УДК 621.039.634

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ УСТАНОВКИ ДЕМО-ТИН ПРИ АВАРИЯХ В СИСТЕМЕ ЕЁ ОХЛАЖДЕНИЯ И В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ, ОБРАЩЁННЫХ К ПЛАЗМЕ

А.Ю. Пашков, Е.А. Филимонова

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Сделана оценка возможных последствий аварий с потерей теплоносителя (LOCA и LOFA) в системах охлаждения вакуумной камеры (ВК) и компонентов, обращённых к плазме (КОП), проектируемого демонстрационного термоядерного источника нейтронов (ДЕМО-ТИН). Рассмотрены сценарии протекания аварий как с прекращением термоядерной реакции, так и с её продолжением. Предложены несколько вариантов конструкции аварийной системы охлаждения (АСО) ВК. Сделана оценка температуры ВК как при срабатывании АСО, так и при пассивном охлаждении ВК и КОП тепловым излучением и конвективным течением воздуха.

Ключевые слова: ДЕМО-ТИН, вакуумная камера, аварии с потерей теплоносителя, оценка температуры, теплофизические расчёты.

THE TRANSITION PROCESSES IN THE VACUUM VESSEL OF THE FNS INSTALLATION AT LOCA AND LOFA IN ITS COOLANT SYSTEM AND IN THE COOLANT SYSTEMS OF PLASMA FACING COMPONENTS

A.Yu. Pashkoff, E.A. Filimonova

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The appraisal of possible consequences for loss of coolant accident (LOCA) and loss of flow accident (LOFA) in the vacuum vessel (VV) coolant system and in the coolant systems of plasma facing components of demonstration fusion neutron source (DEMO-FNS) was done. The accident scenarios at the thermonuclear reaction shutdown and continuation were considered. Several variants of the VV emergency coolant system (ECS) design were offered. The assessment of emergency VV temperature at ECS operation and at VV passive cooling by thermal radiation and convectional air flow was done.

Key words: DEMO-FNS, vacuum vessel, loss of coolant accident, loss of flow accident, temperature assessment, thermal-physical calculations.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-3-78-89

ВВЕДЕНИЕ

Вакуумная камера (ВК) — один из наиболее энергонапряжённых и важных для безопасности элемен-

тов 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 термоядерной реакции в токамаке P_f , МВт. . .	~40
Объём плазмы $V_{пл}$, м ³ . . .	~150
Площадь первой стенки $S_{ПС}$, м ² . . .	~180
Средняя нейтронная нагрузка на первую стенку $P_f/S_{ПС}$, МВт/м ² . . .	~0,2

На рис. 1 представлено вертикальное сечение токамака, из которого видно взаимное расположение его основных элементов. Сечение ВК выделено тёмным цветом, а частично заштриховано.

Одной из наиболее вероятных аварий в ВК, как ожидается, будет авария с потерей её собственного охлаждения или авария с потерей как охлаждения ВК, так и нахо-

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

дящихся в ней тепловыделяющих компонентов, обращённых к плазме (КОП), — первой стенки (ПС), дивертора и бланкета. При этом различают аварии типа LOCA (с потерей теплоносителя) и LOFA (с потерей течения теплоносителя — воды).

Система охлаждения и прогрева (СО) ВК состоит из нескольких контуров. Внутренний контур, охлаждающий непосредственно ВК, состоит из независимых первого и второго внутренних контуров. Тепло от внутренних контуров через промежуточные теплообменники передаётся во внешний контур, который сбрасывает тепло в окружающую среду. Внутренние контуры оборудованы сбросными клапанами, срабатывающими при повышении давления в контурах. Подобным образом выполнены СО КОП. Гидравлическая схема СО ВК показана на рис. 2.

Возможными причинами аварий в любой из рассматриваемых СО могут быть:

- разгерметизация одного или двух внутренних контуров СО;

- потеря циркуляции теплоносителя во внутренних контурах СО. Если СО обладает двумя независимыми внутренними контурами (как СО ВК), то потеря циркуляции теплоносителя в одном из них аварией не является (нагрузку берёт на себя второй внутренний контур);

- потеря теплоотвода от внутренних контуров циркуляции во внешний контур СО.

Настоящая работа выполнена с целью более детального исследования характеристик ВК и КОП при аварии типа LOCA или LOFA, определения скорости их разогрева и возможности плавления конструкционных материалов. Сделана оценка условий, при которых ВК и КОП сохраняют работоспособность после аварии типа LOCA или LOFA.

КОНСТРУКЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ И КОМПОНЕНТОВ, ОБРАЩЁННЫХ К ПЛАЗМЕ

Конструкция ВК. ВК выполняет следующие основные функции:

- к ней крепятся КОП, диагностические и обеспечивающие системы;
- 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.

Корпус ВК — стальная тороидальная конструкция D-образного вертикального сечения из двух коаксиальных оболочек — внутренней, обращённой к КОП, и наружной, обращённой к криостату. Толщина каждой оболочки 30 мм, толщина ВК (расстояние между оболочками, включая их собственную толщину) составляет от 470 мм в её центральной части (в области центрального соленоида) до 850 мм во внешней части (в области бланкета).

Оболочки связаны между собой системой тороидальных и полоидальных рёбер жёсткости. Свободное пространство между оболочками заполнено пластинами из стали 304В7, которые образуют железобетонную нейтронную защиту (ЖВЗ) с соотношением по объёму 70% стали, 30% воды.

Рис. 2. Гидравлическая (двухконтурная) схема подключения секторов вакуумной камеры: — синий — подвод холодного теплоносителя в первом контуре; — красный — отвод нагретого в ВК теплоносителя первого контура; — голубой — подвод холодного теплоносителя во втором контуре; — оранжевый — отвод нагретого в ВК теплоносителя второго контура

Рис. 3. Общий вид сегмента вакуумной камеры

Корпус состоит из 18 сегментов, в каждом из которых есть верхний, нижний и средний патрубок. Общий вид одного сегмента показан на рис. 3. Три сегмента составляют один сектор (всего секторов шесть). Первый и второй внутренние контуры СО ВК охлаждаются по три сектора.

На рис. 4 схематично показано предполагаемое расположение пластин (девять штук) ЖВЗ в центральной части ВК. Во внешней части ЖВЗ число пластин в самой толстой части ВК — 17.

На рис. 5 схематично показано предполагаемое расположение пластин ЖВЗ в области входного коллектора теплоносителя.

Рис. 4. Железородная защита ВК со стороны центрального соленоида

Рис. 5. Входной коллектор теплоносителя

Основные параметры корпуса:

Высота H , м . . .	8,55
Внутренний диаметр (в области центрального соленоида) $D_{\text{вн}}$, м . . .	1,4
Максимальный диаметр (с учётом патрубка) $D_{\text{макс}}$, м . . .	13,14
Площадь поверхности внутренней оболочки $S_{\text{вн}}$, м^2 . . .	286
Площадь поверхности наружной оболочки (без учёта патрубков) $S_{\text{нар}}$, м^2 . . .	355
Площадь поверхности наружной оболочки (с учётом патрубков) $S_{\text{нар tot}}$, м^2 . . .	500
Объём оболочек и пространства между оболочками $V_{\text{БК}}$, м^3 . . .	157
Масса стали в ВК $M_{\text{ст ВК}}$, кг . . .	$8,68 \cdot 10^5$
Масса воды в ВК $M_{\text{воды ВК}}$, кг . . .	$4,47 \cdot 10^4$

Рис. 6. Принципиальная схема подачи и отвода теплоносителя в ВК

Перфорация пластин ЖВЗ выполнена в шахматном порядке. Распределение расхода воды на внутреннюю и внешнюю части ВК может регулироваться различной перфорацией раздаточных пластин коллектора. На рис. 6 показана схема подачи теплоносителя в ВК.

Конструкция первой стенки. ПС состоит из внутренней и наружной частей, которые разделяются на 18 секций [2]. Длина секции вдоль наружной образующей ~5 м, толщина $\delta_{\text{ПС}} = 11,65$ мм. Охлаждение ПС производится водой с температурой на входе 50 °С и давлением на входе 1 МПа, температура воды на выходе 100 °С.

ПС представляет собой замкнутую оболочку тороидальной формы, ограничивающую плазменную камеру, где происходит термоядерная реакция (ТР). Конструкционные материалы ПС — сталь, медь, бронза, бериллий. В дальнейшем для простоты расчёта считаем ПС стальной. Её полная масса (без воды) $M_{\text{ПС}} = 1,2 \cdot 10^4$ кг.

Конструкция дивертора. Двухнулевой дивертор состоит из отдельных кассет — 18 сверху и 18 снизу, охлажда-

даемых водой. Конструкционные материалы кассеты — сталь и бериллий, масса одной кассеты (без воды) 5000 кг. В дальнейшем для простоты расчёта считаем кассету стальной. Полная масса дивертора (без воды) $M_{\text{див}} = 1,8 \cdot 10^5$ кг.

Конструкция blankets. Blanket состоит из отдельных модулей, охлаждаемых водой. Каждый модуль содержит делящиеся изотопы, сталь и другие конструкционные материалы. В дальнейшем для определения теплофизических параметров считаем blanket стальным. В то же время blanket обладает собственной тепловой мощностью и остаточным тепловыделением. Полная масса blankets (без воды) $M_{\text{бл}} = 3 \cdot 10^5$ кг.

Система охлаждения и прогрева ВК. СО предназначена для обеспечения требуемого температурного состояния ВК. Она должна обеспечить надёжный отвод тепловой мощности, обусловленной как объёмным тепловыделением в материалах ВК, так и воздействием тепловых потоков на её поверхность при всех режимах работы ВК. Кроме того, в аварийном режиме СО ВК должна обеспечить отвод остаточного тепловыделения как от самой ВК, так и от находящихся в ней КОП даже в условиях отсутствия их собственного охлаждения.

В каждом секторе ВК установлены подводящий и отводящий коллекторы. При двухконтурном варианте внутреннего контура СО секторы подключены к внешнему контуру СО через один, т.е. формируют два независимых контура, что продиктовано требованиями безопасности.

На представленной гидравлической схеме (см. рис. 2) не показаны патрубки, отводящие часть воды на охлаждение ЖВЗ сварных швов между отдельными секторами. На данном этапе расход воды на охлаждение сварных швов включён в общий расход теплоносителя в ВК, а его доля в общем расходе пропорциональна доле, которую занимает канал охлаждения сварного шва в общем канале охлаждения сектора ВК.

В штатном режиме максимальная температура поверхности ВК 100 °С (в местах установки blankets и дивертора температура может быть выше). В режиме прогрева максимальная температура поверхности ВК 200 °С.

В штатном режиме температура воды на входе в ВК $T_{\text{вх}} = 70$ °С при её давлении 1 МПа, температура воды на выходе из ВК $T_{\text{вых}} = 100$ °С. Температура насыщения воды $T_{\text{нас}} = 180$ °С.

ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ

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

- установка ДЕМО-ТИН снабжена устройством автоматического гашения ТР в плазме при любой аварии (в том числе аварии СО), угрожающей её безопасности;
- системы охлаждения ВК и КОП включают в себя аварийные СО (АСО), которые включаются в случае отказа основной СО (подобно тому, как это сделано для охлаждения активной зоны ядерного реактора).

Как представляется, возможны несколько вариантов конструкции АСО:

- АСО-Ц — самостоятельный контур циркуляции, со своими насосами и теплообменниками, который включается в случае отказа внутренних контуров циркуляции СО (например, по причине разрыва трубопровода или отказа циркуляционных насосов). Время её работы не ограничено при условии сохранения герметичности контура циркуляции (повреждённый трубопровод будет отсечён задвижкой);
- АСО-В включает с себя ёмкости с водой под давлением. В случае падения давления в СО (разрыв трубопровода, истечение воды из неё или отказ циркуляционных насосов) вода впрыскивается в ВК или КОП и далее сливается, при этом она не кипит;
- АСО-П выполнена аналогично АСО-В, но вода при попадании в ВК или КОП кипит и охлаждает их, а затем пар сбрасывается в конденсатор.

РАССМАТРИВАЕМЫЕ СЦЕНАРИИ ПРОТЕКАНИЯ АВАРИИ

В первую очередь, как представляется, необходимо рассмотреть следующие группы сценариев.

Первая группа — потеря охлаждения только ВК:

— сценарий 1. После аварии ТР продолжается, охлаждение ВК потеряно, но герметичность СО сохраняется и вода в ВК есть (LOFA);

— сценарий 2. После аварии ТР продолжается, но нарушена герметичность СО (LOCA). Срабатывает одна из трёх АСО;

— сценарий 3. После аварии ТР продолжается, но нарушена герметичность СО и не срабатывает ни одна из трёх АСО. Воды в ВК нет, и начинается разогрев её металлоконструкций. По своим последствиям для ВК, как представляется, самый тяжёлый вариант;

— сценарий 4. После аварии нет ТР, охлаждение ВК потеряно, но герметичность СО сохраняется и вода в ВК есть (LOFA). Начинается разогрев ВК под действием остаточного тепловыделения в её материалах;

— сценарий 5. После аварии нет ТР, охлаждение ВК потеряно и отсутствует вода в ней. Происходит разогрев металлоконструкций за счёт остаточного тепловыделения в них.

Вторая группа — потеря охлаждения ВК сопровождается потерей охлаждения одного из КОП, любых двух КОП или всех трёх КОП одновременно.

Сценарий 6. Из множества вероятных сценариев рассмотрим самый тяжёлый по последствиям — одновременная потеря охлаждения всех КОП и ВК. При этом считаем, что вода также потеряна. Разогрев КОП и ВК происходит под действием остаточного тепловыделения в них. Вариант с продолжением ТР не рассматривается: в [2] показано, что в таком случае при потере охлаждения КОП они быстро разогреваются до температуры разрушения, после чего ТР становится невозможной.

Рис. 7. Предполагаемые тепловые нагрузки на вакуумную камеру

МЕТОДИКА РАСЧЁТА И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

ВК в штатном режиме. Для определения параметров СО ВК, таких как полный расход охлаждающей воды, перепад её давления в тракте и требуемый подогрев, необходимо установить геометрические характеристики канала течения теплоносителя в ЖВЗ и знать как тепловые нагрузки на внутреннюю стенку ВК, так и объёмное тепловыделение в ЖВЗ. Схема распределения тепловых нагрузок на ВК представлена на рис. 7.

Внутренняя оболочка ВК находится под действием теплового излучения с ПС, дивертора и модулей бланкета. Под действием потока нейтронов и гамма-квантов из плазмы происходит внутреннее тепловыделение в материалах ВК.

Уравнение теплового баланса для ВК запишется в виде

$$Q_{\text{ПС изл}} + Q_{\text{див изл}} + Q_{\text{бл изл}} + Q_{\text{креп}} + Q_{\text{ВК 0}} = Q_{\text{охл}} + Q_{\text{пот}}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{ПС изл}} = q_{\text{с ПС}} S_{\text{ВК-ПС}}$ — мощность теплового потока излучением с ПС на внутреннюю оболочку ВК; $q_{\text{с ПС}}$ — средняя плотность теплового потока излучением с ПС на

внутреннюю оболочку ВК, Вт/м²; $S_{\text{ВК-ПС}}$ — площадь части внутренней оболочки ВК, на которую падает тепловое излучение с ПС, м²; $Q_{\text{див изл}} = q_{\text{с див}} S_{\text{ВК-див}}$ — мощность теплового потока излучением с касет дивертора на внутреннюю оболочку ВК; $q_{\text{с див}}$ — средняя плотность теплового потока излучением с касет дивертора на внутреннюю оболочку ВК, Вт/м²; $S_{\text{ВК-див}}$ — площадь части внутренней оболочки ВК, на которую падает тепловое излучение с касет дивертора, м²; $Q_{\text{бл изл}} = q_{\text{с бл}} S_{\text{ВК-бл}}$ — мощность теплового потока излучением с модулей бланкета на внутреннюю оболочку ВК; $q_{\text{с бл}}$ — плотность теплового потока излучением с модулей бланкета на внутреннюю оболочку ВК, Вт/м²; $S_{\text{ВК-бл}}$ — площадь части внутренней оболочки ВК, на которую падает тепловое излучение с модулей бланкета, м²; $Q_{\text{креп}}$ — тепловая мощность, поступающая на ВК через крепления дивертора, ПС и бланкета; $Q_{\text{ВК 0}}$ — мощность внутреннего тепловыделения в ВК в штатном режиме. Эта величина не является постоянной, растёт с увеличением нейтронной нагрузки и времени её действия. В дальнейшем будем рассматривать максимальное

значение $Q_{\text{ВК } 0}$, которое будет достигнуто через несколько лет работы ДЕМО-ТИН; $Q_{\text{охл}}$ — тепловая мощность, отводимая от ВК её СО; $Q_{\text{пот}}$ — тепловая мощность потерь, поступающая от ВК к другим конструкциям токамака (опорам, криогенной тепловой защите, оболочке криостата и др.).

Плотность теплового потока при теплообмене излучением между ПС, дивертором, бланкетом и ВК

$$q_{s \text{ ПС}} = c_0 \varepsilon_{\text{пр}} ((T_{\text{ПС}}/100)^4 - (T_{\text{ВК-ПС}}/100)^4), \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

где c_0 — коэффициент излучения абсолютно чёрного тела $5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $\varepsilon_{\text{пр}}$ — приведённая степень черноты при излучении между поверхностями; $T_{\text{ПС}}$ — температура поверхности ПС, обращённой к поверхности внутренней оболочки ВК, К; $T_{\text{ВК-ПС}}$ — температура поверхности внутренней оболочки ВК, обращённой к ПС, К;

$$q_{s \text{ див}} = c_0 \varepsilon_{\text{пр}} ((T_{\text{див}}/100)^4 - (T_{\text{ВК-див}}/100)^4), \text{ Вт/м}^2, \quad (3)$$

где $T_{\text{див}}$ — температура поверхности дивертора, обращённой к поверхности внутренней оболочки ВК, К; $T_{\text{ВК-див}}$ — температура поверхности внутренней оболочки ВК, обращённой к поверхности дивертора, К;

$$q_{s \text{ бл}} = c_0 \varepsilon_{\text{пр}} ((T_{\text{бл}}/100)^4 - (T_{\text{ВК-бл}}/100)^4), \text{ Вт/м}^2, \quad (4)$$

где $T_{\text{бл}}$ — температура поверхности бланкета, обращённой к поверхности внутренней оболочки ВК, К; $T_{\text{ВК-бл}}$ — температура поверхности части внутренней оболочки ВК, обращённой к поверхности бланкета, К.

Для оценки мощности $Q_{\text{креп}}$ сделаем предположение, что

$$Q_{\text{креп}} = 0,3(Q_{\text{ПС изл}} + Q_{\text{див изл}} + Q_{\text{бл изл}}), \text{ Вт}; \quad (5)$$

$$Q_{\text{ВК } 0} = q_{v0} V_{\text{ВК}}, \text{ Вт}, \quad (6)$$

где q_{v0} — средняя удельная плотность тепловыделения в ВК в штатном режиме, Вт/м^3 .

Основываясь на опыте проектирования аналогичной ЖВЗ для ИТЭР, можно предположить, что удельная плотность тепловыделения $q_{v0}(x)$ на толщине ВК 18 см спадает на порядок. Отсюда $q_{v0}(x)$ в ВК может быть записана в виде

$$q_{v0}(x) = q_{v0 \text{ max}}(x=0) \exp(-12,67x), \text{ Вт/м}^3, \quad (7)$$

где x — расстояние по нормали от поверхности внутренней оболочки ВК, м; $q_{v0}(x=0)$ — максимальная удельная плотность тепловыделения на поверхности внутренней оболочки ВК ($x=0$), Вт/м^3 . При переменной толщине ВК введём понятие её средней толщины, которая определяется как

$$\Delta_{\text{ср}} = V_{\text{ВК}}/S_{\text{вн}}, \text{ м}. \quad (8)$$

Введём также понятие промежуточной (расчётной) оболочки с площадью $S_{\text{пр}}(x)$, коаксиальной внутренней и наружной оболочкам: $S_{\text{вн}} \leq S_{\text{пр}}(x) \leq S_{\text{нар}}$, м^2 , причём при $x=0$ $S_{\text{пр}} = S_{\text{вн}}$, а при $x = \Delta_{\text{ср}}$ $S_{\text{пр}} = S_{\text{нар}}$. Тогда можно записать

$$Q_{\text{ВК } 0} = \int_0^{\Delta_{\text{ср}}} q_{v0}(x) S_{\text{пр}}(x) dx. \quad (9)$$

Необходимый расход воды на охлаждение ВК $G_{\text{охл}}$ можно оценить по

$$Q_{\text{охл}} = G_{\text{охл}}(T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})C_{\text{воды}}, \quad (10)$$

где $C_{\text{воды}}$ — средняя массовая теплоёмкость охлаждающей воды в ВК, $\text{Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$; $G_{\text{охл}}$ — расход охлаждающей воды, кг/с .

ВК состоит практически из двух материалов — стали и воды. Удельную плотность тепловыделения в этих материалах обозначим $q_{v \text{ ст}}(x)$, $q_{v \text{ воды}}(x)$. Строго говоря, в различных участках ВК эти величины будут различаться. В дальнейшем будем пользоваться средними значениями $q_{v \text{ ст}}(x)$ и $q_{v \text{ воды}}(x)$, которые считаем постоянными для каждого значения x .

Объём конструкционных материалов в ВК определится как $V_{\text{ст}} = V_{\text{ВК}} y_{\text{ст}}$, $V_{\text{воды}} = V_{\text{ВК}} y_{\text{воды}}$, где $y_{\text{ст}} = 70\%$, $y_{\text{воды}} = 30\%$ — средние объёмные доли материалов в ВК. В дальнейшем предполагаем, что ВК выполнена из однородного материала с усреднёнными свойствами и усреднённой удельной плотностью тепловыделения в нём. Для подобного предположения есть следующие основания: конструкционные материалы распределены по объёму ВК гомогенно и обладают высокой теплопроводностью. Считаем, что при аварии скорость разогрева ВК (как будет показано, относительно малая) будет практически одинаковой во всех её частях.

Используя введённые обозначения, запишем

$$q_{v0 \max}(x=0) = q_{v \text{ ст}}(x=0)u_{\text{ст}} + q_{v \text{ воды}}(x=0)u_{\text{воды}}, \text{ Вт/м}^3. \quad (11)$$

Считаем, что в момент аварии ($\tau = 0$) $q_{v0}(x=0)$ достигает своего максимального значения $q_{v0 \max}$. В [2] была сделана оценка максимальных значений $q_{v0 \max}(x=0)$ для материалов ПС, нейтронная нагрузка на которую практически равна нагрузке на внутреннюю оболочку ВК. Принимаем максимальные значения $q_{v \text{ ст}}(x=0) = 7 \text{ МВт/м}^3$, $q_{v \text{ воды}}(x=0) = 4 \text{ МВт/м}^3$, тогда по (11) $q_{v0 \max} = 6,1 \text{ МВт/м}^3$.

Оценка по (7) и (9) даёт $Q_{\text{ВК}0} = 146,5 \text{ МВт}$, по (6) $q_{v0} = 0,93 \text{ МВт/м}^3$.

Плотность теплового потока, падающего с ПС, дивертора и бланкета на внутреннюю оболочку ВК на разных участках её поверхности будет различной, так как температуры $T_{\text{ПС}}$, $T_{\text{див}}$, $T_{\text{бл}}$, $T_{\text{ВК-ПС}}$, $T_{\text{ВК-див}}$ и $T_{\text{ВК-бл}}$ и значения $\varepsilon_{\text{пр}}$ также будут различными на разных участках поверхности. Оценки, выполненные при проектировании ДЕМО-ТИН, и расчёты по (1)—(4) дают следующие минимальные и максимальные значения величин, характеризующих процесс теплообмена с ВК излучением в рабочем режиме, которые приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Характеристики теплообмена излучением с ВК

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
$T_{\text{ПС}}, \text{ К}$	373	423
$T_{\text{див}}, \text{ К}$	473	573
$T_{\text{бл}}, \text{ К}$	573	673
$T_{\text{ВК-ПС}}, \text{ К}$	343	373
$T_{\text{ВК-див}}, \text{ К}$	373	423
$T_{\text{ВК-бл}}, \text{ К}$	423	473
$\varepsilon_{\text{пр}}$	0,2	0,4
$S_{\text{ВК-ПС}}, \text{ м}^2$	120	160
$S_{\text{ВК-див}}, \text{ м}^2$	80	100
$S_{\text{ВК-бл}}, \text{ м}^2$	40	60
$Q_{\text{ПС изл}}, \text{ кВт}$	7,5	66
$Q_{\text{див изл}}, \text{ кВт}$	16,3	200
$Q_{\text{бл изл}}, \text{ кВт}$	26,2	235

Анализ данных табл. 1 показывает, что в штатном режиме работы суммарная мощность, поступающая к ВК путём теплообмена излучением с КОП и через их крепления $1,3(Q_{\text{ПС изл}} + Q_{\text{див изл}} + Q_{\text{бл изл}})$, незначительна по сравнению с собственной тепловой мощностью ВК, и в дальнейшем этой величиной пренебрегаем.

ВК в аварийном режиме — потеря собственного охлаждения. Предполагаем, что при потере воды из ВК и/или прекращении ТР тепловыделение будет только в стали. При этих условиях в начальный момент аварии $\tau = 0$ мощность внутреннего тепловыделения в ВК $Q_{\text{ВК ст}}(\tau = 0) = Q_{\text{ВК}0}u_{\text{ст}} = 102,6 \text{ МВт}$.

Введём понятие суммарной теплоёмкости ВК (количество тепла, которое необходимо для её нагрева на один градус). Для однородного материала ВК она определяется как

$$C_{\text{ВК сумм}} = C_{\text{ст}}M_{\text{ст ВК}} + C_{\text{воды}}M_{\text{воды ВК}}, \text{ Дж/}^\circ\text{С}, \quad (12)$$

где $C_{\text{ст}}$ — средняя массовая теплоёмкость стали, Дж/(кг·°С).

Если вода из ВК будет потеряна, то суммарная теплоёмкость стальной конструкции $C_{\text{ВК ст}} = C_{\text{ст}}M_{\text{ст ВК}}$.

Аналогично определяем суммарные теплоёмкости ПС, дивертора и бланкета.

Суммарная теплоёмкость компонентов токамака, Дж/°С:

Вакуумная камера с водой $C_{\text{ВК сумм}} \dots$	$6,38 \cdot 10^8$
Вакуумная камера без воды $C_{\text{ВК ст}} \dots$	$4,51 \cdot 10^8$
Первая стенка без воды $C_{\text{ПС}} \dots$	$6,24 \cdot 10^6$
Дивертор без воды $C_{\text{див}} \dots$	$9,36 \cdot 10^7$
Бланкет без воды $C_{\text{бл}} \dots$	$1,56 \cdot 10^8$
Все рассмотренные компоненты без воды $C_{\text{tot}} \dots$	$7,07 \cdot 10^8$

Сделаем предположение, что при аварии ВК может находиться в двух режимах: теплообмен с окружающими конструкциями отсутствует, и теплообмен с окружающими конструкциями есть.

Запишем уравнение теплового баланса для ВК при тепловой нагрузке, соответствующей штатному режиму работы, и сохранении в ней воды для периода времени $\Delta\tau$ при отсутствии охлаждения и теплообмена с окружающими конструкциями (вся выделяющаяся в ВК тепловая энергия идёт на её разогрев). Охлаждение КОП сохраняется:

$$Q_{\text{ВК } 0} \Delta\tau = C_{\text{ВК сумм}} \Delta T, \text{ Дж}, \quad (13)$$

где ΔT — подогрев ВК за период времени $\Delta\tau$, °C. Решение уравнения (13) даёт $(\Delta T/\Delta\tau)$ — скорость разогрева ВК:

$$\Delta T/\Delta\tau = Q_{\text{ВК } 0}/C_{\text{ВК сумм}}, \text{ °C/c}. \quad (14)$$

Если вода из ВК будет потеряна и/или прекратится ТР, то

$$\Delta T/\Delta\tau = Q_{\text{ВК ст}}/C_{\text{ВК ст}}, \text{ °C/c}. \quad (15)$$

При отсутствии тепловой нагрузки из плазмы ВК будет разогреваться под действием внутреннего остаточного тепловыделения в ней.

Введём понятие накопленной энергии $E_{\text{ВК}}(\tau)$ — это полное количество тепловой энергии в Дж, которое после аварии и прекращения ТР выделится из объёма ВК в процессе остаточного тепловыделения в ней к моменту времени τ . Так как остаточного тепловыделения в воде нет, то

$$E_{\text{ВК}}(\tau) = \int_0^{\tau} Q_{\text{ВК ст}}(\tau) d\tau, \text{ Дж}. \quad (16)$$

С учётом уравнений (14) и (16) температура ВК при сохранении в ней воды к моменту τ

$$T_{\text{ВК}} = T_0 + E_{\text{ВК}}(\tau)/C_{\text{ВК сумм}}, \text{ °C}. \quad (17)$$

Принимаем $T_0 = 100$ °C — начальная температура ВК в момент аварии. При отсутствии воды в ВК

$$T_{\text{ВК}} = T_0 + E_{\text{ВК}}(\tau)/C_{\text{ВК ст}}, \text{ °C}. \quad (18)$$

По мере роста температуры ВК и снижения её тепловой мощности всё большее значение будут приобретать процессы теплообмена с окружающими конструкциями, характеризуемые величиной $Q_{\text{пот}}$. Предполагаем, что $Q_{\text{пот}}$ определяется радиационным теплообменом между наружной оболочкой ВК (точнее, панелями криогенной тепловой защиты, которые при аварии будут иметь температуру ВК) и внутренней поверхностью криостата. Остальными потерями тепла (через опоры ВК, на разогрев смежных металлоконструкций, бетона) пренебрегаем. Учёт этих потерь даст меньшее значение максимальной $T_{\text{ВК}}$. В этом случае

$$Q_{\text{пот}}(\tau) = S_{\text{нар пот}} c_0 \varepsilon_{\text{пр}} Y((T_{\text{ВК}}(\tau)/100)^4 - (T_{\text{кр}}/100)^4), \quad (19)$$

где Y — угловой коэффициент излучения (в условиях, когда ВК со всех сторон окружена криостатом, $Y = 1$); $T_{\text{кр}}$ — температура внутренней поверхности криостата, К. При равенстве тепловой мощности ВК и мощности $Q_{\text{пот}}(\tau)$

$$Q_{\text{ВК ст}}(\tau) = Q_{\text{пот}}(\tau) \quad (20)$$

разогрев ВК прекратится и начнётся её остывание. По уравнениям (19) и (20) можно определить момент достижения максимальной $T_{\text{ВК}}$ и саму эту температуру.

ВК в аварийном режиме — потеря как собственного охлаждения, так и охлаждения КОП. Следует отметить, что тепловая мощность ПС, дивертора и ВК возрастает при увеличении времени их эксплуатации до аварии. Считаем, что максимальная тепловая мощность ПС $Q_{\text{ПС}}(\tau = 0) = 10$ МВт, дивертора $Q_{\text{див}}(\tau = 0) = 15$ МВт и ВК $Q_{\text{ВК ст}}(\tau = 0) = 102,6$ МВт. После прекращения ТР (начала аварии) их тепловая мощность резко снижается и в дальнейшем будет только уменьшаться. Тепловая мощность blankets в момент аварии $Q_{\text{ол}}(\tau = 0) = 500$ МВт.

При заданных условиях остаточное тепловыделение будет только в металлоконструкциях, а не в воде. ВК может находиться в двух режимах: теплообмен с окружающими конструкциями отсутствует, и теплообмен с окружающими конструкциями есть.

Запишем уравнение теплового баланса для ВК и КОП за период времени $\Delta\tau$ при отсутствии их охлаждения, отсутствии воды в них и теплообмена с окружающими конструкциями (вся выделяющаяся в ВК и КОП тепловая энергия идёт на их разогрев). Считаем, что в любой момент времени температуры ВК и КОП равны:

$$(Q_{\text{ПС}}(\tau) + Q_{\text{див}}(\tau) + Q_{\text{бл}}(\tau) + Q_{\text{ВК ст}}(\tau))\Delta\tau = C_{\text{tot}}\Delta T, \text{ Дж.} \quad (21)$$

Обозначим $Q_{\text{ПС}}(\tau) + Q_{\text{див}}(\tau) + Q_{\text{бл}}(\tau) + Q_{\text{ВК ст}}(\tau) = Q_{\text{tot}}(\tau)$. Решение уравнения (21) даёт $(\Delta T/\Delta\tau)$ — скорость разогрева ВК и КОП:

$$\Delta T/\Delta\tau = Q_{\text{tot}}(\tau)/C_{\text{tot}}, \text{ }^\circ\text{C/c.} \quad (22)$$

Используя суммарную накопленную энергию $E_{\text{tot}}(\tau) = E_{\text{ПС}}(\tau) + E_{\text{див}}(\tau) + E_{\text{бл}}(\tau) + E_{\text{ВК ст}}(\tau)$, получаем

$$T_{\text{ВК}} = T_0 + E_{\text{tot}}(\tau)/C_{\text{tot}}, \text{ }^\circ\text{C.} \quad (23)$$

При наличии радиационного теплообмена с окружающей средой по уравнениям (19) и (20) можно определить момент достижения максимальной $T_{\text{ВК}}$ и саму эту температуру.

Оценка мощности остаточного тепловыделения и накопленной энергии в компонентах токамака. В табл. 2 приведена зависимость мощности остаточного тепловыделения и накопленной энергии в ПС, диверторе и ВК от времени после начала аварии. Для удобства указаны отдельно суммарная тепловая мощность и накопленная энергия для ВК, суммарная тепловая мощность для ПС, дивертора и ВК $Q_{\text{див}}(\tau)$ и суммарная накопленная энергия для них $E_{\text{див}}(\tau)$.

Т а б л и ц а 2. Значения суммарной тепловой мощности и накопленной энергии для первой стенки, дивертора и вакуумной камеры

Время после аварии τ	$Q_{\text{див}}(\tau)$ и $Q_{\text{ВК ст}}(\tau)$ в процентах от их максимальной мощности	$Q_{\text{ВК ст}}(\tau)$, Вт	$E_{\text{ВК}}(\tau)$, Дж	$Q_{\text{див}}(\tau)$, Вт	$E_{\text{див}}(\tau)$, Дж
0 с	100	$1,03 \cdot 10^8$	0	$1,28 \cdot 10^8$	0
1 с	2,8	$2,9 \cdot 10^6$	$1,03 \cdot 10^8$	$3,6 \cdot 10^6$	$1,28 \cdot 10^8$
1 мин	2,6	$2,7 \cdot 10^6$	$2,68 \cdot 10^8$	$3,35 \cdot 10^6$	$3,33 \cdot 10^8$
1 ч	1,6	$1,65 \cdot 10^6$	$7,97 \cdot 10^9$	$2,05 \cdot 10^6$	$9,9 \cdot 10^9$
1 сут	0,42	$4,33 \cdot 10^5$	$9,42 \cdot 10^{10}$	$5,38 \cdot 10^5$	$1,17 \cdot 10^{11}$
14 сут	0,12	$1,24 \cdot 10^5$	$4,07 \cdot 10^{11}$	$1,54 \cdot 10^5$	$5,06 \cdot 10^{11}$
30 сут	0,11	$1,13 \cdot 10^5$	$5,71 \cdot 10^{11}$	$1,4 \cdot 10^5$	$7,1 \cdot 10^{11}$
60 сут	0,09	$0,93 \cdot 10^5$	$8,38 \cdot 10^{11}$	$1,15 \cdot 10^5$	$1,04 \cdot 10^{12}$

Для blankets, содержащего делящиеся изотопы, характер изменения остаточного тепловыделения будет не таким, как у ПС, дивертора и ВК.

Сделаем предположение, что характер изменения тепловой мощности blankets после аварии будет таким же, как у реактора РБМК-1000 после останова. Зависимость величин $Q_{\text{бл}}(\tau)$ и $E_{\text{бл}}(\tau)$ от времени после аварии приведена в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Значения тепловой мощности и накопленной энергии для blankets

Время после аварии τ	$Q_{\text{бл}}(\tau)$ в процентах от его максимальной мощности	$Q_{\text{бл}}(\tau)$, Вт	$E_{\text{бл}}(\tau)$, Дж
0 с	100	$5 \cdot 10^8$	0
5 с	98	$4,9 \cdot 10^8$	$2,45 \cdot 10^9$
10 с	86	$4,3 \cdot 10^8$	$4,75 \cdot 10^9$
30 с	38	$1,9 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^{10}$
1 мин	16	$0,8 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^{10}$
3 мин	7,8	$3,9 \cdot 10^7$	$2,22 \cdot 10^{10}$
10 мин	6,2	$3,1 \cdot 10^7$	$3,69 \cdot 10^{10}$
30 мин	5,1	$2,6 \cdot 10^7$	$0,71 \cdot 10^{11}$
1 ч	3,8	$1,9 \cdot 10^7$	$1,12 \cdot 10^{11}$
3 ч	1,5	$0,8 \cdot 10^7$	$2,09 \cdot 10^{11}$
10 ч	0,6	$0,3 \cdot 10^7$	$3,48 \cdot 10^{11}$
1 сут	0,4	$0,2 \cdot 10^7$	$4,74 \cdot 10^{11}$
3 сут	0,3	$0,15 \cdot 10^7$	$0,78 \cdot 10^{12}$
10 сут	0,2	$0,11 \cdot 10^7$	$1,57 \cdot 10^{12}$
30 сут	0,12	$0,06 \cdot 10^7$	$3,04 \cdot 10^{12}$
60 сут	0,08	$0,04 \cdot 10^7$	$4,6 \cdot 10^{12}$

Значения тепловой мощности и накопленной энергии для ВК и КОП суммарно приведены в табл. 4.

Сделаем также следующие допущения.

Процесс истечения воды из потерявшей герметичность СО займёт несколько секунд или десятки секунд при аварии типа LOCA, и столько же времени займёт процесс остановки течения при аварии типа LOFA. Всё это время будет продолжаться процесс охлаждения ВК и КОП. В запас расчёта предполагаем, что разогрев конструкционных материалов ВК и КОП начнётся сразу после момента аварии.

Т а б л и ц а 4. Полная тепловая мощность и накопленная энергия для ВК и КОП суммарно

Время после аварии τ	$Q_{\text{tot}}(\tau)$, Вт	$E_{\text{tot}}(\tau)$, Дж
0	$6,28 \cdot 10^8$	0
1 с	$5,03 \cdot 10^8$	$5,5 \cdot 10^8$
5 с	$4,93 \cdot 10^8$	$2,45 \cdot 10^9$
10 с	$4,33 \cdot 10^8$	$4,8 \cdot 10^9$
30 с	$1,93 \cdot 10^8$	$1,13 \cdot 10^{10}$
1 мин	$0,83 \cdot 10^8$	$1,52 \cdot 10^{10}$
30 мин	$2,82 \cdot 10^7$	$0,75 \cdot 10^{11}$
1 ч	$2,07 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^{11}$
10 ч	$0,42 \cdot 10^7$	$3,53 \cdot 10^{11}$
1 сут	$0,24 \cdot 10^7$	$5,66 \cdot 10^{11}$
10 сут	$0,11 \cdot 10^7$	$1,92 \cdot 10^{12}$
30 сут	$0,071 \cdot 10^7$	$3,6 \cdot 10^{12}$
60 сут	$0,04 \cdot 10^7$	$5,41 \cdot 10^{12}$

При радиационном теплообмене наружной поверхности ВК с внутренней поверхностью криостата предполагаем $S_{\text{нар tot}} = 500 \text{ м}^2$, $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,1$ и $T_{\text{кр}} = 100 \text{ °С}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Расчёт параметров ВК в штатном режиме. Оценка по уравнению (10) даёт $G_{\text{охл}} = 1165 \text{ кг/с}$. Расход воды на охлаждение одного сектора ВК $G_{\text{сек}} = G_{\text{охл}}/6 = 194 \text{ кг/с}$. В трубопроводе $D_y = 250 \text{ мм}$ скорость воды составит $\sim 4 \text{ м/с}$, что вполне приемлемо и не приведёт к большим гидравлическим потерям при её прокачке через ВК.

Расчёт параметров ВК при потере только её охлаждения и при отсутствии теплообмена с окружающими конструкциями. Сценарий 1. Скорость разогрева ВК определяется по уравнению (14). $\Delta T/\Delta \tau = 0,16 \text{ °С/с}$. При $T_0 = 100 \text{ °С}$ температура T_s будет достигнута через $\sim 500 \text{ с}$, и начнётся кипение воды в ВК. Если ТР не прекратится, возможны следующие варианты развития событий:

— сбросной клапан в СО не откроется, и давление в ВК будет расти. Возможен разрыв ВК или внутренних контуров циркуляции. В этих условиях ТР прекратится и начнётся разогрев ВК под действием остаточного тепловыделения в металлоконструкциях (сценарий 3);

— сбросной клапан откроется, и пар из ВК будет поступать в аварийный конденсатор (авария локализована). Время испарения всей воды $\tau_{\text{исп}}$ можно оценить по

$$\tau_{\text{исп}} = r_{\text{воды}} M_{\text{воды}} / Q_{\text{ВК } 0}, \quad (24)$$

где $r_{\text{воды}} = 2,01 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ — теплота парообразования воды.

При наличии в ВК $M_{\text{воды}} = 44,7 \text{ т}$ (не считая воды во внутренних контурах циркуляции) на её испарение потребуется $\sim 615 \text{ с}$. В этот период $T_{\text{ВК}} \sim T_s$.

Если ТР не прекратится к моменту испарения всей воды, то рост температуры ВК продолжится хотя бы до отепления магнитных катушек, затем ТР наконец прекратится и дальнейшее развитие аварии продолжится по сценарию 3.

Сценарий 2. Возможны следующие варианты развития аварии:

— срабатывает АСО-Ц. Работа ВК и параметры в ней практически не отличаются от работы в штатном режиме;

— срабатывает АСО-В. Во время её работы параметры в ВК практически не отличаются от работы в штатном режиме. При исчерпании запаса воды в АСО-В развитие аварии продолжится по сценарию 3;

— срабатывает АСО-П. Во время её работы параметры в ВК практически не отличаются от работы в штатном режиме. При исчерпании запаса воды в АСО-П развитие аварии продолжится по сценарию 3. При равных запасах воды в АСО-В и АСО-П последняя может охлаждать ВК в течение более длительного периода времени после аварии.

Сценарий 3. Скорость разогрева ВК определяется по уравнению (15). $\Delta T/\Delta \tau = 0,23 \text{ °С/с}$, и $T_{\text{ВК}}$ достигнет $300\text{—}400 \text{ °С}$ за $870\text{—}1300 \text{ с}$, после чего продолжение ТР представляется невозможным (хотя бы из-за отепления магнитных катушек). Дальнейшее развитие аварии по сценарию 5.

Сценарий 4. Скорость разогрева ВК определяется по уравнению (17). Результаты расчётов, представленные в табл. 5 (столбцы № 1 и № 2) показывают, что через ~10 ч после аварии начнётся кипение воды в ВК и её температура стабилизируется. Количество воды $M_{\text{кип}}$, которое выкипит к моменту τ , можно оценить по формуле

$$M_{\text{кип}} = (E_{\text{ВК}}(\tau) - E_{\text{ВК}}(\tau^*)) / r_{\text{воды}}, \quad (25)$$

где $E_{\text{ВК}}(\tau^*)$ — накопленная энергия к моменту начала кипения воды в ВК, Дж. При наличии в ВК $M_{\text{воды}} = 44,7$ т приблизительно через 2 сут вся вода в ВК выкипит и начнётся разогрев металлоконструкций. В этот период $T_{\text{ВК}} \sim T_s$.

Дальнейший расчёт ведётся по

$$T_{\text{ВК}} = T_s + (E_{\text{ВК}}(\tau) - E_{\text{ВК}}(\tau^{**})) / C_{\text{ВК ст}}, \quad (26)$$

где τ^{**} — время, когда вся вода в ВК выкипит. За время $\tau^{***} = 14$ сут ВК достигнет температуры $T_{\text{ВК}} = 770$ °С, что можно считать началом её разрушения.

Сценарий 5. Скорость разогрева ВК определяется по уравнению (18). Результаты представлены в табл. 5, столбец № 3. За время $\tau^{***} = 7$ сут ВК достигнет температуры $T_{\text{ВК}} = 700$ °С, что можно считать началом её разрушения.

Расчёт параметров ВК в аварийном режиме при потере только её охлаждения с учётом теплообмена с окружающими конструкциями. Сценарий 5. Разогрев ВК под действием остаточного тепловыделения в ней по мере роста её температуры будет сопровождаться теплообменом с окружающими конструкциями. Наибольший вклад в этот процесс будет вносить радиационный теплообмен с внутренней поверхностью криостата, при этом наружная поверхность криостата будет охлаждаться конвективным потоком воздуха. Расчёт ведётся по уравнениям (19) и (20). Через 32 ч после начала аварии с полной потерей воды из ВК (столбец № 3 табл. 5) её температура достигнет $T_{\text{ВК}} = 370$ °С, а тепловая мощность составит $Q_{\text{ВК ст}} = 4,2 \cdot 10^5$ Вт. При заданных величинах $S_{\text{нар tot}}$, $\epsilon_{\text{пр}}$ и $T_{\text{кр}}$ мощность тепловых потерь, определяемая радиационным теплообменом между наружной оболочкой ВК и внутренней поверхностью криостата составит по (19) $Q_{\text{пот}} = 4,3 \cdot 10^5$ Вт. При достижении равенства $Q_{\text{ВК ст}} = Q_{\text{пот}}$ дальнейший рост $T_{\text{ВК}}$ прекратится.

Расчёт параметров ВК при потере её охлаждения и охлаждения КОП при отсутствии теплообмена с окружающими конструкциями. Сценарий 6. Скорость разогрева ВК определяется по уравнению (23). Результаты представлены в табл. 5, столбец № 4. За время $\tau^{***} = 1$ сут ВК достигнет температуры $T_{\text{ВК}} = 900$ °С, что можно считать началом её разрушения.

Т а б л и ц а 5. Параметры вакуумной камеры при её разогреве под действием остаточного тепловыделения

Время после аварии τ	№ 1 $T_{\text{ВК}}$, °С, при сохранении в ней воды	№ 2 $M_{\text{кип}}$, кг, количество выкипевшей воды	№ 3 $T_{\text{ВК}}$, °С, при отсутствии в ней воды, но сохранении воды в КОП	№ 4 $T_{\text{ВК}}$, °С, при отсутствии в ней и КОП воды
0 с	100	0	100	100
1 с	100,2	0	100,2	100,8
1 мин	100,4	0	100,6	121,5
1 ч	112,2	0	117,7	270
10 ч	184,3 ¹	0	220	600
1 сут	184,3	20 700	308	900 ³
2 сут	184,3 ²	55 000 ²	464	
7 сут	570		698 ³	
14 сут	770 ³			

¹Начало кипения воды в ВК.

²Вся вода в ВК выкипит.

³В этот момент начинается разрушение ВК.

Расчёт параметров ВК в аварийном режиме при потере её охлаждения и охлаждения КОП с учётом теплообмена с окружающими конструкциями. Сценарий 6. Разогрев ВК под действием остаточного тепловыделения в ней и КОП по мере роста её температуры будет сопровождаться теплообменом с окружающими конструкциями. Наибольший вклад в этот процесс будет вносить радиационный теплообмен с внутренней поверхностью криостата, при этом наружная поверхность криостата будет охлаждаться конвективным потоком воздуха. Расчёт ведётся по уравнениям (19) и (20). Через 17 ч после начала аварии с полной потерей воды из ВК и КОП (см. столбец № 4 табл. 5) её температура достигнет $T_{\text{ВК}} = 770$ °С, тепловая мощность составит $Q_{\text{ВК ст}} = 3,1 \cdot 10^6$ Вт. При заданных величинах $S_{\text{нар tot}}$, $\epsilon_{\text{пр}}$ и $T_{\text{кр}}$ мощность тепловых

потерь, определяемая радиационным теплообменом между наружной оболочкой ВК и внутренней поверхностью криостата, составит по уравнению (19) $Q_{\text{пот}} = 3,1 \cdot 10^6$ Вт. При достижении равенства $Q_{\text{ВК ст}} = Q_{\text{пот}}$ дальнейший рост $T_{\text{ВК}}$ прекратится.

ВЫВОДЫ

Предложенная конструкция ВК позволяет обеспечить её работоспособность как в штатном режиме работы, так и в аварийном режиме. При аварии с потерей охлаждения ВК, но с сохранением охлаждения КОП, и при срабатывании любой аварийной системы охлаждения ВК её температура не превысит температуру в штатном режиме работы.

ВК способна обеспечить отвод остаточного тепловыделения в КОП при аварии с потерей их охлаждения, но при сохранении охлаждения самой ВК. Менее чем через 1 мин после аварии с потерей охлаждения КОП суммарная мощность остаточного тепловыделения в КОП и ВК будет меньше, чем тепловая мощность ВК в штатном режиме работы.

При аварии с потерей теплоносителя из ВК, но с сохранением охлаждения КОП начнётся разогрев ВК под действием остаточного тепловыделения в ней. Охлаждение ВК будет обеспечиваться радиационной теплоотдачей от её наружной поверхности к криостату, а криостат будет охлаждаться конвективным потоком воздуха. Температура ВК не превысит 370 °С, что позволит избежать её повреждения.

При аварии с потерей теплоносителя не только из ВК, но и из КОП все они будут разогреваться под действием остаточного тепловыделения в них. В таком режиме температура ВК и КОП может достичь температуры их плавления. Если охлаждение ВК и КОП будет обеспечиваться только радиационной теплоотдачей к криостату, то поддержание их температуры ниже температуры плавления потребует такой мощности теплоотдачи от наружной поверхности криостата, которая не может быть обеспечена только конвективным потоком воздуха.

REFERENCES

1. **Azizov E.A. et al.** DEMO-FNS: concepts of magnet system and vacuum chamber. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2015, vol. 38, issue 2, p. 5 (in Russian).
2. **Pashkov A.Yu.** Analysis of possible accidents in the first wall of the FNS installation, initiated by refusions in its coolant system. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2013, vol. 36, issue 3, p. 96 (in Russian).

AUTHORS

Pashkoff A.Yu. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; A_Yu_Pashkoff@mail.ru
Filimonova E.A. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; alb@fc.iterru.ru

Received 7 March 2017
 Problems of Atomic Science and Technology
 Ser. Thermonuclear Fusion, 2017, vol. 40, issue 3, pp. 78—89