

УДК 621.039.6

КОНСТРУКЦИЯ ПАНЕЛИ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ МАГНИТОВ ДЕМО-ТИН С ПРОТИВОАВАРИЙНЫМ УСТРОЙСТВОМ

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

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Предложена конструкция панели криогенной тепловой защиты (КТЗ) сверхпроводниковых магнитов (СМ) с противоаварийным устройством, обеспечивающим работоспособность панели в случае её смещения от проектного положения. Выполнен расчёт теплообмена между смещённой панелью и поверхностью СМ. Сделан вывод, что тепловая нагрузка на СМ в этом случае не превысит допустимую и СМ сохранит работоспособность.

Ключевые слова: панель криогенной тепловой защиты, авария со смещением панели, противоаварийное устройство, тепловой расчёт.

PANEL STRUCTURE OF THERMAL SHIELD WITH ANTI-ACCIDENT DEVICE FOR DEMO-FNS SUPERCONDUCTING MAGNETS

B.V. Kuteev, A.Yu. Pashkov, Yu.S. Shpankiy

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The design of the cryogenic thermal shield panel of superconducting magnets (SM) with an emergency device providing the operability of the panel in case of its displacement from the design position is proposed. The calculation of heat exchange between the displaced panel and the SM surface is performed. It is concluded that the thermal load on the SM in this case will not exceed the permissible value and the SM will maintain its operability.

Key words: thermal shield panel, accident with panel displacement, anti-accident device, thermal calculations.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-1-29-34

ВВЕДЕНИЕ

В [1] рассмотрены несколько вариантов конструкции криогенной тепловой защиты (КТЗ) сверхпроводниковых магнитов (СМ) проектируемой установки ДЕМО-ТИН. Анализ конструкций КТЗ как на действовавших термоядерных установках (Т-7, Т-15, EAST, SST-1), так и на проектируемых (ИТЭР, ДЕМО-ТИН) показал большое влияние КТЗ на работоспособность и надёжность термоядерных установок в целом.

Практически во всех известных конструкциях КТЗ она состоит из отдельных охлаждаемых панелей, следовательно, надёжная работа КТЗ в целом будет определяться надёжной работой её отдельных панелей.

Одной из причин, вызывающих аварийные ситуации в КТЗ, является смещение хотя бы одной панели со своего проектного положения. Это может привести к аварийной ситуации не только в КТЗ, но и во всей установке в целом.

Для предотвращения подобной аварийной ситуации предложена конструкция панели с противоаварийным устройством, которое позволит смягчить последствия смещения панели КТЗ со своего проектного положения и продолжить эксплуатацию установки в этом случае.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ПАНЕЛИ КРИОГЕННОЙ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НЕЙ

Несмотря на различия в рассматриваемых в настоящее время конструкциях панели КТЗ, существуют их общие конструктивные признаки.

КТЗ обеспечивает снижение тепловых потоков на СМ с температурой $\sim 4,5$ К от элементов, находящихся при температуре ~ 300 — 500 К. Основные элементы, от тепловых потоков с которых защищает КТЗ, — вакуумная камера (ВК) и криостат.

Исходя из теплофизических и конструктивных требований, КТЗ состоит из отдельных панелей, принудительно охлаждаемых газообразным гелием или азотом (далее — газом) с температурой 80 — 100 К.

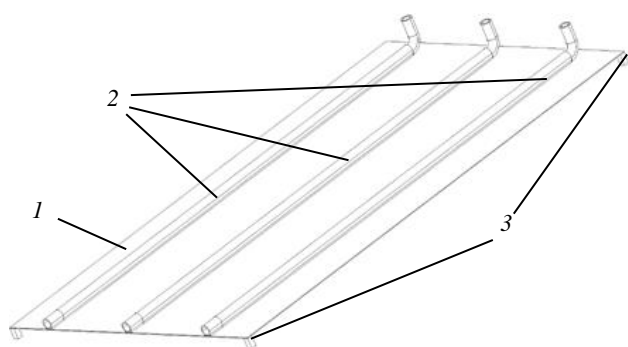


Рис. 1. Схема конструкции панели тепловой защиты: 1 — металлический корпус панели; 2 — трубки с охлаждающим газом; 3 — крепления панели

Панели имеют форму, повторяющую форму поверхности, вблизи которой они установлены.

АВАРИЙНАЯ СИТУАЦИЯ СО СМЕЩЕНИЕМ ПАНЕЛИ КТЗ

Недостатками рассмотренной конструкции КТЗ являются возможность смещения хотя бы одной панели со своего проектного положения (например, вследствие повреждения её креплений при срыве плазмы, вибрации, от усталости и т.п.) и возникновение непосредственного контакта панели с элементами конструкции, находящимися как при более высокой температуре, так и при более низкой.

Далее подобный контакт называется образованием «теплового моста», что является аварийной ситуацией при эксплуатации установки.

«Тепловой мост» между панелью с температурой 80—100 К и СМ с температурой ~4,5 К вызывает недопустимую тепловую нагрузку на СМ с возможностью его перехода в несверхпроводящее состояние.

Возможен «тепловой мост» между конструкциями с температурой ~300—500 К и панелью с температурой 80—100 К. Это вызовет повышение температуры панели и соответствующий рост радиационной тепловой нагрузки с неё на СМ с возможностью его перехода в несверхпроводящее состояние.

Следует учесть, что в установке ДЕМО-ТИН, где присутствуют тритий, продукты активации и де-ляющиеся изотопы, ремонт панели КТЗ потребует специального дистанционно управляемого оборудова-

ния. Для некоторых участков КТЗ (например, в области центральной колонны магнитов), находящихся в труднодоступных местах, ремонт панелей практически невозможен.

КОНСТРУКЦИЯ ПАНЕЛИ КТЗ С ПРОТИВОАВАРИЙНЫМ УСТРОЙСТВОМ И ПРИНЦИП ЕЁ ДЕЙСТВИЯ

В качестве примера рассмотрим панель, установленную между ВК и СМ. Для предотвращения последствий ситуации с образованием «теплового моста» предложена конструкция панели КТЗ, состоящая из металлического корпуса пластинчатой формы с средствами охлаждения и узлами крепления, при этом металлический корпус выполнен с выступающими предохранительными элементами (ВПЭ), заполненными теплоизоляционным материалом, основания которых расположены на корпусе панели, а вершины обращены в сторону СМ. Схема конструкции панели с ВПЭ и взаимное расположение смещённой (аварийной) панели КТЗ с установленными на ней ВПЭ и СМ представлены на рис. 2.

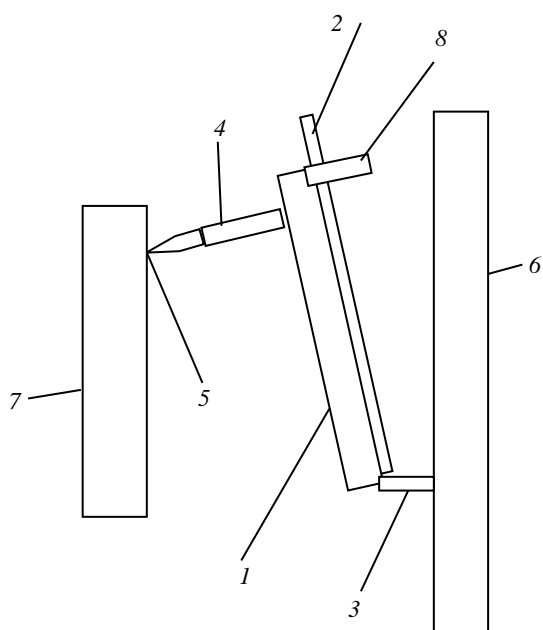


Рис. 2. Схема конструкции панели с ВПЭ и взаимное расположение смещённой (аварийной) панели КТЗ, СМ и вакуумной камеры: 1 — металлический корпус панели; 2 — трубки с охлаждающим газом; 3 — крепления панели; 4 — металлический корпус ВПЭ; 5 — вершина ВПЭ; 6 — вакуумная камера; 7 — сверхпроводниковый магнит; 8 — повреждённое крепление

Корпус ВПЭ может иметь пирамидальную, коническую, полусферическую форму, форму стержня с остриём на конце или иную форму. Часть ВПЭ, в случае аварии соприкасающаяся с поверхностью СМ, называется вершиной. Корпус ВПЭ заполнен теплоизолирующим материалом (например, полиэтилен-терфталатом), чтобы тепловой поток через него был минимальным [2].

Главное в конструкции металлического корпуса ВПЭ — в случае возникновения механических нагрузок на него он должен сохранять свою форму и не сплющиваться, в случае контакта вершины ВПЭ с поверхностью площадь контакта должна быть минимальной, при этом термическое сопротивление контакта и самого ВПЭ должно быть максимальным.

На рис. 3—5 показаны несколько вариантов конструкции ВПЭ.

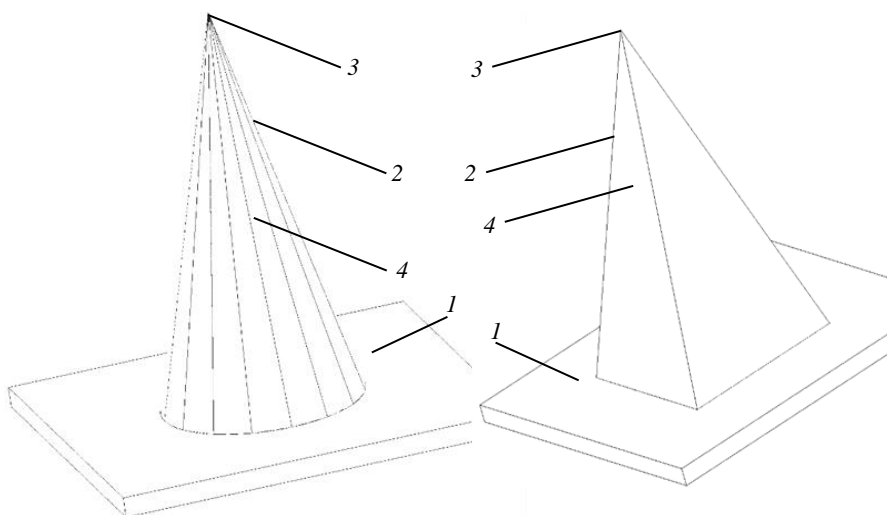


Рис. 3. ВПЭ конической и пирамидальной формы: 1 — металлический корпус панели; 2 — металлический корпус ВПЭ; 3 — вершина ВПЭ; 4 — теплоизолирующий материал

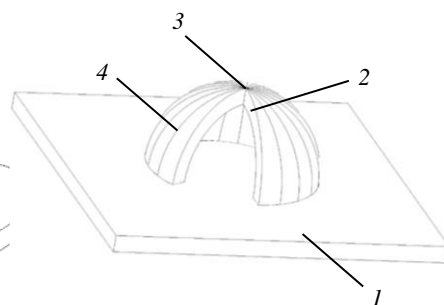


Рис. 4. ВПЭ полусферической формы: 1 — металлический корпус панели; 2 — металлический корпус ВПЭ; 3 — вершина ВПЭ; 4 — теплоизолирующий материал

Место размещения ВПЭ не имеет принципиально значения (они могут быть установлены на корпусе панели или на поверхности СМ), главное — предотвращение возможности образования «теплового моста» с большой площадью контакта поверхности панели с СМ и минимизация количества тепловой энергии, которая может передаваться по возникшему «тепловому мосту». Далее рассмотрим вариант с установкой ВПЭ на корпусе панели.

Конструкции ВПЭ очень просты и не вызывают сложностей при установке их на корпусе панели, а затраты при их установке минимальны.

Возможны различные варианты крепления ВПЭ к корпусу панели, например:

- металлический корпус ВПЭ приваривается к корпусу панели;

- на металлическом корпусе ВПЭ делается резьба, а на корпусе панели высверливается отверстие, в котором также нарезается резьба, и ВПЭ ввинчивается в панель.

Высота ВПЭ выбирается такой, что при нахождении панели в проектном положении вершины ВПЭ не касаются СМ. При этом ВПЭ никак не влияют на работу панели и СМ. Контакт вершин ВПЭ с поверхностью СМ происходит только после смещения панели со своего проектного положения.

Количество ВПЭ для каждой панели может быть различным в зависимости от её площади и формы.

В этом случае, когда с поверхностью СМ соприкасается лишь вершина ВПЭ, площадь контакта незначительна. Тем самым предотвращается возможность образования «теплового моста» с большой пло-

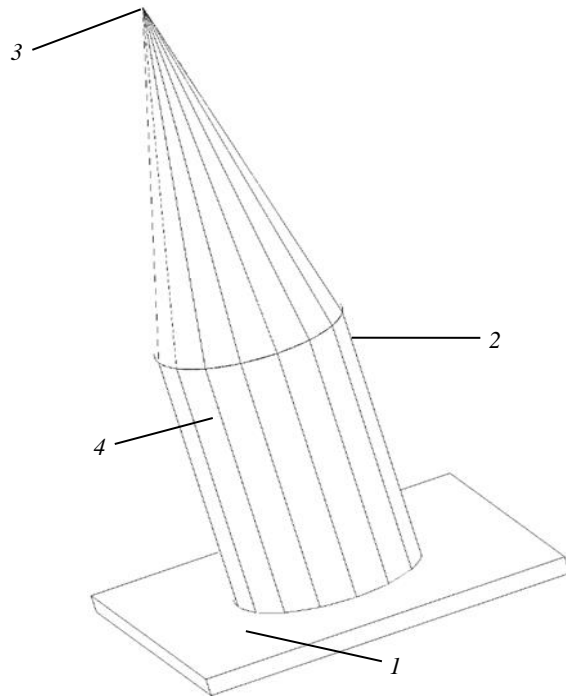


Рис. 5. ВПЭ формы «стержень с остриём»: 1 — металлический корпус панели; 2 — металлический корпус ВПЭ; 3 — вершина ВПЭ; 4 — теплоизолирующий материал

щадью контакта поверхности панели с СМ и обеспечивается минимизация количества тепловой энергии, которая может передаваться по возникшему «тепловому мосту», достигается возможность продолжать эксплуатацию установки ДЕМО-ТИН в случае смещения одной или нескольких панелей КТЗ со своего проектного положения.

ПРИМЕР РАСЧЁТА ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ ПАНЕЛЬЮ КТЗ И ПОВЕРХНОСТЬЮ СМ В ПРОЕКТНОМ ПОЛОЖЕНИИ И ПРИ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ СО СМЕЩЕНИЕМ ПАНЕЛИ

В проектном положении (см. рис. 1) панель нагревается тепловым потоком от поверхности ВК и теплопритоком по креплениям 3. Охлаждение панели производится двумя способами: радиационным тепловым потоком от корпуса панели 1 к поверхности СМ и потоком охлаждающего газа, который прокачивается через прикреплённые к корпусу панели 1 трубки 2.

В случае повреждения одного или нескольких креплений 9 и смещения панели в сторону СМ 8 (см. рис. 2) происходит контакт вершины 5 ВПЭ 4 с поверхностью СМ 8. Соприкосновение поверхности панели с поверхностью СМ с большой площадью контакта исключается.

Принципиальная возможность создания и эффективность панели подобной конструкции подтверждается расчётом.

Исходные данные. Считаем, что площадь поверхности каждой из двух сторон корпуса панели $S_{\text{пан}} = 0,25 \text{ м}^2$ (панели подобного размера использовались в действующих термоядерных установках), температура поверхности панели $T_{\text{пов}} = 80 \text{ К}$. Рассмотрим элемент, ограниченный с одной стороны панелью площадью $S_{\text{пан}} = 0,25 \text{ м}^2$, с другой стороны участком поверхности СМ такой же площадью.

Расчёт характеристик панели при проектном режиме работы. При проектном режиме работы плотность теплового потока излучением с панели на поверхность СМ определяется по формуле [3]

$$q_{\text{изл}} = Q_{\text{изл}}/S_{\text{пан}} = c_0 \varepsilon_{\text{эф}} ((T_{\text{пов}}/100)^4 - (T_{\text{м}}/100)^4), \text{ Вт/м}^2, \quad (1)$$

где $Q_{\text{изл}}$ — мощность теплового потока, излучаемого с панели на СМ; c_0 — коэффициент излучения абсолютно чёрного тела $5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $\varepsilon_{\text{эф}}$ — приведённая степень черноты при излучении с поверхности панели на поверхность СМ; $T_{\text{м}}$ — температура поверхности СМ $4,5 \text{ К}$;

$$\varepsilon_{\text{эф}} = 1/(1/\varepsilon_{\text{пан}} + 1/\varepsilon_{\text{м}} - 1), \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\text{пан}}$ — степень черноты излучающей поверхности панели; $\varepsilon_{\text{м}}$ — степень черноты поверхности СМ, на которую падает излучение.

Следует отметить, что значения степени черноты поверхностей могут изменяться в процессе эксплуатации (например, из-за намерзания газов на поверхности, изменения свойств материалов под нейтронным облучением и т.п.), и это необходимо учесть. В дальнейших расчётах рассматриваем два варианта значений степени черноты поверхностей — «проектное» и «максимальное», возникшее под действием указанных факторов. Ожидаемые значения возможных степеней черноты и приведённых степеней черноты, а также расчётные значения $q_{\text{изл}}$ и $Q_{\text{изл}}$ даны в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Характеристики панели при проектном режиме работы

Степень черноты	Проектное значение	Максимальное значение
$\varepsilon_{\text{пан}}$	0,05	0,15
$\varepsilon_{\text{м}}$	0,05	0,15
$\varepsilon_{\text{эф}}$	0,026	0,081
$q_{\text{изл}}, \text{ Вт/м}^2$	0,15	0,46
$Q_{\text{изл}}, \text{ Вт}$	0,038	0,12

Значение $q_{\text{изл}}$ не превышает рекомендуемое для СМ максимальное значение $q_{\text{изл макс}} = 1 \text{ Вт/м}^2$, при котором максимальная допустимая мощность падающего на элемент поверхности СМ площадью $0,25 \text{ м}^2$ с панели излучения $Q_{\text{макс}} = q_{\text{изл макс}} S_{\text{пан}} = 0,25 \text{ Вт}$.

Расчёт характеристик панели и ВПЭ при аварийном режиме работы. При аварийном режиме работы произойдёт смещение панели со своего проектного положения и вершина по меньшей мере одного ВПЭ будет контактировать с поверхностью СМ.

Для оценки тепловой мощности, попадающей на СМ через зону контакта с ВПЭ, примем следующие предположения.

Схема расположения панели и поверхности СМ в этом случае показана на рис. 2. В качестве примера рассматриваем конструкцию ВПЭ в виде стержня с остриём (см. рис. 5). Стенки и коническое остриё стержня стальные (для придания прочности конструкции) с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{ст} = 12 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, внутренняя полость заполнена теплоизоляционным материалом для уменьшения эквивалентного коэффициента теплопроводности стержня. В качестве теплоизоляционного материала можно использовать полиэтилентерафталат с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{из} = 0,25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Эквивалентный коэффициент теплопроводности стержня $\lambda_{эКВ}$ можно оценить по формуле

$$\lambda_{эКВ} = (\lambda_{ст}S_{ст} + \lambda_{из}S_{из})/S_{полн}, \quad (3)$$

где $S_{ст}$ — площадь стали в поперечном сечении стержня, м^2 ; $S_{из}$ — площадь теплоизоляционного материала в поперечном сечении стержня, м^2 ; $S_{полн} = S_{ст} + S_{из}$ — полная площадь поперечного сечения стержня, м^2 .

При диаметре стержня 0,004 м и толщине стальных стенок 0,0003 м $\lambda_{эКВ} = 3,55 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. В запас расчёта принимаем $\lambda_{эКВ} = 4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Расчёт контактного теплообмена в подобных случаях рассмотрен в [4, 5].

Температура поверхности панели $T_{п} = 80 \text{ К}$, температура вершины ВПЭ $T_{вер}$, температура поверхности СМ $T_{см} = 4,5 \text{ К}$, контактное термическое сопротивление в месте контакта вершины ВПЭ и поверхности СМ $R_{к}$. Для расчёта процессов теплообмена в месте контакта можно ввести понятие фиктивного температурного скачка $\Delta T_{к} = T_{вер} - T_{см}$.

Закон теплопроводности Фурье для стержня записывается в виде

$$q_{ст} = \lambda_{эКВ} (T_{п} - T_{вер})/l, \quad (4)$$

где $q_{ст}$ — плотность теплового потока в стержне, $\text{Вт}/\text{м}^2$; l — высота стержня (принимаем $l = 0,015 \text{ м}$).

В месте контакта

$$Q_{кон} = \Delta T_{к}/R_{к}, \quad (5)$$

где $Q_{кон}$ — плотность теплового потока в месте контакта, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Из закона сохранения энергии следует равенство тепловой мощности $Q_{кон}$, передаваемой через стержень к вершине ВПЭ и в месте контакта от вершины ВПЭ к поверхности СМ:

$$Q_{кон} = q_{ст}S_{полн} = q_{кон}S_{кон}, \text{ Вт}, \quad (6)$$

где $S_{кон}$ — площадь места контакта, м^2 .

Величины $S_{кон}$ и $R_{к}$ зависят от многих факторов — материала стержня и поверхности СМ, степени чистоты поверхностей, силы сжатия стержня и поверхности и т.п. и в общем случае не могут быть определены аналитически. Многочисленные экспериментальные исследования [4, 5] показывают, что в случае контакта стальных стержня и поверхности $R_{к}$ находится в диапазоне $10^{-4}—2\cdot 10^{-3} \text{ (м}^2\cdot\text{К)}/\text{Вт}$. $S_{кон}$ значительно меньше $S_{полн}$, и по экспериментальным данным $S_{полн}/S_{кон}$ находится в диапазоне 1000—20 000.

При заданных значениях $R_{к}$ и $S_{кон}$ совместное решение уравнений (4)—(6) позволяет определить $q_{ст}$ и $Q_{кон}$.

Полная тепловая мощность, поступающая на элемент поверхности СМ с аварийной панели:

$$Q_{сумм} = Q_{изл} + NQ_{кон}, \text{ Вт}, \quad (7)$$

где N — число ВПЭ, контактирующих при аварии с поверхностью СМ. В дальнейшем считаем $N = 2$.

Зададим девять вариантов значений $R_{к}$ и $S_{кон}$, которые, как представляется, покрывают все возможные диапазоны изменения их значений. Исходные данные и результаты расчётов представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Исходные данные и результаты расчётов

Номер варианта	$S_{полн}/S_{кон}$	$R_{к}, (\text{м}^2\cdot\text{К)}/\text{Вт}$	$q_{ст}, \text{ Вт}/\text{м}^2$	$Q_{кон}, \text{ Вт}$	$Q_{сумм}, \text{ Вт}$	$Q_{сумм}/Q_{макс}$
1	1000	10^{-4}	721	$9,1\cdot 10^{-3}$	0,056—0,138	0,22—0,55
2	5000	10^{-4}	149	$1,9\cdot 10^{-3}$	0,042—0,124	0,17—0,5
3	20 000	10^{-4}	37	$4,7\cdot 10^{-4}$	0,039—0,121	0,16—0,48
4	1000	$5\cdot 10^{-4}$	149	$1,9\cdot 10^{-3}$	0,042—0,124	0,17—0,5
5	5000	$5\cdot 10^{-4}$	30	$3,8\cdot 10^{-4}$	0,039—0,12	0,16—0,48
6	20 000	$5\cdot 10^{-4}$	7,5	$9,5\cdot 10^{-5}$	0,038—0,12	0,16—0,48
7	1000	$2\cdot 10^{-3}$	37	$4,7\cdot 10^{-4}$	0,039—0,121	0,16—0,48
8	5000	$2\cdot 10^{-3}$	7,5	$9,5\cdot 10^{-5}$	0,038—0,12	0,16—0,48
9	20 000	$2\cdot 10^{-3}$	1,9	$2,4\cdot 10^{-5}$	0,038—0,12	0,16—0,48

Данные табл. 2 показывают, что при любых возможных сочетаниях значений R_k и $S_{\text{кон}}$ теплоприток через ВПЭ к СМ не превысит допустимый и СМ сохранит свою работоспособность. Следует отметить, что в качестве примера был рассчитан лишь один вариант конструкции ВПЭ. Не вызывает сомнений, что при совершенствовании конструкции ВПЭ и подборе соответствующих материалов удастся найти конструкции, в которых передаваемая тепловая мощность $Q_{\text{кон}}$ будет меньше, чем в рассмотренном примере. Это ещё уменьшит $Q_{\text{сумм}}$ и улучшит характеристики предложенного ВПЭ.

ВЫВОДЫ

Предложенная конструкция панели КТЗ с ВПЭ предотвращает возможность образования «теплого моста» с большой площадью контакта поверхности панели с СМ и минимизирует количество тепловой энергии, передаваемой при аварии со смещением панели со своего проектного положения через ВПЭ к СМ. Это даёт возможность продолжать эксплуатацию установки ДЕМО-ТИН в случае смещения одной или нескольких панелей КТЗ со своего проектного положения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутеев Б.В., Пашков А.Ю., Шпанский Ю.С. Конструкция, расчет и оценка надежности тепловой защиты сверхпроводниковых магнитов ДЕМО-ТИН. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2016, вып. 3, с. 12—33.
2. Каганер М.Г. Тепловая изоляция в технике низких температур. — М.: Машиностроение, 1966.
3. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. — М.: Энергия, 1975.
4. Шлыков Ю.П. и др. Контактное термическое сопротивление. — М.: Энергия, 1977.
5. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. — М.: Энергия, 1971.



Борис Васильевич Кутеев, заместитель руководителя Отделения по гибридным системам, профессор, д.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, 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



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

Статья поступила в редакцию 26 января 2018 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 1, с. 29—34.