя с выступами

### выводы

ВК проектной конструкции может быть реализована, но использование во внутрикорпусном объёме ЦСС одинаковой толщины с равным расстоянием между ними нерационально. При этом возникает значительная разница температуры воды на выходе из каналов и значительная разница гидравлических потерь при течении воды в каналах.

Для улучшения теплогидравлических характеристик внутрикорпусного объёма ВК желательно изменить как толщину ЦСС, так и расстояние между ними. Это позволит обеспечить как одинаковый подогрев воды в каналах, так и одинаковые гидравлические потери в них.

Кроме проектной схемы течения воды в ВК (с её входом в области нижнего и верхнего диверторов), возможна организация возвратно-поступательного и циркуляционного течения воды со входом и выходом в области либо нижнего, либо верхнего дивертора. Это позволит иметь минимальную длину коллекторов теплоносителя, которые должны быть теплоизолированы, в пределах криостата.

Одним из возможных путей предотвращения аварии с нарушением режима охлаждения ЦСС является изменение конструкции ВК. Вместо стальных ЦСС внутрикорпусной объём заполняется стальными сферическими элементами (СЭЛами), через массив которых прокачивается вода.

Возможно взаимное расположение стальных пластин в виде шестигранников, через внутреннюю часть которых прокачивается вода.

Возможно иное расположение пластин и изменение их конструкции (пластины с рёбрами, выступами). Изменение конструкции ВК позволит исключить аварии с нарушением режима охлаждения пластин и образование неохлаждаемых участков ЖВЗ.

Сравнительно небольшие гидравлические потери при прокачке воды через ЖВЗ позволяют изменить схему течения воды и образовать её возвратно-поступательное или циркуляционное течение. Увеличение расхода воды путём уменьшения её подогрева позволит увеличить коэффициент теплоотдачи к воде от стальных пластин и снизить их температуру при приемлемых гидравлических потерях. Подобным образом можно регулировать температуру поверхности внутренней оболочки ВК, обращённой к ПС.

#### 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, p. 5 (in Russian).
- 2. **Pashkov A.Yu.** 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. In the same place, 2017, vol. 40, issue 3, p. 78 (in Russian).
- 3. **Pashkov A.Yu. et al.** Thermal-hydraulic calculations and reliability evaluation for water cooling system of DEMO-FNS first wall and divertor. — In the same place, 2018, vol. 41, issue 3, p. 36 (in Russian).
- 4. Isachenko V.P. et al. Heat transfer M.: Energiya (Energy), 1975 (in Russian).
- 5. Idel'chik I.E. Reference book on hydraulic resistances. M.: Mashinostroenie (Machine-building), 1975 (in Russian).
- Pashkov A.Yu. Concept of blanket with continuous replacement of solid fertile material. VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2016, vol. 39, issue 2, p. 96 (in Russian).
- 7. Kuteev B.V. et al. Panel structure of thermal shield with anti-accident device for DEMO-FNS superconducting magnets. In the same place, 2018, vol. 41, issue 1, p. 29 (in Russian).

### AUTHORS

**Pashkoff A.Yu.** NRC "Kurchatov Institute", pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; A\_Yu\_Pashkoff@mail.ru

Shpanskiy Yu.S. NRC "Kurchatov Institute", pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Shpanskiy\_YS@nrcki.ru

Petrov V.S. NRC "Kurchatov Institute", pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Petrov\_VS@nrcki.ru

Received 28 August 2018 Revised 10 June 2019 Accepted 25 June 2019 Problems of Atomic Science and Technology Ser. Thermonuclear Fusion, 2019, vol. 42, issue 3, pp. 25—36