УДК 72-714:629.7.064

## ИЗЛУЧАТЕЛЬ УСТРОЙСТВА СБРОСА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА В КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО С АНТИМЕТЕОРОИДНОЙ ЗАЩИТОЙ

В. В. Миронов, Л. И. Волкова, Н. Н. Волков, С. С. Хамдамов, А. В. Аникин

Государственный научный центр РФ "Исследовательский центр им. М. В. Келдыша", 125438 Москва, Россия

E-mails: mironov@kerc.msk.ru, volkov-nn-li@mail.ru, volkov@kerc.msk.ru, khamdamov@kerc.msk.ru, anikin.a.v@ kerc.msk.ru

Представлен вариант холодильника-излучателя из алюминиевого сплава с антиметеороидной защитой трубки с теплоносителем в виде бампера, являющегося излучающей поверхностью. Разработана приближенная методика расчета стационарного теплового состояния и потерь давления в устройстве. Изготовлен макетный образец, проведены его испытания. Показано, что расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются. Выполнен расчетный анализ эффективного (параметр эффективности равен 3,27 кг/м<sup>2</sup>) защищенного (вероятность неповреждения в течение двух лет равна 0,97) устройства из алюминиевого сплава мощностью 570 кВт при охлаждении теплоносителя с 250 до 110 °C.

Ключевые слова: холодильник-излучатель, теплообмен, теплоноситель, антиметеороидная защита.

DOI: 10.15372/PMTF20220413

Будущее космонавтики неразрывно связано с увеличением энерговооруженности космических аппаратов и расширением их функциональных возможностей. В настоящее время большое внимание уделяется космическим системам с ядерным источником энергии. Такие системы способны решать широкий круг задач, требующих повышенной энерговооруженности. Одной из проблем, возникающих при создании таких устройств, является обеспечение эффективного сброса низкопотенциальной энергии в космическое пространство. Существующие системы, как правило, представляют собой панельные холодильники-излучатели, состоящие из канала с охлаждаемым теплоносителем и панелей (ребер канала), с поверхности которых происходит сброс тепла излучением [1]. Такие системы должны в течение длительного времени работать в космическом пространстве, поэтому возникает необходимость антиметеороидной защиты каналов, наличие которой обычно существенно ухудшает весовое совершенство устройства. Требования обеспечения наилучшего излучения и антиметеороидной защиты на этапе поиска конструктивных решений позволяют улучшить массовые характеристики новых устройств. В работах [2, 3] предложено устройство, в котором ребра излучателя закручиваются вокруг канала



Рис. 1. Излучатель устройства сброса низкопотенциальной энергии: 1 — трубка с теплоносителем, 2 — ребро, 3 — бампер (продолжение ребра)

(рис. 1), образуя защитный бампер. Теплоноситель (жидкость или газ), отводящий тепло от охлаждаемых частей космического аппарата, направляется в трубку предлагаемого излучателя. За счет теплообмена тепло от теплоносителя передается в стенку трубки, затем за счет теплопроводности через стенку — к продольным ребрам и на защитный бампер в виде одной или нескольких изогнутых пластин. Частично тепло к пластине передается за счет лучистого теплообмена. С поверхности бампера тепло сбрасывается в космическое пространство. При изготовлении трубки, продольных ребер и защитного элемента как единого целого или с помощью сварки (например, из алюминиевого сплава) устройство практически не имеет контактных сопротивлений при передаче тепла от теплоносителя к излучающей поверхности.

При правильно выбранных толщине бампера и расстояния от трубки с теплоносителем падающие на излучатель микрометеороиды или другие мелкие частицы [4–8], пробивая бампер, как правило, распадаются на несколько фрагментов (осколков), которые разлетаются в некотором телесном угле. Часть этих осколков может попасть на трубку, однако размер и скорость их движения уменьшаются при взаимодействии с защитным элементом. Пробивная способность осколков снижается и риск негативного воздействия на трубку становится минимальным.

Для создания математической модели рассматривается холодильник-излучатель, состоящий из n трубок (потоков), окруженных защитными бамперами, образованными отогнутыми частями ребер. Схема элемента такого устройства представлена на рис. 2. Элемент устройства образуется двумя, четырьмя или более  $(n_l)$  теплопроводными частями — "лепестками". "Лепестки" можно получить путем отгибания по дуге окружности, имеющей длину  $d_{kk}$ , первоначально длинных  $(d_k + d_{kk})$  сдвоенных ребер  $(d_k$  — длина внутренней части ребра). Каждый "лепесток" имеет корневую зону, состоящую из части трубки с теплоносителем и двух изогнутых ребер.

Рассмотрим стационарную задачу. Для получения приближенных оценок не будем учитывать теплообмен путем излучения внутри полостей "лепестков". Для построения модели передачи тепла за счет теплопроводности от трубки с теплоносителем к поверхности бампера (диаметром  $d_l$ ) холодильника-излучателя рассмотрим один "лепесток", включающий два ребра длиной  $d_k + d_{kk}$  и толщиной  $\delta$  (см. рис. 2). Ось *у* направлена по нормали к плоскости рис. 2, координата отсчитывается вдоль трубки с теплоносителем от ее начала.



Рис. 2. Схема поперечного сечения холодильника-излучателя с двумя "лепестками" (штриховые линии):

1— бампер, 2— трубка с теплоносителем

Согласно принятым условиям внутренняя часть ребра (длиной  $d_k$ ) является теплоизолированной по боковым поверхностям. Уравнение теплопроводности для "лепестка", имеющего два таких ребра, принимает вид

$$\frac{d}{dx}2\delta\lambda\,\frac{dT}{dx}=0,\tag{1}$$

граничные условия —

$$T|_{x=0} = T_2, \qquad -2\lambda \frac{dT}{dx}\Big|_{x=d_k} = q_0,$$
 (2)

где координата x измеряется вдоль ребра;  $\lambda$  — теплопроводность материала ребра;  $T_2$  — температура внешней поверхности трубки;  $q_0$  — плотность теплового потока вследствие излучения от двух ребер одного "лепестка". Уравнение (1) с граничными условиями (2) решается аналитически:

$$T_3 = T\big|_{x=d_k} = T_2 - \frac{q_0}{2\lambda} \, d_k. \tag{3}$$

Остальные части ребер образуют бампер, с поверхности которого излучается тепло и на который может падать лучистая энергия извне, например от солнца. Солнечные лучи освещают устройство только с одной стороны, поэтому при построении одномерной модели осредним эту энергию по всей поверхности бампера. Пусть  $q_{sol}$  — доля плотности падающего теплового потока, поглощаемая излучателем (с учетом характеристик поверхности). Тогда ее осредненная величина составляет

$$q_{sol} \frac{d_l \,\Delta y}{\pi d_l \,\Delta y} = \frac{q_{sol}}{\pi}.$$

Пренебрегая теплопроводностью в направлении оси y (вследствие малости теплового потока в направлении оси y по сравнению с осью x), получаем систему уравнений и граничные условия:

$$\frac{d}{dx} 2\delta\lambda \frac{dT}{dx} = 2\varepsilon\sigma T^4 - q_{sol} \frac{2}{\pi};\tag{4}$$

$$\frac{dQ}{dx} = 2\varepsilon\sigma T^4 - q_{sol}\,\frac{2}{\pi};\tag{5}$$

$$T\big|_{x=d_k} = T(x,y)\big|_{x=d_k} = T_3;$$
 (6)

$$-\lambda \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=d_k+d_{kk}} = 0; \tag{7}$$

$$Q\big|_{x=d_L} = 0. \tag{8}$$

Здесь Q(x) — результирующее количество тепла, излученного поверхностью бампера одного "лепестка" (с двух ребер) на участке от точки с координатой  $x = d_k$  до точки с текущей координатой x.

Для определения температуры  $T_2$  и величины изменения параметров по длине устройства (вдоль оси y) рассмотрим стационарный теплообмен во всем холодильникеизлучателе с учетом теплообмена в трубке с теплоносителем и теплопроводности материала трубки.

Для одного элемента устройства (потока) длиной dy в стационарном состоянии можно записать выражение

$$-G_1 c_p \frac{dT_f}{dy} = \alpha (T_f - T_1) P_{11} = \frac{\lambda_{\rm TP}}{\delta} (T_1 - T_2) P_1 = n_l Q(d_k + d_{kk})$$
(9)

с граничным условием

$$T_f|_{\eta=0} = T_{f0},\tag{10}$$

где  $P_{11} = \pi d$  — внутренний периметр трубки;  $P_1 = \pi (d + h)$ ; d — внутренний диаметр трубки; h = (D - d)/2 — толщина стенок трубки; D = d + 2h — внешний диаметр трубки;  $\delta$  — толщина ребра бампера;  $T_f$ ,  $c_p$ ,  $G_1$  — температура, удельная теплоемкость и расход теплоносителя через одну трубку (поток);  $T_1$  — температура внутренней поверхности трубки;  $\lambda_{\rm TP}$  — теплопроводность материала трубки;  $\alpha$  — коэффициент теплообмена в канале, рассчитываемый по данным [9]. Система уравнений (3)–(10) решалась численно.

Потери на трение оцениваются по формулам для трубы с шероховатостью, равной 0,01 мм, приведенным в работе [10].

В АО ГНЦ "Центр Келдыша" с использованием предложенного принципа разработан макет устройства из сплава алюминия марки АД31 (СИТТ 670.000.000СБ) (рис. 3).

Устройство имеет покрытие, степень черноты которого принята равной 0,8. Масса макета со штуцерами и хомутами равна 1950,7 г, длина излучателя L = 1 м, внешний диаметр dl = 0,104 м, толщина ребра  $\delta = 0,001$  м. Расчетная масса участка излучателя (трубы) длиной 1 м составляет 1467 г. Особенность макета заключается в том, что вместо одного канала сделано два (см. рис. 3,6). Каналы и ребра изготовлены как единое целое.

Испытания макета проводились в вакуумной камере УВМ-15У стенда АО ГНЦ "Центр Келдыша". Для испытаний был подготовлен рабочий участок, представляющий собой замкнутую систему подачи модельной среды "Софэксил ТСЖв" к макету с помощью насоса и ее нагрева до необходимой температуры с помощью регулируемого электрического нагревателя. Испытания проводились при трех значениях температуры теплоносителя на входе в устройство при достижении системой стационарного состояния.

Тепловое состояние устройства в процессе испытаний контролировалось с помощью тепловизора (через специальное окно в барокамере) и термосопротивлений (TC), схема расположения которых приведена на рис. 4.

Значения основных параметров, при которых проводились испытания, представлены в табл. 1, 2 ( $T_{\rm Bx}$  — температура теплоносителя "Софэксил ТСЖв" на входе в макет,  $G_{\rm T}$  — расход теплоносителя,  $P_{\rm Bx}$ ,  $P_{\rm Bbix}$  — давление теплоносителя на входе в макет и выходе из него,  $\bar{T}_{wb}$  — средняя температура стенок барокамеры,  $T_{\rm x}$  — температура поверхности





Рис. 3. Излучатель (a), его фрагмент (б) и схема внутреннего сечения (b): 1 -трубки, 2 -ребра



Рис. 4. Схема расположения термосопротивлений при проведении испытаний

## Таблица 1

Значения основных параметров, при которых проводились испытания, зафиксированные TC1 при стационарных режимах

Режим	$T_{\rm BX},^{\circ}{\rm C}$	$G_{\mathrm{T}},\mathrm{r/c}$	$P_{\rm BX},$ МПа	$P_{\rm выx},  {\rm M}\Pi{\rm a}$	t, мин
1	108,8	49,0	0,47	$0,\!45$	7
2	$194,\! 6$	$47,\!6$	0,48	0,47	8
3	297,1	44,7	$0,\!49$	$0,\!48$	7

## Таблица 2

TC	Режим 1		Режим 2		Режим 3	
	$T_{\rm x}, ^{\circ}{\rm C}$	$\bar{T}_{wb}, ^{\circ}\mathrm{C}$	$T_{\mathbf{x}}, ^{\circ}\mathbf{C}$	$\bar{T}_{wb}, ^{\circ}\mathrm{C}$	$T_{\mathbf{x}}, ^{\circ}\mathbf{C}$	$\bar{T}_{wb}, ^{\circ}\mathrm{C}$
TC2	84,9		157,8		228,1	
TC3	86,5		161,3		236,5	
TC4	$70,\!6$		103,5		148,1	
TC5	74,3		126,4		180,9	
TC6	71,8		119,0		164,9	
TC7	80,0		149,7		222,1	
TC8	80,1		146,8		217,7	
TC10		25		35		43
TC11		25		35		43
TC12		25		35	_	43

Значения средней температуры стенок барокамеры  $T_{wb}$ и температуры поверхности макета холодильника-излучателя  $T_{x}$ , зафиксированные различными TC при стационарных режимах





Рис. 5. Термограммы, полученные с помощью тепловизора в первом (a) и третьем  $(\delta)$  режимах испытаний

макета холодильника-излучателя). На рис. 5 в виде термограмм излучающей поверхности приведены результаты испытаний устройства в первом и третьем режимах нагрева.

С помощью тепловизора получены профили температуры поверхности устройства в трех сечениях по его длине: y = 250, 500 (центр), 750 мм (координата y отсчитывается от левой границы устройства). Аналогичные профили получены расчетным путем по представленной методике. В расчетах учитывалось излучение от стенок барокамеры. В табл. 3 приведены значения плотности  $q_{\pi}$  лучистого теплового потока от стенок барокамеры, поглощаемого макетом, при различных значениях температуры стенок. В условиях барокамеры макет облучается со всех сторон, поэтому в расчетах следует задать  $q_{sol} = 2q_{\pi}$ . Расчетные и экспериментальные профили температуры, а также показания термосопротивлений в некоторых точках (см. рис. 4) макета представлены на рис. 6. Расчетные режимы близки к режимам испытаний. Расход теплоносителя в расчетах принят равным  $G_{\rm T} = 48$  г/с.

Сравнивая расчетные и экспериментальные данные как при низких, так и при высоких температурах теплоносителя, можно отметить, что они хорошо согласуются. Исключение составляют показания тепловизора на торцах макета. Данные зоны цилиндра видны под

Таблица 3

Значения плотности лучистого теплового потока от стенок барокамеры, поглощаемого макетом, при различной температуре ее стенок  $T_{wb}$ 



Рис. 6. Расчетные и экспериментальные профили температуры (1-6), а также показания сопротивлений термопар при y = 500 мм (7-9) в первом (a) и третьем  $(\delta)$  режимах при различных значениях координаты y:

 $a - \lambda = 180$  Вт/(м·К),  $q_{\pi} = 358$  Вт/м<sup>2</sup>,  $T_{\text{вх}} = 100$  °С,  $\delta - \lambda = 180$  Вт/(м·К),  $q_{\pi} = 452$  Вт/м<sup>2</sup>,  $T_{\text{вх}} = 300$  °С; сплошные линии — эксперимент, штриховые — расчет; 1, 4 - y = 250 мм, 2, 5 - y = 500 мм, 3, 6 - y = 750 мм; 7 - TC4, 8 - TC5, 9 - TC6

углом относительно нормали к его поверхности, приблизительно равным 90°. В этих зонах показания тепловизора некорректны (не выполняется закон Ламбера).

Полученные результаты позволяют использовать данную методику расчета для оптимизации излучателя рассматриваемого типа с учетом требований противометеороидной защиты.

Рассмотрим устройство из сплава алюминия мощностью 570 кВт, охлаждающее теплоноситель в низкотемпературном интервале 250 ÷ 110 °C. Как показано в работе [11], эффективным теплоносителем для такого устройства может быть дифенильная смесь (Dowtherm-A или российский аналог динил) [12, 13]. Для выполнения заданных условий расход выбранного теплоносителя должен составлять 2,02 кг/с.

Оптимизируя устройство с точки зрения веса, эффективного теплообмена по разработанной методике и обеспечения высокой вероятности неповреждения метеороидами и космическим мусором в соответствии с данными работ [4–9], получаем конструкцию, схема которой приведена на рис. 7, а расчетные параметры — в табл. 4.

Полагается, что солнечная радиация составляет 1400 Вт/м<sup>2</sup>, отраженная — 260 Вт/м<sup>2</sup>, облучение осуществляется с одной стороны и доля энергии, поглощаемой устройством, равна 80 %. С помощью специального покрытия можно добиться умень-



Рис. 7. Схема поперечного сечения холодильника-излучателя с четырьмя "лепестками"

Таблица 4

Параметры излучателя мощностью 572 кВт для случаев отсутствия и наличия солнечной радиации

$q_{sol}, \operatorname{Bt}/m^2$	<i>d</i> , мм	h, мм	$\delta$ , mm	$d_l$ , мм	L, M	$\Delta p$ , МПа	$S,  \mathrm{m}^2$	<i>т</i> , кг	m/S, кг/м <sup>2</sup>
$0\\1328$		$1,5 \\ 1,5$	$0,5 \\ 0,5$	$112 \\ 112$	$45,3 \\ 63.0$	$0,64 \\ 0.89$	$478,6 \\ 664,7$	$1563 \\ 2171$	$3,27 \\ 3,27$

шения доли поглощаемой солнечной энергии, но все значения находятся в интервале  $q_{sol} = 0 \div 1328 \text{ Bt}/\text{M}^2$  (см. табл. 4).

Для оптимизации теплообмена и уменьшения потерь давления выбраны трубки с внутренним диаметром 6 мм, а устройство разделено на  $n_k = 30$  потоков. Это позволяет получить потери давления от 0,64 до 0,89 МПа, а длину трубок одного потока — от 45,3 до 63,0 м. С учетом суммарной проекции площади всех трубок  $dLn_k$  и с использованием данных и методик [4–9] получены следующие результаты. Для обеспечения в течение двух лет на уровне 0,97 вероятности неповреждения высокоскоростными частицами метеороидов и космическим мусором при эксплуатации устройства в космическом пространстве толщина трубок должна составлять 1,5 мм, толщина бампера — 0,5 мм, расстояние от трубки до бампера — 50 мм. Для достижения заданных параметров и обеспечения эффективного отвода тепла к бамперу устройство выполнено из четырех "лепестков" с толщиной ребра 0,5 мм (см. рис. 7).

Рассматривая только параметры излучателя устройства сброса тепла (без учета арматуры, клапанов, насосов и др.), получаем, что его масса составляет 1563 ÷ 2171 кг, площадь излучения — 479 ÷ 665 м<sup>2</sup>. Параметр эффективности излучателя устройства равен m/S = 3.3 кг/м<sup>2</sup>.

Таким образом, в работе рассмотрен вариант холодильника-излучателя с антиметеороидной защитой в виде излучающего бампера. Устройство эффективно отводит тепло от трубки с теплоносителем к излучающей поверхности, так как трубка и ребра изготавливаются как единое целое, что исключает контактные сопротивления при соединении различных деталей. Разработана методика расчета теплового состояния и потерь давления для такого устройства, протестированная путем сопоставления с результатами испытаний макетного образца. Принципиальная возможность изготовления устройства предложенного типа подтверждена изготовлением макетного образца и проведением его тепловакуумных испытаний. С использованием протестированной методики расчета выполнена оптимизация конструкции и характеристик излучателя из алюминиевого сплава, имеющего мощность 570 кВт в низкотемпературном интервале охлаждения теплоносителя  $250 \div 110$  °C. Разработанное устройство сочетает эффективный теплоотвод при удельной массе конструкции m/S = 3,27 кг/м<sup>2</sup> и антиметеороидную защиту с вероятностью неповреждения 0,97 при полете в течение двух лет.

## ЛИТЕРАТУРА

- Авдуевский В. С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / В. С. Авдуевский, Б. М. Галицейский, Г. А. Глебов и др. М.: Машиностроение, 1975.
- 2. Пат. 2603698 РФ, МКИ В 64 G 1/50 (2006.01). Элемент устройства сброса низкопотенциальной энергии космического аппарата / В. В. Миронов, Н. Н. Волков, Л. И. Волкова, П. В. Грибков, С. С. Хамдамов, А. М. Кушинский. Опубл. 27.11.2016.
- Пат. 2705538 РФ, МКИ В 64 G 1/50 (2006.01), В 64 G 1/56 (2006.01). Излучатель устройства сброса низкопотенциального тепла в космическое пространство (варианты) / В. В. Миронов, Н. Н. Волков, Л. И. Волкова, П. В. Грибков, А. М. Кушинский, С. С. Хамдамов. Опубл. 07.11.2019.
- 4. Миронов В. В., Толкач М. А. Баллистические предельные уравнения для оптимизации системы защиты космических аппаратов от микрометеороидов и космического мусора // Космич. техника и технологии. 2016. № 3. С. 26–42.
- 5. Миронов В. В., Толкач М. А. Модели метеороидной среды в околоземном космическом пространстве и определение плотности потока метеороидов // Космич. техника и технологии. 2017. № 2. С. 5–16.
- 6. Protection manual. IADC-04-03. Version 5.0. Inter-agency space debris coordination committee. S. l., 2012. [Electron. resource]. Режим доступа: http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-04-03\_Protection\_Manual\_v5.pdf.
- ГОСТ 25645.128-85. Вещество метеорное. Модель пространственного распределения. М.: Изд-во стандартов, 1985.
- 8. Машиностроение: Энцикл.: В 40 т. М.: Машиностроение, 2012. Т. IV-22: Ракетнокосмическая техника. Кн. 1.
- 9. **Кутателадзе С. С.** Справочник по теплопередаче / С. С. Кутателадзе, В. М. Боришанский. Л.; М.: Госэнергоиздат, 1958.
- 10. **Идельчик И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975.
- 11. Волков Н. Н., Волкова Л. И., Григорьев А. Л. и др. Расчетное сопоставление эффективности применения различных теплоносителей для панельных холодильников-излучателей космических аппаратов // Теплоэнергетика. 2018. № 11. С. 78–86.
- 12. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.
- 13. Чечеткин А. В. Высокотемпературные теплоносители. М.: Энергия, 1971.

Поступила в редакцию 1/VI 2021 г., после доработки — 9/XI 2021 г. Принята к публикации 29/XI 2021 г.