

УДК 621.039.634

## ОЦЕНКА СКОРОСТИ РАЗОГРЕВА И МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРВОЙ СТЕНКИ УСТАНОВКИ ДЕМО-ТИН ПРИ ПОТЕРЕ ЕЁ ОХЛАЖДЕНИЯ

*А.Ю. Паиков, Ю.С. Шпанский, А.В. Клищенко*

*НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

Сделана оценка возможных последствий аварий с потерей теплоносителя (LOCA) и потерей течения теплоносителя (LOFA) в системе охлаждения первой стенки проектируемого термоядерного источника нейтронов (ДЕМО-ТИН). Рассмотрены сценарии протекания аварий как с прекращением термоядерной реакции, так и с её продолжением. Предложено несколько вариантов конструкции аварийной системы охлаждения (АСОХ) первой стенки (ПС). Сделана оценка температуры аварийного сегмента ПС как при срабатывании АСОХ, так и при охлаждении его тепловым излучением.

**Ключевые слова:** ДЕМО-ТИН, первая стенка, аварии с потерей теплоносителя, аварии с потерей течения теплоносителя, оценка температуры, теплофизические расчёты.

## THE ASSESSMENT OF HEATING UP RATE AND MAXIMAL TEMPERATURE IN THE FIRST WALL OF THE FNS INSTALLATION AT LOCA AND LOFA IN ITS COOLANT SYSTEM

*A.Yu. Pashkov, Yu.S. Shpanskiy, A.V. Klishchenko*

*NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

The appraisal of possible consequences of loss of coolant and loss of flow accidents (LOCA and LOFA) in the first wall coolant system of demonstration fusion neutron source (DEMO-FNS) was done. The accident scenarios were considered for cases when fusion reaction was continuing and terminated. Several variants of the first wall emergency cooling system (ECS) design were offered. The assessment of faulted first wall segment temperature under the ECS operation and under its cooling by thermal radiation was done.

**Key words:** DEMO-FNS, first wall, loss of coolant accident, loss of flow accident, temperature assessment, thermal-physical calculations.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-1-75-82

### ВВЕДЕНИЕ

Первая стенка (ПС) — один из наиболее энергонапряжённых элементов токамака установки ДЕМО-ТИН, проект которой предложен в [1]. Основные параметры токамака:

Большой радиус $R$ , м . . .	3,2
Аспектное отношение $A = R/a$ . . .	3,2
Число секций $N$ . . .	18
Мощность реакции синтеза в токамаке $P_{th}$ , МВт . . .	~40
Объём плазмы $V$ , м <sup>3</sup> . . .	~150
Средняя нейтронная нагрузка на первую стенку $P_f/S$ , МВт/м <sup>2</sup> . . .	~0,2
Площадь первой стенки $S_{пс}$ , м <sup>2</sup> . . .	180

Одной из наиболее вероятных аварий в ПС, как ожидается, может быть авария с потерей её охлаждения. При этом различают аварии типа LOCA (с потерей теплоносителя) и LOFA (с потерей течения теплоносителя). Некоторые из возможных причин таких аварий приведены в [2]. Для уточнения характеристик ПС в [3] были проведены расчёты её температуры для нескольких сценариев протекания аварии.

Настоящая работа выполнена с целью более детального исследования характеристик ПС при аварии типа LOCA или LOFA, определения времени достижения температуры плавления конструкционных материалов (потери работоспособности) ПС. Сделана оценка условий, при которых ПС сохранит работоспособность после аварии типа LOCA или LOFA.

### КОНСТРУКЦИЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ

Особенностями ПС являются:

— большие тепловые нагрузки на поверхность ПС  $q_1$ ;

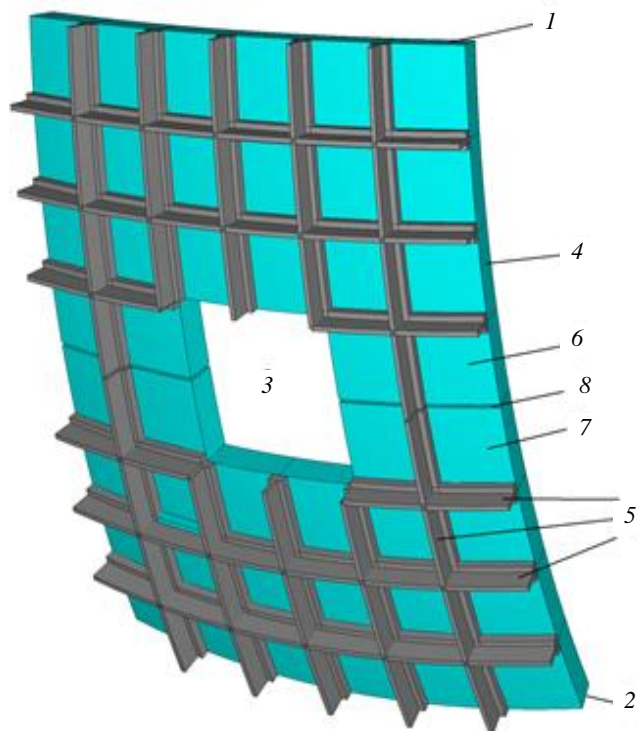


Рис. 1. Схема одной из секций наружной части первой стенки: 1 — граница с верхним дивертором; 2 — граница с нижним дивертором; 3 — экваториальный порт; 4 — граница с соседней секцией; 5 — рёбра жёсткости; 6 — верхний сегмент секции; 7 — нижний сегмент секции; 8 — граница между верхним и нижним сегментами

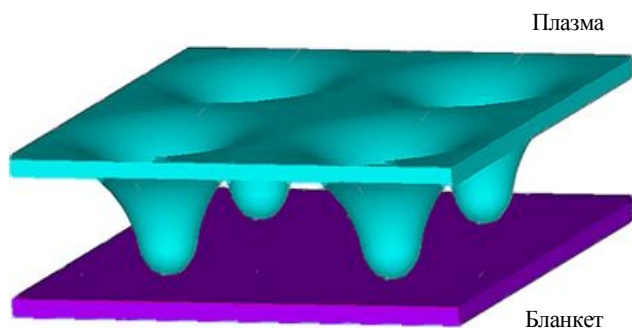


Рис. 2. Первая стенка в разрезе

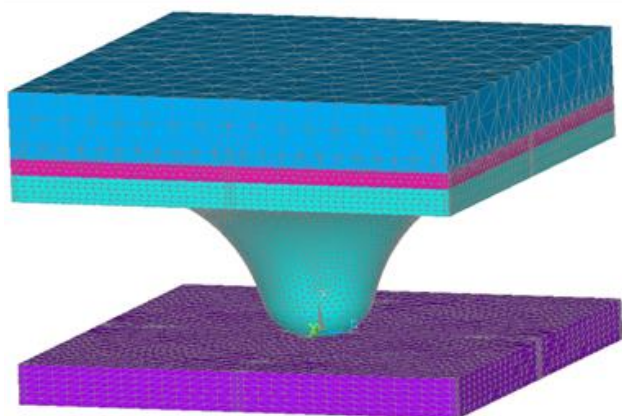


Рис. 3. Сечение первой стенки по периметру тайла

$q_{т\text{ сред}}$  — средняя тепловая нагрузка 1,5 МВт/м<sup>2</sup>;  
 $q_{т\text{ макс}}$  — максимальная (пиковая) тепловая нагрузка может достигать 5 МВт/м<sup>2</sup>;

— стационарный режим работы;

— минимальная толщина сечений ПС из-за необходимости минимальной толщины конструкционных материалов и водяного теплоносителя для улучшения нейтронного баланса в гибридной системе.

Исходя из этого, предложена следующая конструкция: ПС состоит из внутренней ( $S_{ПС\text{ внут}} \sim 60\text{ м}^2$ ) и наружной ( $S_{ПС\text{ нар}} \sim 120\text{ м}^2$ ) частей, каждая из которых разделяется на 18 секций. Далее рассматривается наружная часть ПС. Схема одной из её секций представлена на рис. 1 (вид со стороны бланкета).

Ширина секции в самой широкой части  $\sim 1,46\text{ м}$ , в самой узкой (верхней и нижней частях)  $\sim 1,12\text{ м}$ . Длина секции вдоль наружной образующей  $\sim 5\text{ м}$ , толщина  $H_{ПС} = 11,65\text{ мм}$ .

Секция разделяется на два приблизительно равных сегмента (верхний и нижний), каждый из которых имеет автономную систему охлаждения (СОХ). Охлаждение сегментов производится водой с температурой на входе  $T_{вх} = 50\text{ °С}$  и давлением на входе 1 МПа, температура воды на выходе  $T_{вых} = 100\text{ °С}$ .

ПС представляет собой замкнутую оболочку тороидальной формы, ограничивающую плазменную камеру, где происходит термоядерная реакция. ПС состоит из двух тонкостенных оболочек, скреплённых между собой (рис. 2, 3). Плоская стальная оболочка с рёбрами жёсткости (сталь 316L, обозначена фиолетовым цветом) обращена к бланкету. Оболочка, состоящая из слоёв меди (Cu, обозначена розовым цветом) и бронзы (CuCrZr, обозначена голубым цветом), обращена к плазме. Между оболочками течёт теплоноситель (вода). Бронзовая оболочка (со стороны плазмы) имеет множество углублений (пуклёвок) по всей площади оболочки, расположенных рядами на равном расстоянии друг от друга. Стальная оболочка толщиной 1,5 мм, усиленная рёбрами жёсткости, выполняет функцию каркаса для оболочки из бронзы и меди с установленными на ней бериллиевыми тайлами, которые обозначены синим цветом.

К бронзовой оболочке ПС посредством промежуточного медного слоя (обозначен розовым цветом на рис. 3) прикрепляются без зазоров бе-

риллиевые тайлы. Форма тайлов сопрягается с формой углублений и поверхностью бронзовой оболочки. Основные размеры сечения ПС обозначены на рис. 4.

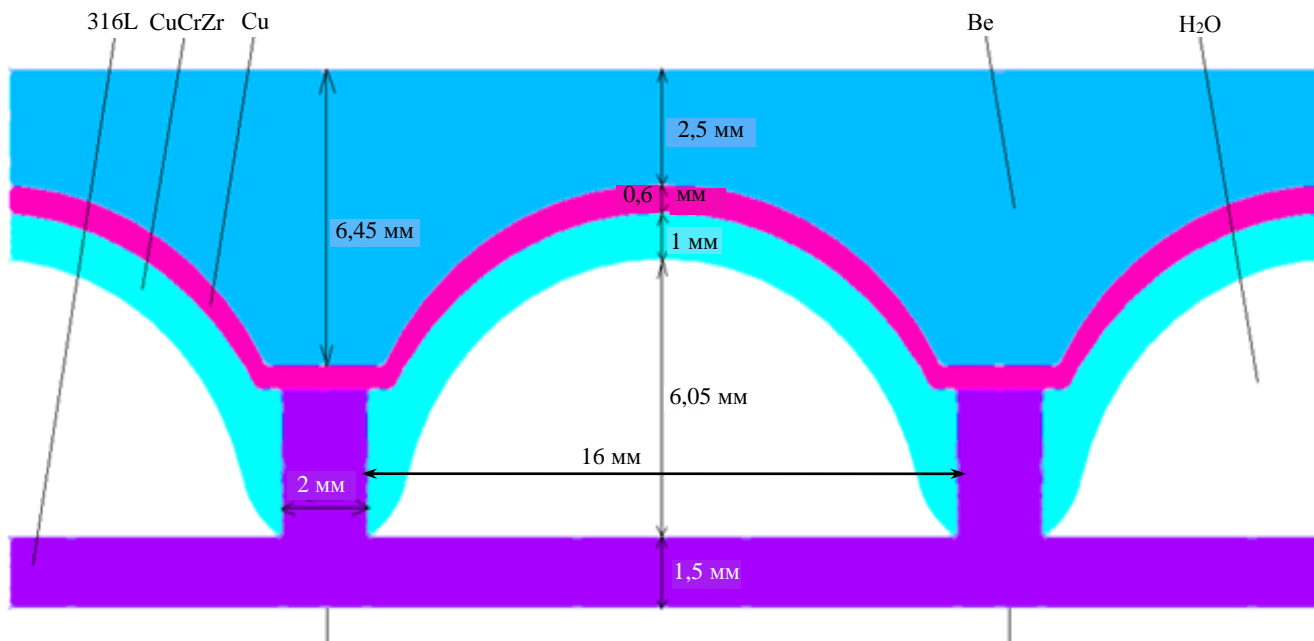


Рис. 4. Основные размеры сечения первой стенки

### ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЁТА

Для дальнейшего анализа необходимо учесть предложения, сделанные в [1]:

- установка ДЕМО-ТИН снабжена устройством автоматического гашения термоядерной реакции в плазме при любой аварии (в том числе аварии СОХ), угрожающей её безопасности;
- система охлаждения ПС включает в себя аварийную СОХ (АСОХ), которая включается в случае отказа основной СОХ (подобно тому, как это сделано для охлаждения активной зоны ядерного реактора).

Как представляется, возможны несколько вариантов конструкции АСОХ:

- АСОХ-Ц — самостоятельный контур циркуляции со своими насосами и теплообменниками, который включается в случае отказа СОХ (например, по причине разрыва трубопровода или отказа циркуляционных насосов). Время её работы не ограничено при условии сохранения герметичности контура циркуляции;

- АСОХ-В включает с себя ёмкости с водой под давлением. В случае падения давления в СОХ (разрыв трубопровода, истечение воды из неё или отказ циркуляционных насосов) вода впрыскивается в ПС и далее сливается, при этом она не кипит;

- АСОХ-П выполнена аналогично АСОХ-В, но вода при попадании в ПС кипит и охлаждает её, а затем пар сбрасывается в конденсатор.

При равенстве площади верхнего и нижнего сегментов секции ПС средняя тепловая мощность одного сегмента в момент времени  $\tau$

$$Q_{\text{сег}}(\tau) = q_{\text{т сред}} S_{\text{сег}} + Q_{\text{внут}}(\tau), \text{ Вт}, \quad (1)$$

где  $S_{\text{сег}} = S_{\text{ПС нар}} / (2N)$  — площадь поверхности сегмента, обращённая к плазме,  $3,3 \text{ м}^2$ ;  $Q_{\text{внут}}(\tau)$  — мощность внутреннего тепловыделения в конструкционных материалах сегмента, Вт.

При отсутствии тепловой нагрузки из плазмы (нет термоядерной реакции)  $q_{\text{т сред}} = 0$  и  $Q_{\text{сег}}(\tau)$  будет определяться  $Q_{\text{внут}}(\tau)$ , которая зависит от мощности нейтронной нагрузки на ПС и длительности её действия. В общем случае параметры ПС после аварии будут зависеть от параметров бланкета, но в связи с неопределённостью его конструкции влияние бланкета на ПС учитывать не будем.

При потере охлаждения под действием внутренних и внешних источников тепла ПС начнёт разогреваться. Так как ПС состоит из материалов с различной теплопроводностью, внутреннее тепловыделение в которых будет также различным, то скорость разогрева её различных участков будет различной. Однако при сравнительно малой толщине ПС и учитывая, что её материалы обладают высокой теплопроводностью,

стью, можно считать её однородной и обладающей усреднёнными теплофизическими параметрами. При таком допущении можно считать, что скорость разогрева ПС будет одинаковой во всех участках.

Как следует из описания конструкции ПС, она состоит из пяти материалов, которые обозначим цифрами: 1 — сталь; 2 — вода; 3 — медь; 4 — бронза; 5 — бериллий. Внутреннее удельное объёмное тепловыделение в этих материалах обозначим  $q_{v1}$ ,  $q_{v2}$ ,  $q_{v3}$ ,  $q_{v4}$  и  $q_{v5}$ . Строго говоря, в различных участках ПС величины  $q_{vi}$  будут различаться. В дальнейшем будем пользоваться средними значениями  $q_{vi}$ , которые считаем постоянными.

Объём конструкционных материалов в одном сегменте ПС определится как  $V_1 = V_{\text{сег}}x_1$ ;  $V_2 = V_{\text{сег}}x_2$ ;  $V_3 = V_{\text{сег}}x_3$ ;  $V_4 = V_{\text{сег}}x_4$ ;  $V_5 = V_{\text{сег}}x_5$ , где  $V_{\text{сег}} = S_{\text{сег}}H_{\text{ПС}}$  — объём одного сегмента ПС —  $0,039 \text{ м}^3$ ;  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  — средняя объёмная доля материала в ПС.

Используя введённые обозначения, получаем

$$Q_{\text{внут}}(\tau) = V_{\text{сег}} \sum_1^5 q_{vi} x_i = V_{\text{сег}} q_v(\tau), \text{ Вт}, \quad (2)$$

где  $q_v(\tau)$  — среднее внутреннее удельное объёмное тепловыделение в сегменте,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ .

При длительной нейтронной нагрузке величина  $q_v(\tau)$  достигает своего максимума  $q_{v \text{ макс}}$ . Считаем, что в момент аварии ( $\tau = 0$ )  $q_v(\tau) = q_{v \text{ макс}}$ ,  $Q_{\text{внут}}(\tau) = Q_{\text{внут макс}}$  и  $Q_{\text{сег}}(\tau) = Q_{\text{сег макс}}$ .

Удельная объёмная теплоёмкость (количество тепла, которое необходимо для нагрева одной единицы объёма на один градус) каждого материала определяется как

$$C_{vi} = C_{\text{масс}_i} r_i, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C}), \quad (3)$$

где  $C_{\text{масс}_i}$  — массовая теплоёмкость  $i$ -го материала,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$ ;  $r_i$  — плотность  $i$ -го материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Удельную среднюю объёмную теплоёмкость материала ПС, рассматриваемого как однородный, можно оценить как [4]

$$C_v = \sum_1^5 C_{vi} x_i, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C}). \quad (4)$$

Предполагаем, что при воздействии тепловой нагрузки из плазмы на аварийный сегмент теплообменом с окружающими конструкциями (остальные секции ПС, дивертор, бланкет) можно пренебречь.

При отсутствии тепловой нагрузки из плазмы определяющим фактором для процессов в аварийном сегменте становится теплообмен с окружающими конструкциями.

Запишем уравнение теплового баланса для элемента ПС с площадью  $S$  при средней тепловой нагрузке для периода времени  $\Delta\tau$  при отсутствии теплообмена с окружающими конструкциями:

$$(q_{\text{т сред}} + q_v(\tau)H_{\text{ПС}})S\Delta\tau = SH_{\text{ПС}}C_v\Delta T, \quad (5)$$

где  $\Delta T$  — подогрев элемента ПС,  $\text{°C}$ .

Решение (5) даёт  $\Delta T/\Delta\tau$  — скорость разогрева ПС:

$$\Delta T/\Delta\tau = (q_{\text{т}} + q_v(\tau)H_{\text{ПС}})/(H_{\text{ПС}}C_v), \text{ °C}/\text{с}. \quad (6)$$

Если тепловая нагрузка из плазмы  $q_{\text{т}}$  отсутствует, то (6) упрощается:

$$\Delta T/\Delta\tau = q_v(\tau)/C_v, \text{ °C}/\text{с}. \quad (7)$$

Введём понятие средней внутренней удельной накопленной энергии  $e_{\text{ПС}}(\tau)$  — это полное количество тепловой энергии в  $\text{Дж}/\text{м}^3$ , которое выделится из единицы объёма ПС в процессе остаточного тепловыделения в ней к моменту времени  $\tau$ . Её можно определить как

$$e_{\text{ПС}}(\tau) = \int_0^{\tau} q_v(\tau) d\tau, \text{ Дж}/\text{м}^3. \quad (8)$$

С учётом (7) и (8) температура ПС к моменту  $\tau$

$$T_{\text{ПС}} = T_0 + e_{\text{ПС}}(\tau)/C_v, \text{ °C}, \quad (9)$$

где  $T_0$  — начальная температура ПС в момент аварии.

Рассмотрим случай, когда один из сегментов ПС потерял охлаждение и разогревается под действием внутреннего тепловыделения, термоядерная реакция прекратилась, а остальные сегменты ПС охлаждаются и сохраняют постоянную температуру. В этом случае теплообмен между потерявшим охлаждение сегментом и остальными сегментами осуществляется тепловым излучением. Теплообмена с бланкетом нет.

Уравнение теплового баланса для элемента ПС с площадью  $S$  запишется в виде

$$SH_{\text{ПС}}q_v(\tau) - Sc_0\varepsilon_{\text{пр}}Y((T_{\text{ав сег}}(\tau)/100)^4 - (T_0/100)^4) = Q_p, \text{ Вт}, \quad (10)$$

где  $c_0$  — коэффициент излучения абсолютно чёрного тела  $5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;  $\varepsilon_{\text{пр}}$  — приведённая степень черноты при излучении между поверхностью аварийного сегмента и остальными сегментами:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = 1/(1/\varepsilon_{\text{ав сег}} + 1/\varepsilon_{\text{ПС}} - 1), \quad (11)$$

где  $\varepsilon_{\text{ав сег}}$  — степень черноты поверхности аварийного сегмента;  $\varepsilon_{\text{ПС}}$  — степень черноты поверхности остальных сегментов;  $Y$  — угловой коэффициент излучения в условиях, когда аварийный сегмент со всех сторон окружён остальными сегментами,  $Y = 1$ ;  $T_{\text{ав сег}}(\tau)$  — температура поверхности аварийного сегмента, К;  $Q_p$  — тепловая мощность, идущая на разогрев элемента ПС с площадью  $S$ . В момент, когда  $Q_p = 0$ , прекращается разогрев аварийного сегмента. С учётом зависимости  $q_v(\tau)$  и  $T_{\text{ав сег}}(\tau)$  уравнение (10) решается методом итераций.

При заданных характеристиках ДЕМО-ТИН оценочные значения параметров материалов ПС при стационарном режиме работы [1, 3, 5] приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Параметры материалов первой стенки

Материал	$X_i, \%$	$q_{vi}, \text{ МВт}/\text{м}^3$	$C_{vi}, \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$
Сталь (с рёбрами жёсткости)	18	7	4,11
Вода	29	4	4,03
Медь	6	7	3,56
Бронза	10	6	3,56
Бериллий	37	3	3,78

Значения  $C_{vi}$  даны при температуре  $\sim 250 \text{ °C}$ , что близко к  $T_0$ . Свойства бронзы считаем близкими к свойствам меди.

Необходимо учесть, что возможны два варианта разогрева ПС:

— герметичность ПС не нарушена, в конструкции находится вода. В этом случае удельную среднюю объёмную теплоёмкость материала ПС обозначим  $C_{v \text{ полн}}$ , максимальное среднее внутреннее удельное объёмное тепловыделение (в момент аварии) —  $q_{v \text{ макс полн}}$ , текущее значение —  $q_{v \text{ полн}}$ , а среднюю внутреннюю удельную накопленную энергию —  $e_{\text{ПС полн}}$ ;

— вода из ПС потеряна, в конструкции остались только металлы. В этом случае удельную среднюю объёмную теплоёмкость материала ПС обозначим  $C_{v \text{ ме}}$ , максимальное среднее внутреннее удельное объёмное тепловыделение (в момент аварии) —  $q_{v \text{ макс ме}}$ , текущее значение —  $q_{v \text{ ме}}$ , среднюю внутреннюю удельную накопленную энергию —  $e_{\text{ПС ме}}$ .

Значения теплофизических параметров одного сегмента ПС приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Теплофизические параметры сегмента первой стенки

Параметр	Вода в первой стенке	Нет воды в первой стенке
Удельная средняя объёмная теплоёмкость, $\text{МДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$	$C_{v \text{ полн}} = 3,88$	$C_{v \text{ ме}} = 2,71$
Начальное среднее внутреннее удельное объёмное тепловыделение, $\text{МВт}/\text{м}^3$	$q_{v \text{ макс полн}} = 4,55$	$q_{v \text{ ме}} = 3,39$
$Q_{\text{внут макс}}, \text{ МВт}$	0,18	0,13
$Q_{\text{сег макс}}, \text{ МВт}$	5,18	5,13

После гашения термоядерной реакции внутреннее тепловыделение в конструкционных материалах ПС резко уменьшается по сравнению с значением при стационарном режиме работы, затем уменьшение  $q_v(\tau)$  идёт более медленно. Зависимость  $q_v(\tau)$  и  $e_{\text{ПС}}(\tau)$  при наличии воды в ПС и при её отсутствии приведена в табл. 3.

Сделаем также следующие допущения [3].

Процесс истечения воды из потерявшей герметичность СОХ ПС займёт несколько секунд или десятков секунд при аварии типа LOCA, и столько же времени займёт процесс остановки течения при аварии типа LOFA. Все это время будет продолжаться процесс охлаждения ПС. Предполагаем, что разогрев конструкционных материалов ПС начнётся сразу после момента начала аварии.

Т а б л и ц а 3. Среднее внутреннее удельное объёмное тепловыделение и средняя внутренняя удельная накопленная энергия в первой стенке

Время после аварии $\tau$	$q_v(\tau)$ , % от $q_{v \text{ макс}}$	Вода в первой стенке		Нет воды в первой стенке	
		$q_{v \text{ полн}}(\tau)$ , МВт/м <sup>3</sup>	$e_{\text{ПС полн}}(\tau)$ , МДж/м <sup>3</sup>	$q_{v \text{ ме}}(\tau)$ , МВт/м <sup>3</sup>	$e_{\text{ПС ме}}(\tau)$ , МДж/м <sup>3</sup>
0 с	100	4,55	0	3,39	0
1 с	2,8	0,127	4,55	0,095	3,39
1 мин	2,6	0,118	11,8	0,088	8,8
1 ч	1,6	0,073	$4,3 \cdot 10^2$	0,054	$2,6 \cdot 10^2$
1 сут	0,42	0,0191	$4,24 \cdot 10^3$	0,014	$3,08 \cdot 10^3$
14 сут	0,12	0,0055	$1,8 \cdot 10^4$	0,004	$1,32 \cdot 10^4$
30 сут	0,11	0,005	$2,53 \cdot 10^4$	0,0037	$1,85 \cdot 10^4$
60 сут	0,09	0,004	$3,7 \cdot 10^4$	0,003	$2,72 \cdot 10^4$

При стационарном режиме работы максимальная температура бериллиевого тайла  $T_5 \sim 350$  °С, медного слоя  $T_3 \sim 220$  °С, бронзовой оболочки  $T_4 \sim 200$  °С, стальной оболочки  $T_1 \sim 130$  °С, воды  $T_2 \sim 150$  °С. Среднюю температуру ПС в начале аварии (при отсутствии тепловой нагрузки из плазмы) можно оценить по формуле

$$T_0 = \sum_1^5 (C_{vi} x_i T_i) / C_v, \text{ °С.} \quad (12)$$

$T_0$  по уравнению (12)  $\sim 226$  °С. Считаем  $T_0 = 250$  °С. Максимально допустимой температурой ПС считаем  $T_{\text{макс}} = 900$  °С.

### ВОЗМОЖНЫЕ СЦЕНАРИИ ПРОТЕКАНИЯ АВАРИИ

Последовательности событий после аварии типа LOCA и LOFA в сегменте ПС рассмотрены в [3]. В первую очередь, как представляется, необходимо рассмотреть следующие варианты.

Вариант 1. После аварии термоядерная реакция продолжается, охлаждение сегмента ПС потеряно, но вода в нём есть (LOFA).

Вариант 2. Отличается от варианта 1 тем, что после аварии термоядерная реакция продолжается, охлаждение сегмента потеряно и вода из него вытекла (LOCA). По своим последствиям для ПС — самый тяжёлый вариант.

Вариант 3. После аварии нет термоядерной реакции, охлаждение сегмента осуществляется с помощью АСОХ-Ц. Температура сегмента практически не меняется.

Вариант 4. После аварии нет термоядерной реакции, охлаждение сегмента осуществляется с помощью АСОХ-В. Температура сегмента практически не меняется.

Вариант 5. После аварии нет термоядерной реакции, охлаждение сегмента осуществляется с помощью АСОХ-П. Температура сегмента практически не меняется.

Вариант 6. После аварии нет термоядерной реакции, охлаждение сегмента потеряно и отсутствует вода в нём. Происходит разогрев сегмента за счёт остаточного тепловыделения в материалах.

### РАСЧЁТНЫЙ АНАЛИЗ АВАРИЙ ТИПА LOCA И LOFA В ПЕРВОЙ СТЕНКЕ

**Теплообмен аварийного сегмента с окружающими конструкциями отсутствует.** Вариант 1. Скорость разогрева сегмента определяется по (6), но в формулу необходимо подставлять  $C_{v \text{ полн}}$  и  $q_{v \text{ полн}}$ . При  $q_{\text{т сред}} = 1,5$  МВт/м<sup>2</sup>  $\Delta T/\Delta \tau = 34,4$  °С/с в начальный момент после аварии. В дальнейшем при сохранении тепловой нагрузки скорость разогрева будет изменяться незначительно — определяющим для неё является  $q_{\text{т}}$ , а не  $q_{v \text{ полн}}$ . Разогрев сегмента в таком режиме возможен не более нескольких секунд — начнётся кипение воды. Дальнейшее развитие событий может развиваться по следующим вариантам: кипение воды и невозможность сброса пара вызовут рост давления в сегменте и его разрушение. Термоядерная реакция прекратится, и начнётся разогрев сегмента по варианту 5 или 6.

Вариант 2. Скорость разогрева сегмента определяется по (6), но в формулу необходимо подставлять  $C_{v \text{ ме}}$  и  $q_{v \text{ ме}}$ . При  $q_{\text{т сред}} \Delta T/\Delta \tau = 48,7$  °С/с в начальный момент после аварии. В дальнейшем при сохранении тепловой нагрузки скорость разогрева сегмента будет изменяться незначительно — определяющим для неё является  $q_{\text{т}}$ , а не  $q_{v \text{ ме}}$ . При такой скорости разогрева сегмент достигнет  $T_{\text{макс}}$  за  $\sim 13$  с и разрушится.

Вариант 3. При работе АСОХ-Ц считаем, что параметры охлаждающей воды такие же, как и в СОХ. В момент  $\tau$  требуемый расход воды на охлаждение сегмента определится по

$$G_{\text{воды}}(\tau) = q_{v \text{ ме}}(\tau) V_{\text{сег}} / (C_p (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})), \text{ кг/с,} \quad (13)$$

где  $C_p$  — теплоёмкость воды, Дж/(кг·°С). В (13) используется  $q_{v \text{ ме}}(\tau)$ , а не  $q_{v \text{ полн}}(\tau)$ , так как тепловыделение в циркулирующей воде нет. Результаты расчёта варианта 3 представлены в табл. 4, 1.

Т а б л и ц а 4. Требуемые характеристики систем аварийного охлаждения сегмента и температура сегмента после прекращения термоядерной реакции

Время после аварии $\tau$	Вода в первой стенке			Нет воды в первой стенке		
	1. $G_{\text{воды}}$ при работе АСОХ-Ц, кг	2. $M_{\text{воды}}$ , впрыскиваемая АСОХ-В, кг	3. $M_{\text{воды}}$ , впрыскиваемая АСОХ-П, кг	4. $T_{\text{сег}}$ , °С, разогрев начинается при $\tau = 0$	5. $T_{\text{сег}}$ , °С, разогрев начинается при $\tau = 1$ ч	6. $T_{\text{сег}}$ , °С, разогрев начинается при $\tau = 24$ ч
0 с	1	0	0	250	250	250
1 с	0,03	0,6	0,1	251,3	250	250
1 мин	0,025	1,54	0,26	253,2	250	250
1 ч	0,015	45,7	7,6	346	250	250
10 ч	0,013	210	35	693	597	250
1 сут	0,004	540,8	90,4	1386*	1290*	250
2 сут	0,0038	670	112	*	*	516
14 сут	0,0011	2318	387,5	*	*	*
30 сут	0,001	3249	543	*	*	*
60 сут	0,0008	4776	798,4	*	*	*

\* Сегмент ПС разрушен.

Вариант 4. При работе АСОХ-В считаем, что температура впрыскиваемой воды  $T_{\text{вх}} = 20$  °С, на выходе она имеет температуру  $T_{\text{вых}} = 100$  °С. Масса воды, которую должна впрыснуть АСОХ-В к моменту  $\tau$  для предотвращения разогрева сегмента, определяется по

$$M_{\text{воды}} = e_{\text{ПС ме}}(\tau) V_{\text{сег}} / (C_p (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})). \quad (14)$$

В (14) подставляется  $e_{\text{ПС ме}}(\tau)$ , а не  $e_{\text{ПС полн}}(\tau)$ , так как тепловыделения во впрыскиваемой воде нет (см. табл. 4, 2).

Вариант 5. При работе АСОХ-П считаем, что испаряется вся вода, впрыскиваемая в сегмент, затем будет происходить сброс пара (например, через аварийный клапан в конденсатор). Температура сегмента стабилизируется при температуре, близкой к температуре кипения воды  $T_s$ . Так, при давлении воды  $P = 1$  МПа  $T_s = 180$  °С, теплота парообразования  $r_{\text{воды}} = 2,01 \cdot 10^6$  Дж/кг. Масса воды, которую должна впрыснуть АСОХ-П к моменту  $\tau$  для предотвращения разогрева сегмента, равная количеству образующегося пара, определяется по

$$M_{\text{воды}} = e_{\text{ПС ме}}(\tau) V_{\text{сег}} / r_{\text{воды}}, \text{ кг}. \quad (15)$$

В (14) и (15) подставляется  $e_{\text{ПС ме}}(\tau)$ , а не  $e_{\text{ПС полн}}(\tau)$ , так как тепловыделения во впрыскиваемой воде нет (см. табл. 4, 3).

Вариант 6. Происходит разогрев сегмента за счёт остаточного тепловыделения в материалах.

В дальнейшем рассматриваем три различных сценария протекания аварии по варианту 6:

— охлаждение сегмента потеряно сразу после начала аварии, и разогрев сегмента начинается в момент  $\tau = 0$  (см. табл. 4, 4);

— охлаждение сегмента потеряно в момент  $\tau = 1$  ч, а до этого работает одна из АСОХ (см. табл. 4, 5);

— охлаждение сегмента потеряно в момент  $\tau = 24$  ч, а до этого работает одна из АСОХ (см. табл. 4, 6).

Расчёт температуры сегмента  $T_{\text{ав сег}}$  по каждому сценарию производится по

$$T_{\text{ав сег}} = T_0 + e_{\text{ПС ме}}(\tau) / C_{V \text{ ме}}, \text{ °С}, \quad (16)$$

но для каждого сценария необходимо использовать своё значение  $e_{\text{ПС ме}}(\tau)$  (см. табл. 4).

### ТЕПЛООБМЕН МЕЖДУ АВАРИЙНЫМ СЕГМЕНТОМ И ОСТАЛЬНЫМИ СЕГМЕНТАМИ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ТЕПЛОМЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В момент, когда мощность остаточного тепловыделения в аварийном сегменте будет равна мощности теплоотдачи излучением от аварийного сегмента к остальным (неаварийным) сегментам, разогрев аварийного сегмента прекратится и его температура достигнет максимума. В этот момент уравнение (10) запишется в виде

$$q_{V \text{ ме}}(\tau) H_{\text{ПС}} = c_0 \varepsilon_{\text{пр}} ((T_{\text{ав сег}}(\tau) / 100)^4 - (T_0 / 100)^4). \quad (17)$$

Задаём момент  $\tau$  и по табл. 3 определяем  $q_{V \text{ ме}}$ , затем по (16) оцениваем  $T_{\text{ав сег}}$  (для варианта, когда разогрев начинается при  $\tau = 0$ ) и проверяем выполнение равенства (17). В случае невыполнения равенства задаём новое значение  $\tau$ .

Рассматриваем три значения  $\epsilon_{\text{ав сег}}$  и  $\epsilon_{\text{ПС}}$ , считая их равными 0,2, 0,5 и 0,8 (соответственно  $\epsilon_{\text{пр}} = 0,11, 0,33$  и  $0,66$ ), и три значения  $T_0 = 150, 250$  и  $350$  °С. Результаты расчётов  $T_{\text{ав сег}}$  (максимальная температура аварийного сегмента) и время достижения этой температуры  $\tau$  для всех вариантов представлены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5. Максимальная температура аварийного сегмента и время достижения этой температуры

Приведённая степень черноты $\epsilon_{\text{пр}}$	Начальная температура сегмента $T_0$		
	150 °С	250 °С	350 °С
0,11	$T_{\text{ав сег}} = 320$ °С, $\tau = 2,5$ ч	$T_{\text{ав сег}} = 375$ °С, $\tau = 1,6$ ч	$T_{\text{ав сег}} = 442$ °С, $\tau = 0,8$ ч
0,33	$T_{\text{ав сег}} = 238$ °С, $\tau = 0,9$ ч	$T_{\text{ав сег}} = 314$ °С, $\tau = 0,7$ ч	$T_{\text{ав сег}} = 390$ °С, $\tau = 0,6$ ч
0,66	$T_{\text{ав сег}} = 209$ °С, $\tau = 0,6$ ч	$T_{\text{ав сег}} = 287$ °С, $\tau = 0,4$ ч	$T_{\text{ав сег}} = 375$ °С, $\tau = 0,3$ ч

## ВЫВОДЫ

При аварии типа ЛОСА наиболее опасным по своим последствиям является вариант, когда вода в ПС потеряна, а термоядерная реакция продолжается. За время порядка 13 с ПС может разогреться до температуры, когда будет потеряна её работоспособность.

Наличие или отсутствие воды в аварийном сегменте ПС незначительно влияет на скорость его разогрева. Определяющими факторами при этом являются тепловая нагрузка из плазмы и мощность тепловыделения в материалах ПС.

В случае срабатывания любой из предложенных АСОХ удаётся поддерживать температуру аварийного сегмента ПС на приемлемом уровне в течение длительного (до 2 мес) срока. Необходимый запас воды (до 5 т) может быть обеспечен.

При отсутствии охлаждения аварийного сегмента ПС (не срабатывает АСОХ, и аварийный сегмент не излучает тепло к элементам ПС с меньшей температурой) он за время менее 1 сут разогреется до температуры разрушения под действием остаточного тепловыделения в нём.

Если в течение первых суток после аварии сегмент будет охлаждаться АСОХ, а затем её действие прекратится, то сегмент всё равно достигнет температуры разрушения, но за более длительный срок.

Если при разогреве аварийного сегмента остальные сегменты ПС будут охлаждаться, а вакуум в плазменной камере сохранится, то тепловое излучение с аварийного сегмента не позволит ему достичь температуры разрушения.

## 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—18.
2. **Курбатов Д.К., Пашков А.Ю.** Вероятностный анализ тяжелой аварии ИТЭР, вызванной отказом системы охлаждения первой стенки. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 1993, вып. 1—2, с. 12—17.
3. **Пашков А.Ю.** Оценка возможных аварий в первой стенке термоядерного источника нейтронов, вызванных отказами в системе ее охлаждения. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2013, т. 36, вып. 3, с. 96.
4. **Таблицы физических величин.** Справочник. Под ред. И.К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976.
5. **Чиркин В.С.** Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. — М.: Атомиздат, 1968.



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



Юрий Сергеевич Шпанский, начальник отдела, к. техн. н., лауреат премии им. И.В. Курчатова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
Shpanskiy\_YS@nrcki.ru



Андрей Валерьевич Клищенко, н.с., ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
Klischenko\_AV@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2017 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 1, с. 75—82.