

УДК 621.039.634

КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ТЯР ИЛИ ТИН

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

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Предложены несколько модификаций вакуумной камеры (ВК) проектируемой установки ДЕМО-ТИН, позволяющих повысить её надёжность и безопасность. Применение «двойной» внутренней оболочки позволяет снизить как её температуру, так и термические напряжения в ней, изменение конструктивной схемы внешней оболочки уменьшает тепловую нагрузку на криогенную тепловую защиту. Изменение схемы течения теплоносителя во внутрикорпусном объёме ВК обеспечивает надёжное охлаждение всех металлоконструкций в нём. Предлагаемые модификации могут быть использованы в других проектах ТЯР.

Ключевые слова: ДЕМО-ТИН, вакуумная камера, модификация конструкции, тепловые расчёты.

CONSTRUCTIVE OUTLINE OF THE VACUUM CHAMBER OF A FUSION REACTOR OR A FUSION NEUTRON SOURCE

B.V. Kuteev, A.Yu. Pashkoff, E.A. Filimonova, Yu.S. Shpanskiy

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The paper contains several modifications of vacuum chamber designed fusion neutron source (DEMO-FNS), which will improve its reliability and safety. Employment of «double» internal shell will make it possible decrease its temperature and thermal stresses in its. Modifying the design of outer shell make it possible decrease thermal load on cryogenic thermal shield. Change of water flow outline inside vacuum chamber body secure reliable cooling iron-water shielding in it. Method of thermal calculations is described. Proposed modifications will be used in another fusion designs.

Key words: DEMO-FNS, vacuum chamber, design modification, thermal calculation.

DOI: 10.21517/0202-3822-2021-44-1-27-44

ВВЕДЕНИЕ

Вакуумная камера (ВК) — одна из основных систем термоядерных установок типа токамак, в частности установки ДЕМО-ТИН, схема взаимного расположения элементов которой показана на рис. 1. На рис. 2 показан вертикальный разрез одной из возможных конструктивных схем ВК, далее называемой проектной, предложенной в [1]. ВК выполняет следующие основные функции:

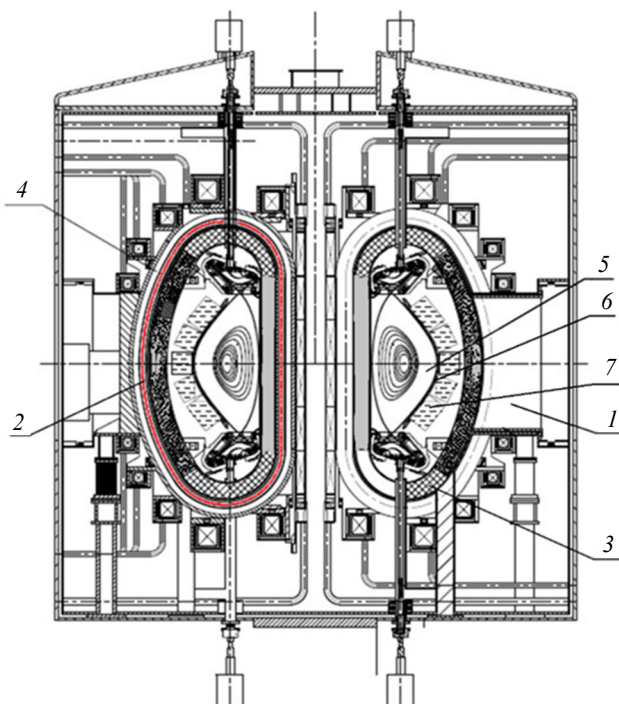


Рис. 1. Взаимное расположение элементов установки ДЕМО-ТИН: 1 — корпус экваториального патрубка; 2 — криогенная тепловая защита; 3 — вакуумная камера; 4 — катушка тороидального поля; 5 — плазма; 6 — первая стенка; 7 — модуль blankets

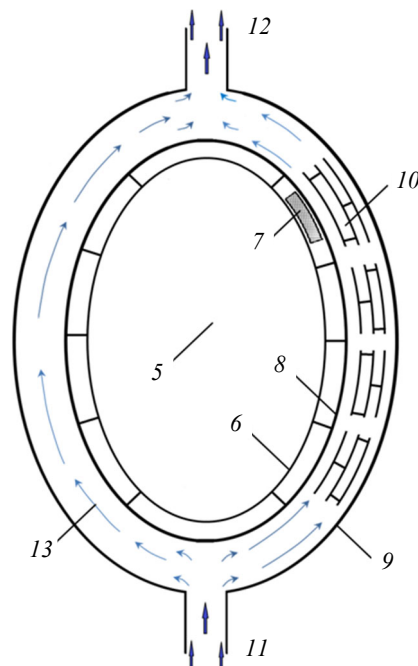


Рис. 2. Вертикальный разрез проектной конструктивной схемы вакуумной камеры: 5 — плазма; 6 — первая стенка; 7 — модуль blankets; 8 — внутренняя оболочка вакуумной камеры; 9 — наружная оболочка вакуумной камеры; 10 — металлоконструкция железобетонной защиты; 11 — входной трубопровод воды системы охлаждения (СО) 1; 12 — выходной трубопровод воды СО-1; 13 — вода СО-1 (стрелками показано направление течения)

- 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.

Основные конструкционные материалы ВК — сталь и вода. Под воздействием нейтронного и гамма-излучения из плазмы в конструкционных материалах будет значительное внутреннее тепловыделение (в областях, близких к плазме, плотность тепловыделения более 1 МВт/м^3), поэтому в ВК необходимо иметь систему охлаждения (СО). Одними из основных задач при проектировании ВК являются определение температурного режима её элементов и теплогидравлических характеристик СО и совершенствование конструкции на основе полученных результатов.

ПРОЕКТНАЯ СХЕМА ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ И СИСТЕМЫ ЕЁ ОХЛАЖДЕНИЯ

Корпус ВК (её схема в вертикальном разрезе показана на рис. 2) — стальная тороидальная конструкция D-образной формы в вертикальном сечении, состоит из двух коаксиальных оболочек — внутренней (ВО), обращённой к плазме, и наружной (НО).

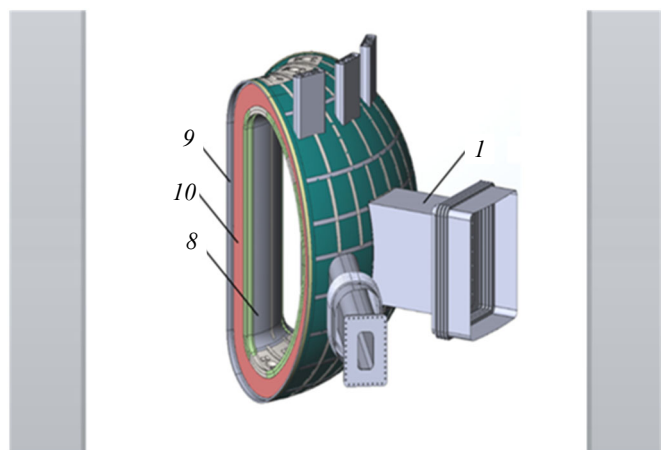


Рис. 3. Общий вид сегмента вакуумной камеры: 1 — корпус экваториального патрубка; 8 — внутренняя оболочка вакуумной камеры; 9 — наружная оболочка вакуумной камеры; 10 — железобетонная защита

Пространство между оболочками образует внутрикорпусной объём. Толщина каждой оболочки $\delta_{об} = 0,04 \text{ м}$. Корпус состоит из шести сегментов, а каждый сегмент из трёх секций. В каждом сегменте имеются патрубки (экваториальные, вертикальные и системы нейтральной инжекции), проходящие через всю толщину ВК. Общий вид одного сегмента показан на рис. 3. Условно ВК можно считать состоящей из двух частей — внутренней, включающей центральную часть цилиндрической формы, расположенную в области центрального солениоида, и внешней с патрубками.

Оболочки связаны между собой системой тороидальных и полоидальных рёбер жёсткости, к которым крепятся металлические пластины. В совокупности рёбра и пластины образуют металлоконструкции, которые заполняют часть внутрикорпусного объёма, а остальной внутрикорпусной объём заполнен циркулирующей водой (теплоносителем) СО.

В центральной цилиндрической части ВК металлические пластины, как и каналы для воды, имеют форму цилиндрических слоёв. Вода в каждую секцию ВК подаётся снизу через входной трубопровод, далее разделяется на два потока, один из которых охлаждает центральную цилиндрическую часть, а второй — внешнюю часть. В верхней части ВК потоки сливаются и отводятся через выходной трубопровод. На рисунках направление течения воды показано стрелками.

В совокупности корпус ВК, внутрикорпусные металлоконструкции и вода СО образуют железобетонную радиационную защиту (ЖВЗ) с соотношением по объёму 70% стали, 30% воды. Отношение объёма стали к полному объёму железобетонной защиты обозначим J . По результатам работ, выполненных в рамках как проекта ИТЭР, так и проекта ДЕМО-ТИН, значение J , обеспечивающее оптимальные защитные свойства ЖВЗ, лежит в диапазоне 0,6—0,8. В дальнейшем принимаем $J = 0,7$.

ВО ограничивает внутренний объём ВК, в котором находятся первая стенка, бланкет и разрядная камера, в плазме которой протекает термоядерная реакция. Один из последних вариантов конструктивной схемы ВК и функции её элементов описаны в [2]. Расчёты температурного режима производились для центральной цилиндрической части, так как она имеет простую геометрическую форму и допускает аналитическое решение уравнений.

Для упрощения конструктивной схемы охлаждающая вода в СО имеет невысокие параметры (температура на входе в СО $T_{\text{вх}} \sim 70^\circ\text{C}$ и давление $P_{\text{вх}} \sim 1$ МПа, на выходе $T_{\text{вых}} \sim 100^\circ\text{C}$). Одним из недостатков проектной конструктивной схемы представляется то, что охлаждение ВО с максимальным внутренним тепловыделением производится потоком воды, текущем во внутрикорпусном объёме, и, таким образом, ВО охлаждается только с одной стороны.

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ВНУТРЕННЕЙ ОБОЛОЧКИ ПРОЕКТНОЙ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ВК

Принятые допущения и методика расчёта.

Горизонтальное сечение одной секции центральной цилиндрической части проектной конструктивной схемы ВК, для которого делается оценка температуры ВО, показано на рис. 4. Оценку температуры ВО делаем для места, где температура теплоносителя близка к $T_{\text{вых}}$ — в этом месте температура ВО будет максимальной. Температуру поверхности цилиндрической части ВО с внутренним радиусом $R_1 = 2,09$ м обозначим T_1 , а температуру поверхности ВО, ближайшей к плазме, с внешним радиусом $R_2 = 2,13$ м обозначим T_2 . $\delta_{\text{об}} = R_2 - R_1 = 0,04$ м. Разница температур $\Delta T_{2-1} = T_2 - T_1$ определится по уравнению для цилиндрической стенки

$$\Delta T_{2-1} = q_{\text{в ст}}(R_2)^2 / (4\lambda_{\text{ст}})[2\ln(R_2/R_1) + (R_1/R_2)^2 - 1], \quad (1)$$

где $q_{\text{в ст}}$ — плотность внутреннего объёмного тепловыделения в стали, Вт/м³; $\lambda_{\text{ст}}$ — коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м·°C). По [2] среднее значение для ВО $q_{\text{в ст}} = 1,8$ МВт/м³. В действительности $q_{\text{в ст}}$ максимальна на поверхности ВО, обращённой к плазме, и уменьшается по мере удаления от этой поверхности. Возможно, что в некоторых частях ВО плотность внутреннего объёмного тепловыделения в стали будет выше средней. Причиной этого могут быть процессы в плазме, накопление продуктов активации, влияние делящегося бланкета (если он будет установлен). Поэтому рассмотрим также варианты, в которых $q_{\text{в ст}} = 2,5$ МВт/м³.

В качестве материала ВК предполагается использовать сталь, близкую по характеристикам к стали марки 316LN-IG, использованной в проекте ИТЭР. Максимально допустимая температура стали не более 450°C . При ожидаемой температуре ВО $200\text{—}300^\circ\text{C}$ $\lambda_{\text{ст}} = 17\text{—}19$ Вт/(м·°C). Разница между T_1 и температурой воды, омывающей ВО, $T_{\text{вых}}$ определится по

$$T_1 - T_{\text{вых}} = \Delta T_{1-\text{вода}} = (q_{\text{в ст}}R_1) / (2\alpha_1)[(R_2/R_1)^2 - 1], \quad (2)$$

где α_1 — коэффициент теплоотдачи от поверхности ВО, обращённой к ЖВЗ, к омывающей её воде, Вт/(м²·°C). Выполненные оценки [2] дают значение $\alpha_1 = 2000\text{—}4000$ Вт/(м²·°C) при скорости течения воды во внутрикорпусном объёме ВК $\sim 0,7\text{—}1,5$ м/с. Максимальная температура поверхности ВО, обращённой к плазме, $T_{2\text{ макс}}$ определится как

$$T_{2\text{ макс}} = T_{\text{вых}} + \Delta T_{2-1} + \Delta T_{1-\text{вода}}, \quad (3)$$

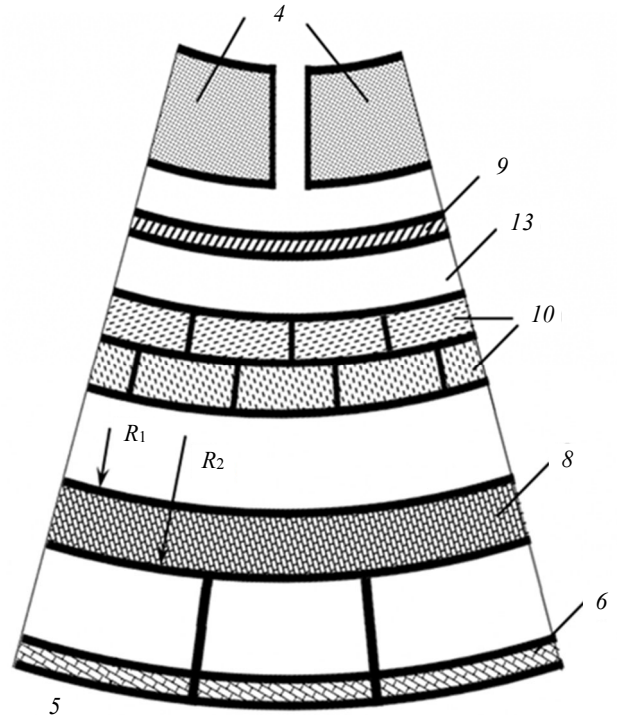


Рис. 4. Горизонтальное сечение секции центральной цилиндрической части проектной конструктивной схемы вакуумной камеры: 5 — плазма; 6 — первая стенка; 8 — внутренняя оболочка вакуумной камеры; 9 — наружная оболочка вакуумной камеры; 10 — металлоконструкции железобетонной защиты; 13 — вода СО-1

В условиях неопределённости исходных данных для оценки температурного режима ВО используем сочетания исходных параметров, приведённые в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Варианты сочетания исходных параметров для оценки температурного режима внутренней оболочки ВК проектной конструктивной схемы

Номер варианта	Параметр		
	$q_{\text{в ст}}, \text{МВт/м}^3$	$\lambda_{\text{ст}}, \text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$	$\alpha_1, \text{Вт/(м}^2\text{}^\circ\text{C)}$
1	1,8	17	2000
2	1,8	17	4000
3	1,8	19	2000
4	1,8	19	4000
5	2,5	17	2000
6	2,5	17	4000
7	2,5	19	2000
8	2,5	19	4000

Результаты расчётов при различных исходных параметрах приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Оценка температурного режима внутренней оболочки ВК проектной конструктивной схемы

Номер варианта	Параметр		
	$\Delta T_{2-1}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{1-\text{вода}}, ^\circ\text{C}$	$T_{2 \text{ макс}}, ^\circ\text{C}$
1	86,5	36,3	222,8
2	86,5	18,2	204,7
3	77,4	36,3	213,7
4	77,4	18,2	195,6
5	120	36,3	256,3
6	120	18,2	238,2
7	107,5	36,3	243,8
8	107,5	18,2	225,7

Результаты расчётов показывают, что максимальная температура поверхности ВО, ближайшей к плазме, составляет $T_{2 \text{ макс}} = 196\text{—}256\text{ }^\circ\text{C}$, т.е. не превышает допустимую температуру стали $450\text{ }^\circ\text{C}$. Перепад температур в самой ВО составляет $\Delta T_{2-1} = 77\text{—}120\text{ }^\circ\text{C}$, что представляется неприемлемым из-за возникающих температурных напряжений.

МОДИФИЦИРОВАННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ВНУТРЕННЕЙ ОБОЛОЧКИ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ И СИСТЕМЫ ЕЁ ОХЛАЖДЕНИЯ

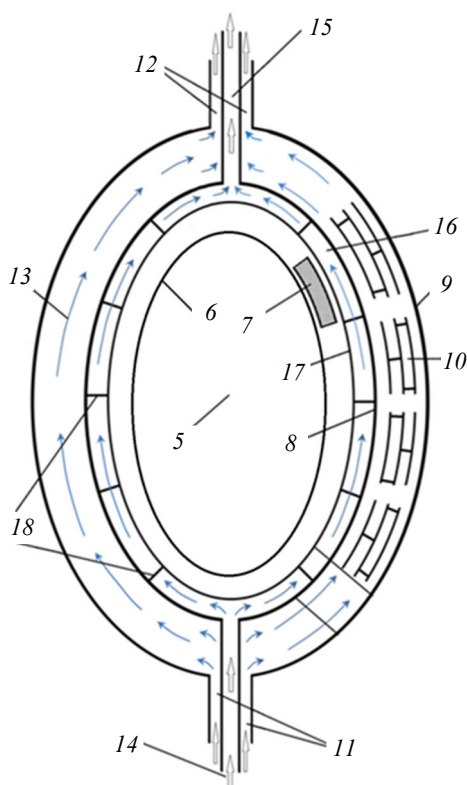


Рис. 5. Вертикальный разрез вакуумной камеры с двойной внутренней оболочкой: 5 — плазма; 6 — первая стенка; 7 — модуль blankets; 8 — внутренняя оболочка вакуумной камеры; 9 — наружная оболочка вакуумной камеры; 10 — металлоконструкция железобетонной защиты; 11 — входной трубопровод воды СО-1; 12 — выходной трубопровод воды СО-1; 13 — вода СО-1 (стрелками показано направление течения); 14 — входной трубопровод воды СО-2; 15 — выходной трубопровод воды СО-2; 16 — вода СО-2 (стрелками показано направление течения); 17 — внутренний кожух; 18 — крепления внутреннего кожуха

Для снижения перепада температур в ВО предлагается следующая модификация её конструкции. ВО выполнена двойной и состоит из внутренней прочной оболочки (ВПО) и установленного на ней внутреннего кожуха, связанных креплениями. Вертикальный разрез ВК с двойной внутренней оболочкой показан на рис. 5. Система охлаждения также выполнена двойной и состоит из двух независимых систем: СО-1 (как в проектной конструкции ВК) для охлаждения внутрикорпусного объёма ВК и СО-2, теплоноситель которой прокачивается между ВПО и внутренним кожухом. В случае аварии с отказом СО-1 охлаждение ВК будет производиться СО-2.

Особенностью конструкции двойной оболочки является то, что крепления внутреннего кожуха выполнены следую-

щим образом: расположенные в разрядной камере компоненты, обращённые к плазме, установлены на них, а не на внутреннем кожухе, и в случае воздействия на эти элементы механических нагрузок они через крепления передаются на ВПО. Таким образом, внутренний кожух не является несущей конструкцией и может быть выполнен сравнительно тонким, что позволит поддерживать его допустимую температуру.

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ВНУТРЕННЕЙ ОБОЛОЧКИ ВК

Принятые допущения и методика расчёта. Горизонтальное сечение одной секции центральной цилиндрической части ВК с двойной ВО показано на рис. 6. Оценку температуры ВПО и внутреннего кожуха делаем для места, где температура теплоносителя близка к $T_{\text{вых}}$, — в этом месте температуры ВПО и внутреннего кожуха будут максимальными. Температуру поверхности ВПО, обращённой к ЖВЗ, с радиусом $R_1 = 2,09$ м обозначим T_1 , температуру поверхности ВПО, обращённой к внутреннему кожуху, с радиусом $R_2 = 2,13$ м обозначим T_2 . Толщина ВПО $\partial_{\text{об}} = R_2 - R_1 = 0,04$ м.

В этой конструкции ВПО охлаждается с двух сторон СО-1 и СО-2. Расстояние между ВПО и внутренним кожухом L подбирается так, чтобы температура воды СО-2, текущей между ними, имела на выходе также температуру $T_{\text{вых}}$. Оценки дают $L \sim 0,04\text{—}0,05$ м. Внутренний кожух охлаждается только водой СО-2, текущей в объёме между ВПО и кожухом. Температуру поверхности внутреннего кожуха, обращённой к ВПО, с радиусом $R_3 = 2,18$ м обозначим T_3 , температуру поверхности внутреннего кожуха, обращённой к плазме, с радиусом $R_4 = 2,195$ м обозначим T_4 . Толщина внутреннего кожуха $\partial_{\text{кож}} = R_4 - R_3 = 0,015$ м. Коэффициент теплоотдачи к воде СО-2 от поверхности ВПО с R_2 обозначим α_2 , а от поверхности внутреннего кожуха с R_3 обозначим α_3 . В дальнейшем полагаем, что $\alpha_2 = \alpha_3$ и их значения находятся в том же диапазоне значений, что и α_1 , т.е. $2000\text{—}4000$ Вт/(м²·°С).

Разница температур $\Delta T_{4-3} = T_4 - T_3$ определяется по (1), разница температур $\Delta T_{3-\text{вода}}$ между T_3 и температурой воды, омывающей внутренний кожух, $T_{\text{вых}}$ определяется по (2). Максимальная температура поверхности внутреннего кожуха, обращённой к плазме, определится как

$$T_{4 \text{ макс}} = T_{\text{вых}} + \Delta T_{4-3} + \Delta T_{3-\text{вода}}, \text{ } ^\circ\text{С}. \quad (4)$$

Исходные параметры для оценки температурного режима внутреннего кожуха приведены в табл. 1. Результаты расчётов при различных исходных параметрах представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Оценка температурного режима внутреннего кожуха

Номер варианта	Параметр		
	$\Delta T_{4-3}, \text{ } ^\circ\text{С}$	$\Delta T_{3-\text{вода}}, \text{ } ^\circ\text{С}$	$T_{4 \text{ макс}}, \text{ } ^\circ\text{С}$
1	16,7	13,5	130,2
2	16,7	6,8	123,5
3	15	13,5	128,5
4	15	6,8	121,8
5	23,2	13,5	136,7
6	23,2	6,8	130
7	20,8	13,5	134,3
8	20,8	6,8	127,6

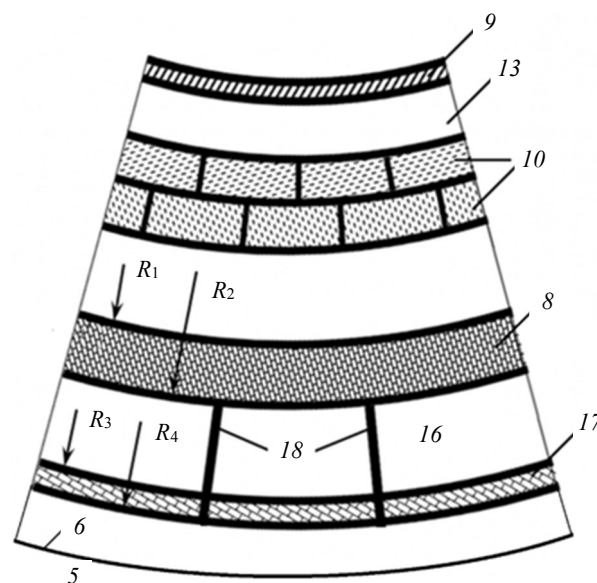


Рис. 6. Горизонтальное сечение одной секции центральной цилиндрической части вакуумной камеры с двойной внутренней оболочкой: 5 — плазма; 6 — первая стенка; 8 — внутренняя оболочка вакуумной камеры; 9 — наружная оболочка вакуумной камеры; 10 — металлоконструкции железобетонной защиты; 13 — вода СО-1; 16 — вода СО-2; 17 — внутренний кожух; 18 — крепления внутреннего кожуха

Выполненные оценки показывают, что максимальная температура поверхности внутреннего кожуха составит 122—134 °С, а разница температур его поверхностей 15—23 °С. Эти значения представляются допустимыми для конструкционного материала — стали, близкой по характеристикам к стали марки 316LN-IG. Расчёт температурного режима ВПО, охлаждаемой с двух сторон, ведётся по [3]. В этом случае максимальная температура металла $T_{\text{макс}}$ достигается внутри цилиндрической стенки, на поверхности с радиусом R_0 , причём $R_1 \leq R_0 \leq R_2$. Далее рассматриваем только одно значение коэффициента теплопроводности стали $\lambda_{\text{ст}} = 17 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$. Для оценки температурного режима ВПО в условиях её двустороннего охлаждения используем сочетания исходных параметров, приведённые в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Варианты сочетания исходных параметров для оценки температурного режима ВПО

Номер варианта	Параметр		
	$q_{\text{в ст}}, \text{ МВт/м}^3$	$\alpha_1, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}$	$\alpha_2, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}$
9	1,8	2000	2000
10	1,8	2000	4000
11	1,8	4000	4000
12	1,8	4000	2000
13	2,5	2000	2000
14	2,5	2000	4000
15	2,5	4000	4000
16	2,5	4000	2000

Результаты расчётов температурного режима ВПО при различных исходных параметрах приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5. Оценка температурного режима внутренней прочной оболочки

Номер варианта	Параметр			
	$R_0, \text{ м}$	$T_1, \text{ °С}$	$T_2, \text{ °С}$	$T_{\text{макс}}, \text{ °С}$
9	2,112	120	116	132
10	2,108	116,7	109,7	131,4
11	2,111	109	109	132,1
12	2,111	109,7	116,7	132,8
13	2,112	127,8	122,2	144,5
14	2,108	123,2	113,5	143,6
15	2,111	112,5	112,5	144,6
16	2,111	113,5	123,2	145,6

Выполненные оценки показывают, что максимальная температура металла ВПО составит 131—146 °С, а разница температур её поверхностей 0—10 °С. Эти значения представляются допустимыми для конструкционного материала — стали, близкой по характеристикам к стали марки 316LN-IG. Таким образом, предложенное изменение конструктивной схемы ВК решает следующие основные проблемы: сохраняя все функции известной проектной конструктивной схемы ВК, получаем температуру элементов и перепад температур в этих элементах ВО (внутреннего кожуха и ВПО) значительно меньше допустимых. Как представляется, конструктивная схема ВК с двойной внутренней оболочкой обладает следующими преимуществами:

- обеспечивается допустимая температура металлоконструкций всех элементов ВО;
- обеспечивается допустимая разница температур поверхностей элементов ВК;
- внутренний кожух будет дополнительным барьером безопасности;
- если СО-1 и СО-2 будут независимыми, то в случае отказа СО-1 возможно аварийное охлаждение ВК водой СО-2.

МОДИФИЦИРОВАННАЯ КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА НАРУЖНОЙ ОБОЛОЧКИ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ И СИСТЕМЫ ЕЁ ОХЛАЖДЕНИЯ

Другим недостатком проектной конструктивной схемы ВК представляется то, что охлаждение НО производится потоком воды температурой 70—100 °С и температура НО будет не меньше. НО внешней поверхностью обращена к криогенной тепловой защите (КТЗ), защищающей сверхпроводниковые

катушки тороидального поля от теплового потока с ВК. Предлагаемая модификация конструктивной схемы позволяет снизить температуру НО, уменьшить плотность теплового потока на КТЗ.

На НО устанавливается с помощью креплений наружный кожух. Добавляется также независимая СО-3, теплоноситель которой прокачивается между НО и наружным кожухом. Этот теплоноситель имеет более низкую температуру, чем теплоноситель СО-1, что обеспечивает более низкую температуру наружного кожуха и снижение плотности теплового потока с него на КТЗ. Вертикальный разрез вакуумной камеры с двойной наружной оболочкой показан на рис. 7.

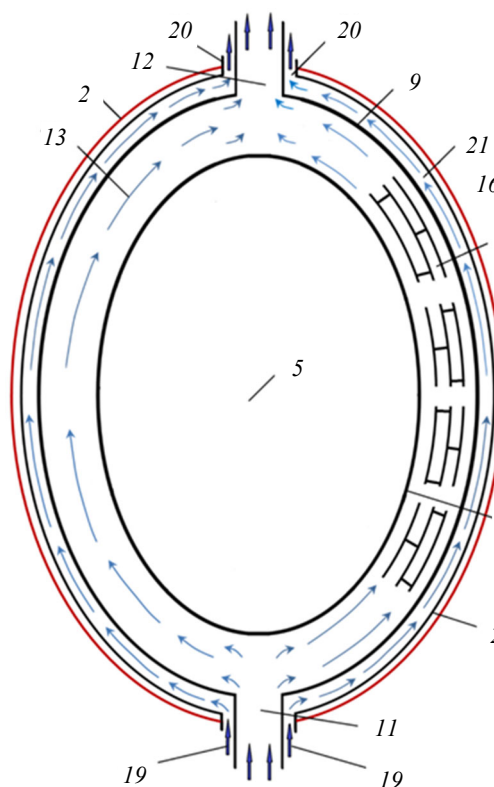


Рис. 7. Вертикальный разрез вакуумной камеры с двойной наружной оболочкой: 2 — криогенная тепловая защита; 5 — плазма; 8 — внутренняя оболочка вакуумной камеры; 9 — наружная оболочка вакуумной камеры; 10 — металлоконструкции железобетонной защиты; 11 — входной трубопровод воды СО-1; 12 — выходной трубопровод воды СО-1; 13 — вода СО-1 (стрелками показано направление течения); 19 — входной трубопровод воды СО-3; 20 — выходной трубопровод воды СО-3; 21 — вода СО-3 (стрелками показано направление течения); 22 — наружный кожух

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА МОДИФИЦИРОВАННОЙ НАРУЖНОЙ ОБОЛОЧКИ ВК

Принятые допущения и методика расчёта. Вертикальное сечение центральной цилиндрической части ВК с двойной НО показано на рис. 8. Оценку температуры НО и наружного кожуха делаем для места, где температура теплоносителя близка к $T_{\text{вых}}$, — в этом месте температуры НО и наружного кожуха будут максимальными. Теплоноситель СО-3 отводит тепловую энергию, выделяющуюся в нём, в наружном кожухе и частично в НО. Кроме того, предполагаем, что существует теплопередача через цилиндрическую стенку НО от воды СО-1 к воде СО-3, и это тепло также отводится СО-3. Вода СО-3 течёт в пространстве между НО и наружным кожухом. Это пространство в дальнейшем называем кольцевым каналом (КК). В СО-3 температура воды на входе $T_{\text{вх3}} \sim 20^\circ\text{C}$ и давление $P_{\text{вх3}}$ менее 1 МПа. Исходные данные для оценок взяты из [2]. Схема охлаждения КК показана на рис. 8.

При незначительной плотности тепловыделения в материалах КК можно принять, что температура воды, омывающей его поверхности, равна температуре этих поверхностей. Считаем, что температура воды СО-1, омывающей НО со стороны, обращённой к ЖВЗ, равна $T_{\text{вх}} \sim 70^\circ\text{C}$ (конструктивная схема ВК позволяет обеспечить это). Температура воды СО-3, омывающей НО со стороны КК, близка к $T_{\text{вх3}} \sim 20^\circ\text{C}$. Исходные данные для расчёта кольцевого канала:

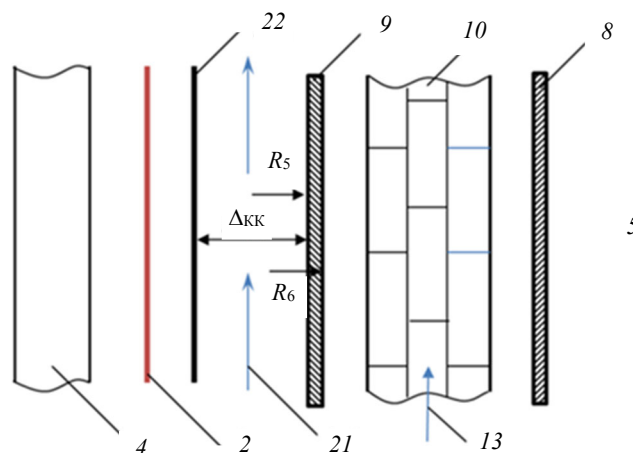


Рис. 8. Вертикальное сечение центральной цилиндрической части вакуумной камеры с двойной наружной оболочкой: 2 — криогенная тепловая защита; 4 — катушка тороидального поля; 5 — плазма; 8 — внутренняя оболочка вакуумной камеры; 9 — наружная оболочка вакуумной камеры; 10 — металлоконструкция железобетонной защиты; 13 — вода СО-1 (стрелками показано направление течения); 21 — вода СО-3 (стрелками показано направление течения); 22 — наружный кожух

Внутренний радиус НО R_5 , м . . .	1,41
Внешний радиус НО R_6 , м . . .	1,45
Площадь поверхности НО в КК $S_{НО}$, м ² . . .	80
Толщина НО $\delta_{об} = R_6 - R_5$, м . . .	0,04
Толщина стенки НК $\delta_{НК}$, м . . .	0,01
Объём стали, охлаждаемой водой, в КК, м ³ . . .	4
Средняя плотность тепловыделения в стали КК $q_{КК ст}$, Вт/м ³ . . .	530
Толщина слоя воды в КК $\delta_{КК}$, м . . .	0,03
Объём воды в КК, м ³ . . .	2,4
Средняя плотность тепловыделения в воде КК $q_{КК воды}$, Вт/м ³ . . .	300
Мощность тепловыделения в материалах КК $Q_{МАТ}$, Вт . . .	2840
Расход воды СО-3 в КК $G_{КК}$, кг/с . . .	130

Рассмотрение процессов теплообмена производилось по методике [3]: α_5 — коэффициент теплоотдачи от НО к воде СО-3 в КК, при средней скорости воды в КК $w_{КК} = 0,5$ м/с получаем значение $\alpha_5 \sim 1400$ Вт/(м²·°C); коэффициент α_6 теплоотдачи от воды СО-1 во внутрикорпусном объёме к НО принимаем равным α_1 . С целью определения влияния значений α_5 и α_6 на теплопередачу от воды СО-1 к воде СО-3 через цилиндрическую стенку НО далее рассматриваем различные значения α_5 и α_6 . Так как отношение внешнего R_6 и внутреннего R_5 радиусов НО близко к 1, то можно использовать уравнение теплопередачи через плоскую стенку. Коэффициент теплопередачи в этом случае

$$\kappa = 1/(1/\alpha_5 + \delta_{об}/\lambda_{ст} + 1/\alpha_6), \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}. \quad (5)$$

Тепловая мощность, передаваемая через НО:

$$Q_{НО} = \kappa S_{НО} (T_{вх} - T_{вх3}), \text{ Вт}. \quad (6)$$

Полная тепловая мощность КК

$$Q_{КК} = Q_{МАТ} + Q_{НО}, \text{ Вт}. \quad (7)$$

Подогрев воды СО-3 в КК

$$\Delta T_{КК} = Q_{КК}/(C_v G_{КК}), \text{ °C}, \quad (8)$$

где C_v — теплоёмкость воды, Дж/(кг·°C).

Температура воды СО-3 на выходе из КК и равная ей температура НК

$$T_{вых3} = T_{НК} = T_{вх3} + \Delta T_{КК}, \text{ °C}. \quad (9)$$

Результаты оценок температурного режима КК приведены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6. Оценка температурного режима кольцевого канала

Вариант	Параметр				
	Исходный		Расчётный		
	α_5 , Вт/(м ² ·°C)	α_6 , Вт/(м ² ·°C)	κ , Вт/(м ² ·°C)	$Q_{КК}$, МВт	$\Delta T_{КК}$, °C
17	1000	1000	214,3	0,86	1,6
18	1000	1400	228,3	0,92	1,7
19	1000	2000	240	0,96	1,8
20	1400	1400	244,2	0,98	1,8
21	1400	2000	257,7	1,03	1,9
22	2000	2000	272,7	1,09	2

Выполненные оценки показывают, что при всех допустимых сочетаниях α_5 и α_6 тепловая мощность, передаваемая через цилиндрическую стенку НО, такова, что подогрев воды в КК не превышает 2 °C. Соответственно температура воды СО-3 на выходе из КК и равная ей температура НК по (9) будут не более 22 °C. Определяющим для полной тепловой мощности КК является мощность, передаваемая через НО. Мощность тепловыделения в материалах КК играет незначительную роль. Для снижения $Q_{НО}$ можно увеличить её термическое сопротивление. Для этого на поверхности НО (любой из двух) устанавливается слой теплоизоляции. Далее рассматриваем вариант, когда его толщина $\delta_{из} = 0,005$ м, а коэффициент теплопроводности $\lambda_{из} \sim 0,2$ Вт/(м·°C). Подобное значение $\lambda_{из}$ имеет котельная накипь, богатая силикатом. В формулу (5) вставляется слагаемое $\delta_{из}/\lambda_{из}$. Установка изоляции в КК приведёт к сужению его проход-

ного сечения и росту скорости воды в нём, поэтому рассматриваем более высокие значения α_5 и α_6 . Результаты расчётов при различных исходных параметрах приведены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7. Оценка температурного режима кольцевого канала при установке теплоизоляции

Вариант	Параметр				
	Исходный		Расчётный		
	α_5 , Вт/(м ² ·°C)	α_6 , Вт/(м ² ·°C)	κ , Вт/(м ² ·°C)	$Q_{\text{КК}}$, МВт	$\Delta T_{\text{КК}}$, °C
23	1400	1400	30,6	0,125	0,23
24	1400	1800	34,6	0,141	0,26
25	1400	2200	34,7	0,142	0,26
26	1800	1800	34,7	0,142	0,26
27	1800	2200	34,9	0,142	0,26
28	2200	2200	35	0,143	0,26

Выполненные оценки показывают, что при всех допустимых сочетаниях α_5 и α_6 тепловая мощность, передаваемая через цилиндрическую стенку НО со слоем теплоизоляции, такова, что подогрев воды в КК не превышает 0,3 °C. Соответственно температура воды СО-3 на выходе из КК по (9) будет не более 20,3 °C.

ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КТЗ ПРИ ТЕПЛООБМЕНЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ С НАРУЖНЫМ КОЖУХОМ

Принятые допущения и методика расчёта. Схема взаимного расположения наружного кожуха и КТЗ показана на рис. 8. Теплообмен излучением между наружным кожухом и КТЗ происходит в вакууме, который будет поддерживаться в криостате. Плотность теплового потока, падающего на КТЗ от наружного кожуха, определяется по формуле

$$q_{\text{КТЗ}} = c_0 \varepsilon_{\text{эф0}} ((T_{\text{НК}}/100)^4 - (T_{\text{КТЗ}}/100)^4), \text{ Вт/м}^2, \quad (10)$$

где c_0 — коэффициент излучения абсолютно чёрного тела 5,67 Вт/(м²·К⁴); $T_{\text{НК}}$ — температура поверхности наружного кожуха, К; $T_{\text{КТЗ}}$ — температура поверхности КТЗ, на которую падает излучение, К; $\varepsilon_{\text{эф0}}$ — приведённая степень черноты при излучении с наружного кожуха на КТЗ, которая определяется по формуле

$$\varepsilon_{\text{эф0}} = 1/(1/\varepsilon_{\text{НК}} + 1/\varepsilon_{\text{КТЗ}} - 1), \quad (11)$$

где $\varepsilon_{\text{НК}}$ — степень черноты излучающей поверхности наружного кожуха; $\varepsilon_{\text{КТЗ}}$ — степень черноты поверхности КТЗ, на которую падает излучение. Далее считаем, что $\varepsilon_{\text{НК}} = \varepsilon_{\text{КТЗ}}$. Рассмотрим три возможных значения $\varepsilon_{\text{НК}} = \varepsilon_{\text{КТЗ}} = 0,05, 0,1, 0,2$. Этим значениям соответствуют три значения $\varepsilon_{\text{эф0}}$ — 0,0256, 0,0526 и 0,111. Рассмотрим два варианта теплообмена между поверхностью НО и КТЗ:

— вариант 1. ВК не имеет наружного кожуха, температура её НО $T_{\text{НО}} = T_{\text{ВК1}} = 70 \text{ °C} = 343 \text{ К}$. Это значение подставляется в (10) вместо $T_{\text{НК}}$. Температура КТЗ $T_{\text{КТЗ}} = 80 \text{ К}$. Значения $q_{\text{КТЗ}}$ при различных значениях $\varepsilon_{\text{эф0}}$ приведены в табл. 8;

— вариант 2. ВК имеет наружный кожух, его температура $T_{\text{НК}} = T_{\text{ВК3}} \sim 21 \text{ °C} = 294 \text{ К}$. Значения $q_{\text{КТЗ}}$ при различных значениях $\varepsilon_{\text{эф0}}$ приведены в табл. 8.

Т а б л и ц а 8. Оценка плотности теплового потока на КТЗ при установке наружного кожуха и без него

Приведённая степень черноты $\varepsilon_{\text{эф0}}$	Плотность теплового потока на КТЗ $q_{\text{КТЗ}}$, Вт/м ²	
	Вариант 1	Вариант 2
0,0256	20	10,8
0,0526	41,1	22,2
0,111	86,8	46,8

Плотность теплового потока с КТЗ на КТП $q_{\text{КТП}}$ рассчитывается также по (10). Предполагаем, что $T_{\text{КТЗ}}$ находится в диапазоне 80—100 К, а приведённая степень черноты системы КТЗ и КТП такая же, как и в табл. 8. Значения $q_{\text{КТП}}$ при различных значениях $\varepsilon_{\text{эф0}}$ приведены в табл. 9.

Т а б л и ц а 9. Оценка плотности теплового потока на КТП с КТЗ

Приведённая степень черноты $\varepsilon_{\text{эф0}}$	Плотность теплового потока на КТП $q_{\text{КТП}}$, Вт/м ²	
	$T_{\text{КТЗ}} = 80 \text{ К}$	$T_{\text{КТЗ}} = 100 \text{ К}$
0,0256	0,06	0,15
0,0526	0,12	0,29
0,111	0,26	0,63

Допустимым значением $q_{\text{КТП}}$ принимаем значение $q_{\text{КТП доп}} = 1 \text{ Вт/м}^2$. Таким образом, установка наружного кожуха позволяет существенно снизить плотность теплового потока с НО на КТЗ $q_{\text{КТЗ}}$, но не позволяет обеспечить

$$q_{\text{КТЗ}} \leq q_{\text{КТП доп}}. \quad (12)$$

Выполнение условия (12) позволило бы вообще отказаться от КТЗ. Одним из возможных способов снижения $q_{\text{КТЗ}}$ является установка системы экранов между наружным кожухом и КТЗ.

ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КТЗ ПРИ ТЕПЛООБМЕНЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ С НАРУЖНЫМ КОЖУХОМ И УСТАНОВЛЕННОЙ МЕЖДУ НИМИ СИСТЕМОЙ ЭКРАНОВ

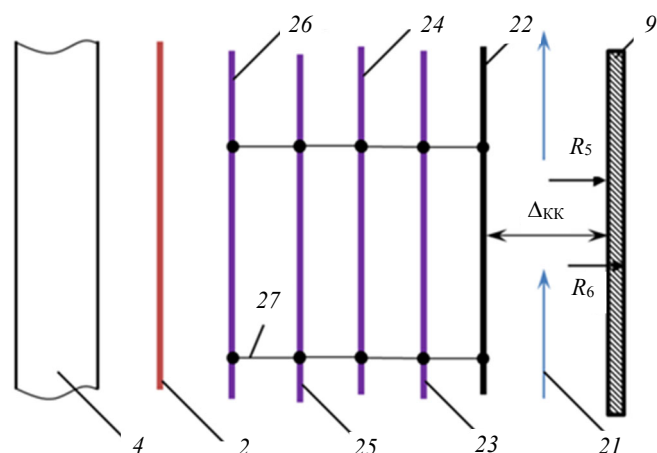


Рис. 9. Вертикальное сечение центральной цилиндрической части вакуумной камеры с двойной наружной оболочкой и системой экранов: 2 — криогенная тепловая защита; 4 — катушка тороидального поля; 9 — наружная оболочка вакуумной камеры; 21 — вода СО-3 (стрелками показано направление течения); 22 — наружный кожух; 23 — первый экран; 24 — второй экран; 25 — третий экран; 26 — четвертый экран; 27 — крепления экранов

Принятые допущения и методика расчёта.

Далее рассматриваем систему из четырёх экранов. Они устанавливаются перпендикулярно к направлению потока излучения на креплениях в пространстве между наружным кожухом и КТЗ и имеют форму вложенных цилиндров. Схема взаимного расположения наружного кожуха, системы экранов и КТЗ показана на рис. 9. Крепления установлены на наружном кожухе и имеют низкую теплопроводность. В качестве материала экранов обычно используются тонкие листы материала с высокой теплопроводностью (в нашем случае алюминия толщиной $\delta_{\text{эк}} \sim 0,001 \text{ м}$). Температура первого экрана, ближайшего к наружному кожуху, $T_{\text{эк1}}$, температура второго $T_{\text{эк2}}$, третьего $T_{\text{эк3}}$ и четвертого, ближайшего к КТЗ, $T_{\text{эк4}}$.

Тепловое излучение с наружного кожуха падает на первый экран и затем переизлучается на второй экран, с него — на третий экран, с третьего — на четвертый. Часть тепловой мощности с

экрана на экран передаётся через крепления. С четвертого экрана тепловое излучение падает на КТЗ. Так как температура четвертого экрана меньше, чем температура наружного кожуха, плотность теплового потока на КТЗ будет меньше, чем без системы экранов. Запишем уравнения теплового баланса для каждого экрана. На каждом экране рассматриваем участок площадью S . Для первого экрана с температурой $T_{\text{эк1}}$ мощность падающего на него с наружного кожуха теплового потока

$$Q_{\text{пад1}} = S \varepsilon_{\text{эф01}} ((T_{\text{НК}}/100)^4 - (T_{\text{эк1}}/100)^4), \text{ Вт}, \quad (13)$$

где $\varepsilon_{\text{эф01}}$ — приведённая степень черноты при излучении с наружного кожуха на первый экран. Мощность внутреннего тепловыделения в первом экране

$$Q_{\text{внут1}} = q_{\text{эк}} S \delta_{\text{эк}}, \text{ Вт}, \quad (14)$$

где $q_{\text{эк}}$ — средняя плотность тепловыделения в материале экрана, Вт/м³.

Далее принимаем для каждого экрана $q_{\text{эк}} = q_{\text{КК ст}}$ и далее обозначаем просто q . Мощность, передаваемая на первый экран с наружного кожуха через крепления, пропорциональна мощности падающего на него с наружного кожуха теплового потока:

$$Q_{\text{креп1}} = rQ_{\text{пад1}}, \text{ Вт}, \quad (15)$$

где r — коэффициент пропорциональности.

Подобное соотношение $Q_{\text{креп1}}$ и $Q_{\text{пад1}}$ соответствует опытным данным, полученным при эксплуатации экранно-вакуумной изоляции, при этом $r \sim 0,1\text{—}0,3$. Для второго экрана с температурой $T_{\text{эк2}}$, на который падает тепловой поток с первого экрана:

$$Q_{\text{пад2}} = Sc_0\varepsilon_{\text{эф12}}((T_{\text{эк1}}/100)^4 - (T_{\text{эк2}}/100)^4), \text{ Вт}, \quad (16)$$

где $\varepsilon_{\text{эф12}}$ — приведённая степень черноты при излучении с первого экрана на второй. Мощность, передаваемая на второй экран с первого через крепления:

$$Q_{\text{креп2}} = rQ_{\text{пад2}}, \text{ Вт}. \quad (17)$$

Из закона сохранения энергии получаем для первого экрана в стационарном состоянии (при отсутствии разогрева или охлаждения) равенство подводимой к нему тепловой мощности и отводимой от него тепловой мощности, т.е. (13) + (14) + (15) = (16) + (17). Далее получаем

$$(1 + r)Sc_0\varepsilon_{\text{эф01}}((T_{\text{НК}}/100)^4 - (T_{\text{эк1}}/100)^4) + qS\partial_{\text{эк}} = (1 + r)Sc_0\varepsilon_{\text{эф12}}((T_{\text{эк1}}/100)^4 - (T_{\text{эк2}}/100)^4). \quad (18)$$

Введём обозначения $K = (T_{\text{НК}}/100)^4$; $x = (T_{\text{эк1}}/100)^4$; $y = (T_{\text{эк2}}/100)^4$; $z = (T_{\text{эк3}}/100)^4$; $u = (T_{\text{эк4}}/100)^4$; $m = (T_{\text{КТЗ}}/100)^4$. При условии $\varepsilon_{\text{эф01}} = \varepsilon_{\text{эф12}} = \varepsilon_{\text{эф23}} = \varepsilon_{\text{эф34}} = \varepsilon_{\text{эф45}} = \varepsilon_{\text{эф}}$ ($\varepsilon_{\text{эф45}}$ — приведённая степень черноты при излучении с четвёртого экрана на КТЗ, между четвёртым экраном и КТЗ нет креплений, теплообмен производится только излучением) система уравнений, описывающая теплообмен в системе с четырьмя экранами, запишется в виде

$$\begin{aligned} c_0\varepsilon_{\text{эф}}(1 + r)(K - x) + q\partial_{\text{эк}} &= c_0\varepsilon_{\text{эф}}(1 + r)(x - y); \\ c_0\varepsilon_{\text{эф}}(1 + r)(x - y) + q\partial_{\text{эк}} &= c_0\varepsilon_{\text{эф}}(1 + r)(y - z); \\ c_0\varepsilon_{\text{эф}}(1 + r)(y - z) + q\partial_{\text{эк}} &= c_0\varepsilon_{\text{эф}}(1 + r)(z - u); \\ c_0\varepsilon_{\text{эф}}(1 + r)(z - u) + q\partial_{\text{эк}} &= c_0\varepsilon_{\text{эф}}(u - m). \end{aligned} \quad (19)$$

При заданных величинах K , c_0 , ε , r , q , $\partial_{\text{эк}}$ и m получаем систему из четырёх уравнений с четырьмя неизвестными. Аналитическое решение даёт

$$\begin{aligned} x &= (K(1 + r) + 4q\partial_{\text{эк}}/(c_0\varepsilon_{\text{эф}}) + 3K + 6q\partial_{\text{эк}}/(c_0\varepsilon_{\text{эф}}(1 + r)) + m)/(5 + r); \\ y &= 2x - K - q\partial_{\text{эк}}/(c_0\varepsilon_{\text{эф01}}(1 + r)); \quad z = 3x - 2K - 3q\partial_{\text{эк}}/(c_0\varepsilon_{\text{эф01}}(1 + r)); \\ y &= 2x - K - q\partial_{\text{эк}}/(c_0\varepsilon_{\text{эф1}}(1 + r)); \\ u &= 4x - 3K - 6q\partial_{\text{эк}}/(c_0\varepsilon_{\text{эф1}}(1 + r)). \end{aligned} \quad (20)$$

Результаты расчётов температуры экранов при различных исходных параметрах представлены в табл. 10.

Т а б л и ц а 10. Оценка температуры экранов

Исходные параметры	Температура экранов, К			
	$T_{\text{эк1}}$	$T_{\text{эк2}}$	$T_{\text{эк3}}$	$T_{\text{эк4}}$
$\varepsilon_{\text{эф}} = 0,0256; r = 0,1$	286	273,3	253,6	220,2
$\varepsilon_{\text{эф}} = 0,0256; r = 0,2$	285,8	273	254,1	222,6
$\varepsilon_{\text{эф}} = 0,0256; r = 0,3$	285,7	273,2	254,6	224,8
$\varepsilon_{\text{эф}} = 0,0526; r = 0,1$	282,2	266,6	245	211,3
$\varepsilon_{\text{эф}} = 0,0526; r = 0,2$	282,3	267	246	214
$\varepsilon_{\text{эф}} = 0,0526; r = 0,3$	282,4	267,3	247	216,5
$\varepsilon_{\text{эф}} = 0,111; r = 0,1$	280,2	263,1	244,3	206
$\varepsilon_{\text{эф}} = 0,111; r = 0,2$	280,5	263,7	241,7	209,3
$\varepsilon_{\text{эф}} = 0,111; r = 0,3$	280,7	264,2	242,9	212
$\varepsilon_{\text{эф}} = 0,176; r = 0,1$	279,6	261,9	238,7	204,4
$\varepsilon_{\text{эф}} = 0,25; r = 0,1$	279,2	261,3	237,9	203,5

Оценки показывают, что изменение параметра r незначительно влияет на температуру экранов. Более существенное влияние на неё оказывает приведённая степень черноты $\varepsilon_{\text{эф}}$. При $\varepsilon_{\text{эф}} = 0,111$ и $r = 0,1$ температура четвёртого экрана $T_4 = 206$ К. Дальнейшее увеличение $\varepsilon_{\text{эф}}$ приводит к незначительному уменьшению T_4 . Увеличение параметров $\partial_{\text{эк}}$ и q приводит к росту T_4 . Дальнейшего снижения T_4 можно добиться увеличением числа экранов, но вопрос о возможном количестве экранов можно будет решить после уточнения характеристик установки ДЕМО-ТИН, в частности, необходимо определить допустимое расстояние между наружным кожухом и КТЗ. Предполагая, что $T_4 = 206$ — 220 К, сделаем оценку плотности теплового потока на КТЗ при установке четырёх экранов, результаты представлены в табл. 11.

Таблица 11. Оценка плотности теплового потока на КТЗ при установке системы из четырёх экранов

Приведённая степень черноты $\varepsilon_{\text{эф}}$	Плотность теплового потока на КТЗ $q_{\text{КТЗ}}$, Вт/м ²	
	$T_4 = 206$ К	$T_4 = 220$ К
0,0256	2,6	3,3
0,0526	5,2	6,9
0,111	11,3	14,5

Таким образом, установка системы из четырёх экранов позволяет значительно снизить плотность теплового потока на КТЗ. По сравнению с ВК, в которой нет наружного кожуха и температура её НО составляет $T_{\text{НО}} = 70$ °С = 343 К, $q_{\text{КТЗ}}$ снижается в ~ 6 — 7 раз, а по сравнению с ВК с наружным кожухом и его температурой $T_{\text{НК}} = 21$ °С = 294 К $q_{\text{КТЗ}}$ снижается в $\sim 3,5$ — 4 раза. Как представляется, модифицированная конструкция НО обладает следующими преимуществами:

- установка только наружного кожуха вместе с СО-2 позволяет вдвое снизить плотность теплового потока на КТЗ $q_{\text{КТЗ}}$;
- установка наружного кожуха вместе с системой из четырёх экранов позволяет снизить $q_{\text{КТЗ}}$ в 6 — 7 раз;
- в случае, если параметры установки позволят установить более четырёх экранов, возможно довести $q_{\text{КТЗ}}$ до значения $q_{\text{доп}} = 1$ Вт/м², что позволит отказаться от КТЗ и упростить конструкцию ДЕМО-ТИН;
- наружный кожух будет дополнительным барьером безопасности.

МОДИФИЦИРОВАННАЯ КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ОБТЕКАНИЯ ПАТРУБКОВ ВО ВНУТРИКОРПУСНОМ ОБЪЁМЕ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

В проектной конструктивной схеме ВК не предусмотрено устройств для обеспечения обтекания водой (и, следовательно, охлаждения) металлоконструкций, находящихся выше и ниже (по направлению течения) от проходящих через неё патрубков. Схема течения воды во внутрикорпусном объёме секции проектной конструктивной схемы ВК и обтекания экваториального патрубка показана на рис. 10 (вид со стороны наружной оболочки) и на рис. 11 (вид сверху). Представляется весьма вероятным образование участков с отсутствием течения воды СО-1 (застойных участков — поз. 28 на рис. 10), что может приве-

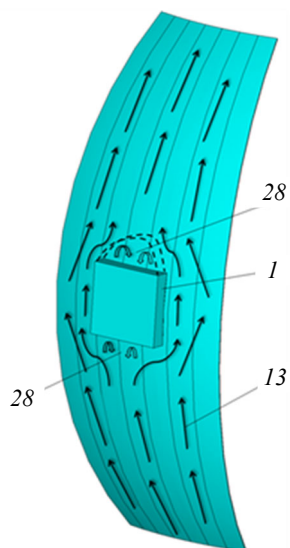


Рис. 10. Схема течения воды во внутрикорпусном объёме секции проектной конструкции вакуумной камеры: 1 — корпус экваториального патрубка; 13 — вода СО-1 (стрелками показано направление течения); 28 — предполагаемая зона отсутствия течения воды (застойная зона)

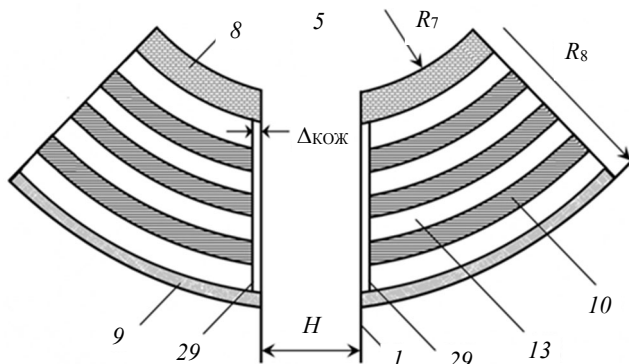


Рис. 11. Разрез секции внешней части вакуумной камеры в экваториальной плоскости: 1 — корпус экваториального патрубка; 5 — плазма; 8 — внутренняя оболочка вакуумной камеры; 9 — наружная оболочка вакуумной камеры; 10 — металлоконструкция железобетонной защиты; 13 — вода СО-1; 29 — боковые стенки раздаточного кожуха

сти к перегреву металлоконструкций и кипению воды. Подобное нарушение режима эксплуатации ВК может привести к её отказу и к отказу всей установки. Для предотвращения этого предлагается следующая модификация конструктивной схемы ВК. На корпус экваториального патрубка по всей его длине между ВО и НО устанавливается раздаточный кожух, как показано на рис. 12. Кожух состоит из боковых стенок (стальных листов толщиной несколько мм) и верхней крышки из такого же листа с отверстиями для течения воды. Раздаточный кожух может крепиться как к корпусу экваториального патрубка, так и к металлоконструкциям ЖВЗ, которые окружают корпус экваториального патрубка. Поток теплоносителя, обтекающий снизу корпус экваториального патрубка, условно делится на две части: «центральный» поток, попадающий под раздаточный кожух, и «боковые» потоки, текущие справа и слева от корпуса экваториального патрубка.

«Центральный» поток при своём течении обтекает рассекающий клиновидной формы, установленный снизу на корпус экваториального патрубка. Подобная конструкция позволяет избежать образования застойной области ниже корпуса экваториального патрубка. Далее «центральный» поток делится на две части и каждая попадает в пространство между боковой стенкой корпуса экваториального патрубка и боковой стенкой раздаточного кожуха. Здесь поток теплоносителя ускоряется и попадает в пространство между верхней стенкой экваториального патрубка и верхней крышкой раздаточного кожуха, а далее выходит через отверстия в верхней крышке. Ряды отверстий совмещены с каналами теплоносителя между пластинами металлоконструкций ЖВЗ, установленными над корпусом экваториального патрубка. «Центральный» поток теплоносителя охлаждает эти металлоконструкции без образования застойных участков. Отбойник (металлическая перегородка) делит пространство между верхней стенкой экваториального патрубка и верхней крышкой раздаточного кожуха на две равные части, что способствует равномерному распределению теплоносителя в этом пространстве. Гидравлические потери при течении «центрального» потока теплоносителя будут значительно выше (из-за ускорения потока и появления дополнительных гидравлических сопротивлений), чем при течении «боковых» потоков. Это приведёт к тому, что часть теплоносителя «центрального» потока будет перетекать в «боковые» потоки, что ухудшит охлаждение участка над корпусом экваториального порта. Для предотвращения перетекания теплоносителя из «центрального» в «боковые» потоки необходимо установить в «боковых» потоках дополнительные гидравлические сопротивления (например, сужения проходов между пластинами металлоконструкций ЖВЗ).

Принятые допущения и методика расчёта. Толщина металлических пластин металлоконструкций ЖВЗ (далее — просто пластин) $2\delta_{пл} = 0,03$ м, расстояние между пластинами (ширина канала с водой) $\delta_{воды} = 0,014$ м. Максимальная плотность тепловыделения достигается в пластинах, ближайших к ВО, для них $q_{пл} = q_{вст} = 1,8$ МВт/м³. Выполненные в [2] оценки дают значение коэффициента теплоотдачи от пластин $\alpha_{пл} \sim 700$ Вт/(м²·°С). При дальнейших оценках считаем пластины плоскими, так как отношение их наружного и внутреннего радиусов близко к 1; $R_8 = 4,9$ м — наружный радиус внешней части ВК (в экваториальной плоскости); $R_7 = 4,3$ м — внутренний радиус внешней части ВК (в экваториальной плоскости); $\delta_{пр} = 0,02—0,03$ м — расстояние между стенками корпуса экваториального патрубка и боковыми стенками раздаточного кожуха; $H = 0,5$ м — ширина корпуса экваториального патрубка; $n = 18$ — число секций в токамаке. Средняя скорость течения воды между пластинами вне раздаточного кожуха $w_{воды} \sim 0,1$ м/с.

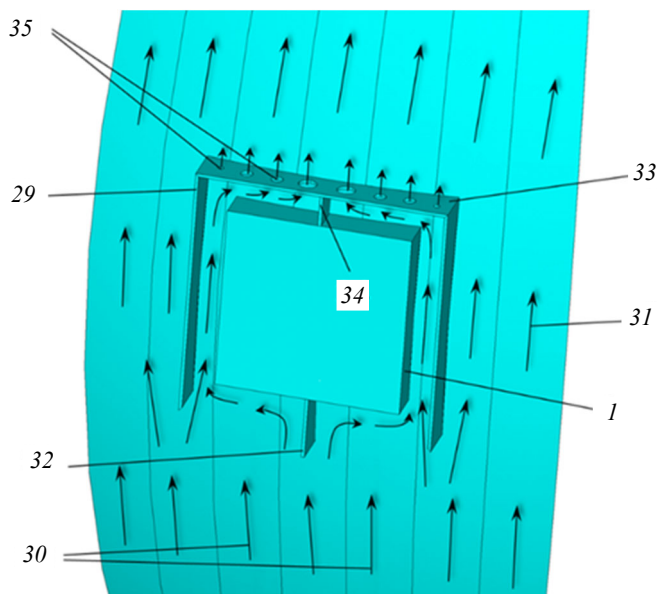


Рис. 12. Схема установки раздаточного кожуха на корпус патрубка экваториального порта: 1 — корпус экваториального патрубка; 29 — боковые стенки раздаточного кожуха; 30 — «центральный» поток воды; 31 — «боковой» поток воды; 32 — рассекающий клин; 33 — верхняя крышка раздаточного кожуха; 34 — отбойник; 35 — отверстия в верхней крышке раздаточного кожуха

Оценка скорости течения воды под раздаточным кожухом. Схема течения воды в этом случае показана на рис. 11 и 12. При заданных размерах полная площадь горизонтального сечения железобетонной защиты секции ВК в экваториальной плоскости составит $S_{\text{секц}} = \pi((R_8 - \partial_{\text{об}})^2 - (R_7 + \partial_{\text{об}})^2)/n = 0,83 \text{ м}^2$, площадь сечения, занятая раздаточным кожухом, $S_{\text{цен}} = (R_8 - R_7 - 2\partial_{\text{об}})(H + 2\partial_{\text{пр}}) = 0,28\text{—}0,29 \text{ м}^2$, площадь проходного сечения между стенками корпуса экваториального патрубка и боковыми стенками раздаточного кожуха $S_{\text{пр}} = 2(R_8 - R_7 - 2\partial_{\text{об}})\partial_{\text{пр}} = 0,021\text{—}0,031 \text{ м}^2$, скорость воды в этом сечении $w_{\text{макс}} = w_{\text{воды}} S_{\text{цен}} / S_{\text{пр}} = 0,94\text{—}1,33 \text{ м/с}$. Подобные значения скорости являются приемлемыми, так как не превышают рекомендованную при течении воды в трубах скорость 4—6 м/с и не приводят к значительным гидравлическим потерям.

ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР В ПЛАСТИНЕ

Максимальную температуру поверхности пластины можно оценить по формуле

$$T_{\text{пов}} = T_{\text{вых}} + q_{\text{пл}} \partial_{\text{пл}} / \alpha_{\text{пл}}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (21)$$

Максимальную температуру в центральной плоскости пластины можно оценить по формуле

$$T_{\text{цен}} = T_{\text{пов}} + q_{\text{пл}} (\partial_{\text{пл}})^2 / (2\lambda_{\text{ст}}), \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (22)$$

Далее рассматриваем три варианта течения воды во внутрикорпусном объёме ВК:

— вариант А. Установленный раздаточный кожух обеспечивает обтекание пластин без образования застойных участков. Коэффициент теплоотдачи от пластин к воде $\alpha_{\text{пл}} \sim 700 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

— вариант Б. Без установки раздаточного кожуха при обтекании пластин образуются застойные участки. Коэффициент теплоотдачи от пластин к воде снижается до $\alpha_{\text{пл}} \sim 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

— вариант В. Без установки раздаточного кожуха при обтекании пластин образуются застойные участки. Коэффициент теплоотдачи от пластин к воде снижается до $\alpha_{\text{пл}} \sim 75 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

Значения температур поверхности и центральной плоскости пластины для различных вариантов в области с максимальным значением $q_{\text{пл}}$ приведены в табл. 12.

Т а б л и ц а 12. Температуры поверхности и центральной плоскости пластины

Вариант	Значение $\alpha_{\text{пл}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	Расчётные значения	
		$T_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{цен}}, ^\circ\text{C}$
А	700	118,6	130,5
Б	200	215	226,9
В	75	440	451,9

Таким образом, при отсутствии раздаточного кожуха и снижении коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{пл}}$ (варианты Б и В) температура пластин металлоконструкций ЖВЗ повышается. Возможно кипение недогретой жидкости на поверхности этих пластин и парообразование, что ухудшит условия циркуляции теплоносителя в контуре охлаждения ВК. При значениях $\alpha_{\text{пл}} = 75 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ и менее температура металлоконструкций может превысить допустимую температуру металла. Установка раздаточного кожуха (вариант А) обеспечивает поддержание температуры пластин на приемлемом уровне.

Следует отметить, что использованные для оценки температуры пластин коэффициенты теплоотдачи были использованы без учёта возникающей при нагреве пластин вынужденной конвекции воды во внутрикорпусном объёме ВК. Это явление может значительно увеличить коэффициент теплоотдачи и должно быть учтено при дальнейшем проектировании.

МОДИФИЦИРОВАННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ЖЕЛЕЗОВОДНОЙ ЗАЩИТЫ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

Для обеспечения надёжного охлаждения ВО и металлоконструкций ЖВЗ необходимо иметь как можно более высокий коэффициент теплоотдачи к воде. Недостатком базового варианта конструкции является то, что при существующей тепловой мощности ВК и заданном подогреве теплоносителя расход воды через внутрикорпусной объём оказывается таким, что его скорость обеспечивает лишь ламинар-

ный или переходный режим течения. Коэффициент теплоотдачи к воде при этом оказывается незначительным, что может привести к повышению температуры ВО и металлоконструкций ЖВЗ до неприемлемых значений. Подобное нарушение режима эксплуатации ВК может привести к её отказу и к отказу всей установки. Для предотвращения этого предлагается следующая модификация конструктивной схемы ВК. Часть каналов для течения воды в ЖВЗ перекрывается заглушками. Вода в этих каналах сохраняется, но течения воды в них нет. При этом скорость воды в остальных каналах возрастет и сохраняется оптимальное значение $J = 0,7$.

Принятые допущения и методика расчёта. На рис. 4 представлено горизонтальное сечение секции центральной цилиндрической части проектной конструкции ВК, на рис. 13 — вертикальное сечение этой секции. На рисунке показаны все пластины металлоконструкций ЖВЗ — 14 цилиндрических слоёв стали, ВО, НО и 15 кольцевых каналов между ними для течения воды. Толщина пластин $36\text{—}49$ $2\delta_{\text{пл}} = 0,03$ м, расстояние между ними (ширина каналов с водой $51\text{—}64$) $\delta_{\text{воды}} = 0,014$ м, ширина канала 50 $\delta_{\text{воды}50} = 0,024$ м.

Оценка теплогидравлических и геометрических параметров ЖВЗ была выполнена в [2], и дальнейшие расчёты проводятся по той же методике и на основании полученных в [2] результатов. Исходные данные: $Q_{\text{внут}} = 10,8$ МВт — полная тепловая мощность внутренней части ВК, $S_{\text{воды цил}} = 2,46$ м² — площадь проходного сечения для воды в центральной цилиндрической части ВК (суммарная площадь поперечного сечения каналов $50\text{—}64$), скорость течения воды во всех каналах одинакова, средний коэффициент теплоотдачи от пластин $\alpha_{\text{пл}}$ при течении воды в кольцевом канале определится по уравнению

$$\text{Nu}_{d_{\text{экв}}} = 0,017(\text{Re}_{d_{\text{экв}}})^{0,8} \text{Pr}^{0,4} (\text{Pr}_{\text{ж}}/\text{Pr}_{\text{с}})^{0,25}, \quad (23)$$

где $\text{Nu}_{d_{\text{экв}}}$ — число Нуссельта при течении воды в кольцевом канале с эквивалентным диаметром $d_{\text{экв}} = 2(R_{\text{внеш}} - R_{\text{внут}})$, м; $R_{\text{внеш}}$ — внешний радиус кольцевого канала, м; $R_{\text{внут}}$ — внутренний радиус кольцевого канала, м; $\text{Re}_{d_{\text{экв}}}$ — число Рейнольдса при течении воды в кольцевом канале с эквивалентным диаметром $d_{\text{экв}}$; Pr — число Прандтля; $\text{Pr}_{\text{ж}}$ — число Прандтля при средней температуре воды; $\text{Pr}_{\text{с}}$ — число Прандтля при температуре воды у стенки канала.

По (21) и (22) для $q_{\text{пл}} = 1,8$ МВт/м² определяются температуры поверхности $T_{\text{пов}36}$ и центральной плоскости $T_{\text{цен}36}$ пластины 36, ближайшей к ВО. Рассматриваем три варианта течения воды во внутренней части ВК:

— вариант Г. Проектная конструктивная схема ВК. Подогрев воды в системе охлаждения ВК $\Delta T_{\text{ВК}} = T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}} = 30$ °С, $T_{\text{вых}} = 100$ °С. Результаты расчётов приведены в табл. 14;

— вариант Д. Проектная конструктивная схема ВК. Подогрев теплоносителя уменьшен до $\Delta T_{\text{ВК}} = 10$ °С, $T_{\text{вых}} = 80$ °С. Результаты расчётов приведены в табл. 14.

Анализ вариантов Г и Д. В этих вариантах температура в цилиндрическом слое стали 36 не превысит допустимую. Температуры слоёв $37\text{—}49$ будут ниже из-за меньшей плотности тепловыделения в них. В варианте Г температура поверхности $T_{\text{пов}36}$ превышает температуру насыщения воды при $P_{\text{вх}} \sim 1$ МПа — на поверхности возможно кипение воды и парообразование, что нежелательно. Возможно локальное повышение $q_{\text{пл}}$, что приведёт к росту температуры слоя стали. Кроме того, в этих вариантах число $\text{Re}_{d_{\text{экв}}}$ находится в диапазоне режимов течения, переходного от ламинарного к турбулентному. Для этих режимов отсутствует надёжная методика определения коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{пл}}$ и, возможно, он будет меньше расчётного. Температура поверхности слоёв стали снижается с увеличением коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{пл}}$, и его желательно увеличить. Это возможно сделать, увеличив скорость течения воды путём сужения каналов $50\text{—}64$ за счёт увеличения толщины слоев стали $36\text{—}49$. Но такое решение нежелательно, так

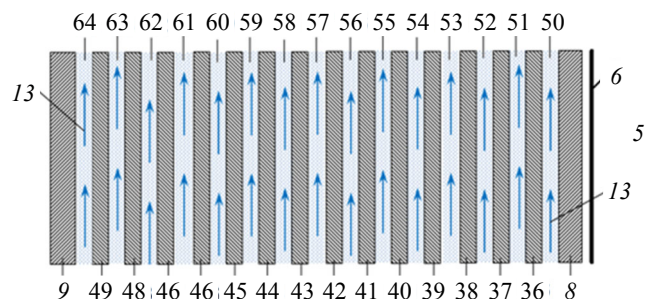


Рис. 13. Вертикальное сечение секции центральной цилиндрической части проектной конструкции вакуумной камеры: 5 — плазма; 6 — первая стенка; 8 — внутренняя оболочка вакуумной камеры; 9 — наружная оболочка вакуумной камеры; 13 — вода СО-1 (стрелками показано направление течения); 36—49 — пластины металлоконструкций железобетонной защиты; 50—64 — каналы теплоносителя воды СО-1

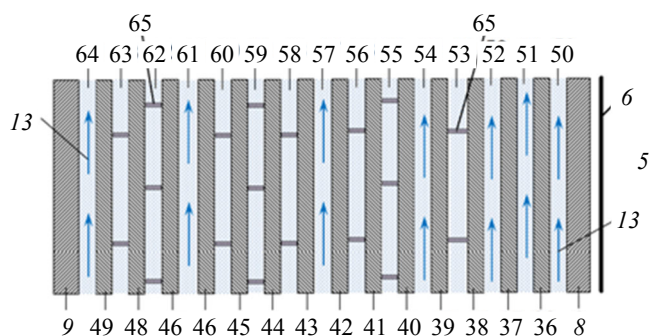


Рис. 14. Вертикальное сечение секции центральной цилиндрической части вакуумной камеры с частично перекрытыми каналами течения воды: 5 — плазма; 6 — первая стенка; 8 — внутренняя оболочка вакуумной камеры; 9 — наружная оболочка вакуумной камеры; 13 — вода СО-1 (стрелками показано направление течения); 36—49 — пластины металлоконструкций железобетонной защиты; 50—64 — каналы теплоносителя СО-1; 65 — заглушки на каналах теплоносителя СО-1

как изменится величина J , а для обеспечения оптимальных свойств железобетонной защиты желательнее поддерживать $J = 0,7$.

Другим способом увеличения коэффициента теплоотдачи $\alpha_{пл}$ представляется перекрытие заглушками части каналов 50—64 с сохранением воды в них, при этом скорость воды в остальных каналах возрастёт при сохранении $J = 0,7$. Эта схема течения воды рассмотрена в вариантах Е и Ж:

— вариант Е. Подогрев воды $\Delta T_{ВК} = 10^\circ\text{C}$, $T_{вы} = 80^\circ\text{C}$. Схема течения воды показана на рис. 14. Перекрыты заглушками каналы теплоносителя 53, 55, 56, 58—60, 62 и 63. В этих каналах течения воды нет и $S_{воды\,цил} = 1,26\text{ м}^2$. Перекрытые каналы сообщаются через отверстия в цилиндрических слоях стали с каналами, в которых сохраняется течение воды. Это необходимо для заполнения

перекрытых каналов водой, а также для слива воды из них при сливе воды из ВК. Кроме того, через эти отверстия производится выход продуктов радиолитиза. Результаты расчётов приведены в табл. 13;

— вариант Ж. Отличается от варианта Е тем, что подогрев воды 15°C , $T_{вы} = 85^\circ\text{C}$. Как представляется, расход воды через ВК в процессе эксплуатации будет колебаться, возможны и колебания $T_{вх}$. Поэтому такие параметры воды вполне возможны. Результаты расчётов приведены в табл. 13.

Т а б л и ц а 13. Оценка параметров центральной цилиндрической части вакуумной камеры

Параметр	Вариант			
	Г	Д	Е	Ж
$T_{вых}, ^\circ\text{C}$	100	80	80	85
Расход воды на охлаждение внутренней части ВК $G_{внут}, \text{кг/с}$	86,4	259,1	259,1	172,8
Средняя скорость течения воды во внутренней части ВК $w_{внут}, \text{м/с}$	0,036	0,11	0,21	0,14
$Re_{д\,экв}$	2580	7750	15 100	11 240
$\alpha_{пл}, \text{Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$	316	779	1328	984
$T_{пов36}$	185,4	114,7	100,3	112,4
$T_{цен36}$	197,3	126,6	112,2	124,3

Оценки, выполненные в вариантах Е и Ж, показывают, что повышение скорости теплоносителя обеспечивает существенное снижение температуры металлоконструкций ЖВЗ. Число $Re_{д\,экв}$ соответствует режиму развитого турбулентного течения, что позволяет достаточно точно определить коэффициент теплоотдачи $\alpha_{пл}$. Для подтверждения возможности осуществления вариантов Е и Ж сделаем оценку температуры стали и воды в перекрытых каналах 53 и 58—60. Примем следующие допущения.

Слои стали 38, 39 и неподвижный слой воды 53 охлаждаются потоками воды 52 и 54. Плотность тепловыделения в слое стали 38 $q_{пл38} = 297\text{ кВт/м}^3$, в слое 39 $q_{пл39} = 175\text{ кВт/м}^3$ [2]. Плотность тепловыделения в слое воды 53 $q_{воды53} = 99\text{ кВт/м}^3$. Считаем $q_{пл38} = q_{пл39}$, что даст завышенную оценку температуры в этих слоях. Максимальная температура будет в центре слоя воды 53 $T_{воды53}$. $T_{ст\,38-53}$ — температура поверхности пластины 38 на границе со слоем воды 53; $T_{ст\,38-52}$ — температура поверхности пластины 38 на границе с омывающим её слоем воды 52. Результаты расчётов по (21) и (22) приведены в табл. 14. Слои стали 43—46, а также неподвижные слои воды 58—60 охлаждаются потоками воды 57 и 61. Плотность тепловыделения в слое стали 43 $q_{пл43} = 21\text{ кВт/м}^3$, в слое стали 44 $q_{пл44} = 12,5\text{ кВт/м}^3$, в слое стали 45 $q_{пл45} = 7,4\text{ кВт/м}^3$, в слое стали 46 $q_{пл46} = 4,4\text{ кВт/м}^3$. Плотность тепловыделения в слое воды 58 $q_{воды58} = 7,1\text{ кВт/м}^3$, в слое воды 59 $q_{воды59} = 4,2\text{ кВт/м}^3$, в слое воды 60 $q_{воды60} = 2,5\text{ кВт/м}^3$. Считаем $q_{пл43} = q_{пл44} = q_{пл45} = q_{пл46} = 21\text{ кВт/м}^3$; $q_{воды58} = q_{воды59} = q_{воды60} = 7,1\text{ кВт/м}^3$, что даст завышенную оценку температуры в этих слоях. Максимальная температура будет в центре слоя воды 59 $T_{воды59}$. Результаты расчётов по (21) и (22) приведены в табл. 14.

Т а б л и ц а 14. Оценка температуры слоёв стали и воды в центральной цилиндрической части вакуумной камеры с частично перекрытыми каналами

Параметр	Вариант	
	Е	Ж
$T_{ст\ 38-52}, ^\circ\text{C}$	87,2	94,8
$T_{ст\ 38-53}, ^\circ\text{C}$	94,6	102,2
$T_{воды\ 53}, ^\circ\text{C}$	98,2	105,8
$T_{воды\ 59}, ^\circ\text{C}$	83,6	88,9

Такие температуры стали и воды вполне допустимы. Оценки, выполненные в вариантах Е и Ж, показывают, что повышение скорости теплоносителя обеспечивает существенное снижение температуры металлоконструкций во внутрикорпусном объёме ВК, температура поверхности наружной оболочки ВК также существенно ниже температуры насыщения и кипение воды на ней невозможно. Число Re при этом соответствует режиму развитого турбулентного течения, что позволяет достаточно точно определить $\alpha_{пл}$.

ВЫВОДЫ

Предложенные модификации позволяют без существенных изменений проектной конструктивной схемы ВК решить некоторые проблемы, возникающие при её проектировании. Разделение ВО на ВПО и внутренний кожух обеспечивает двустороннее охлаждение ВПО и снижает как разницу температур между её поверхностями, так и связанные с этим термические напряжения до приемлемых значений. Применение дополнительной системы охлаждения позволяет повысить надёжность теплоотвода от вакуумной камеры в случае аварийных ситуаций. Возможно также применение этой дополнительной системы для охлаждения компонентов, обращённых к плазме, в случае потери их охлаждения.

Установка на НО наружного кожуха с собственной системой охлаждения позволяет снизить температуру поверхности, обращённой к КТЗ, и тем самым снизить плотность теплового потока на неё. Применение системы экранов позволяет ещё более снизить плотность теплового потока на КТЗ, что даёт возможность упростить её конструкцию. Установка раздаточных кожухов на патрубки, проходящие через внутрикорпусной объём ВК, позволяет обеспечить охлаждение находящихся выше и ниже по течению воды металлоконструкций ЖВЗ при допустимой для них температуре.

Увеличение скорости течения воды через металлоконструкции ЖВЗ, вызванное как уменьшением площади проходного сечения для воды, так и уменьшением её подогрева, позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи к воде и снизить температуру металлоконструкций. Уменьшение площади проходного сечения для воды достигается перекрытием части каналов для воды. Вода в перекрытых каналах присутствует, но не течёт, что позволяет сохранить требуемое значение $J = 0,7$.

Как представляется, предлагаемые модификации конструктивной схемы ВК могут быть применены либо все вместе, либо по отдельности, и желательно их учесть при дальнейшем проектировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азизов Э.А. и др. Токамак ДЕМО-ТИН: концепция электромагнитной системы и вакуумной камеры. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 2, с. 5.
2. Пашков А.Ю. и др. Оценка теплогидравлических параметров системы охлаждения вакуумной камеры установки ДЕМО-ТИН. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 3, с. 25.
3. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. — М.: Энергия, 1975.



Борис Васильевич Кутеев, заместитель руководителя отделения по гибридным системам, д.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия; профессор; НИЯУ МИФИ, 115409 Москва, Каширское ш. 31, Россия
Kuteev_BV@nrcki.ru



Александр Юрьевич Пашков, заместитель начальника отдела, с.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
A_Yu_Pashkoff@mail.ru



Елена Александровна Филимонова, н.с., ответственный секретарь журнала «ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез», ветеран атомной энергетики и промышленности, имеет звание «Заслуженный ветеран ИАЭ им. И.В. Курчатова»; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
alb@fc.iterru.ru



Юрий Сергеевич Шпанский, начальник отдела, к. техн. н., лауреат премии им. И.В. Курчатова, ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Shpanskiy_YS@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 8 декабря 2020 г.

После доработки 11 января 2020 г.

Принята к публикации 14 января 2021 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 1, с. 27—44.