

УДК 629.7.064.54

# Оптимизация панельных теплообменников-излучателей космических энергоустановок

Д.Н. Ильмов, В.А. Мавров

ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Москва, 125438, Россия  
e-mail: [iltovdn@mail.ru](mailto:iltovdn@mail.ru); [vasiliy.mavrov@yandex.ru](mailto:vasiliy.mavrov@yandex.ru)

Поступила в редакцию 13.02.2019

После доработки 26.04.2019

Принята к публикации 5.05.2019

Относительно простым в изготовлении и технологичным является панельный холодильник-излучатель. На основе его математической модели разработаны алгоритмы поиска оптимальных параметров с целью минимизации массы, а также повышения метеоритной неуязвимости. Получено, что жидкометаллический теплоноситель Na-K не дает преимуществ по сравнению с дифенильной смесью. Для повышения надежности предлагается оснастить каждый поток отсечными клапанами. Разработаны математические подходы, позволяющие определить количество поврежденных потоков и надежность панельного холодильника-излучателя с запорными клапанами. По итогам проведенной работы предлагается панельный холодильник-излучатель, который отличается высокой технологичностью и надежностью.

**Ключевые слова:** радиационный теплообменник, панельный холодильник-излучатель, теплопроводное излучающее ребро, жидкометаллический теплоноситель, высокотемпературные органические теплоносители, дифенильная смесь, вероятность неповреждения метеороидами и частицами космического мусора.

## Введение

Неотъемлемым элементом космической ядерной энергетической установки большой мощности является теплообменный аппарат – холодильник-излучатель, предназначенный для излучения в космическое пространство той части тепла, которая не может быть превращена в полезную работу. Например, если имеется источник тепла мощностью 2 МВт, а КПД установки около 30%, то она будет вырабатывать 600 кВт электрической энергии и потребуются излучатель, сбрасывающий 1.4 МВт. Таким образом, радиационный теплообменник является одним из ключевых элементов энергоустановки.

Панельный холодильник-излучатель (ПХИ) является наиболее простым вариантом радиационного теплообменника. Он представляет собой комплекс оребренных трубок, по которым циркулирует охлаждаемый теплоноситель.

В настоящее время проводятся исследовательские работы по изготовлению ПХИ из лег-

ких высокотеплопроводных композиционных материалов. Кроме «классических» ПХИ сегодня разрабатываются варианты мощных излучателей на базе использования тепловых труб, а также перспективные бескаркасные капельные излучатели. При разработке каждого направления возникает большое количество различных проблем, которые до сих пор полностью не решены. В данной работе рассматривается наиболее технологичный «классический» вариант панельного холодильника, относительная простота которого может быстрее всего привести к созданию реально функционирующего излучателя большой мощности.

Некой структурированной теории проектирования ПХИ не существует. Расчеты проводятся различными методами, учитываются или не учитываются различные факторы. Также нет единого мнения по выбору оптимального теплоносителя. Часто встречается представление, что наиболее предпочтительно использование жидкометаллического теплоносителя [1–3].

Обычно рассматривается расплав Na-K [1, 3]. Он обладает термической стабильностью и радиационной стойкостью, а также высокой теплопроводностью, примерно в 200–300 раз выше по сравнению с органическими теплоносителями, однако при более низкой теплоемкости (ниже примерно в 2.5 раза). Главная отрицательная особенность расплава Na-K связана с его взрывоопасностью на воздухе. В качестве альтернативного варианта мы предлагаем высокотемпературный органический теплоноситель – дифенильную смесь (Dowtherm-A или Динил) [4]. От других органических теплоносителей дифенильную смесь отличает низкая вязкость в широком рабочем диапазоне [5].

Удобной для анализа моделью ПХИ является его представление в виде набора параллельных трубок (потоков), соединенных пластиной – двумя полурейбрами (рис. 1). Пренебрегается распространением тепла вдоль трубки посредством теплопроводности (из-за малости продольного теплового потока по сравнению с поперечным), также пренебрегается тепловым потоком на кромке полурейбра (трубки одинаково нагреты). Протяженность одного потока ПХИ может быть велика, и тогда в действительности он представляет собой змеевик из последовательно соединенных трубок. Задача о точном расчете теплового состояния панели является частной и связана с доскональной проработкой конкретной конструкции. В более общем случае задачу целесообразно свести к двум одномерным: распространение тепла по ребру перпендикулярно потоку и остывание теплоносителя по мере его движения вдоль потока.

В работе [4] сравнивалась эффективность применения различных теплоносителей для

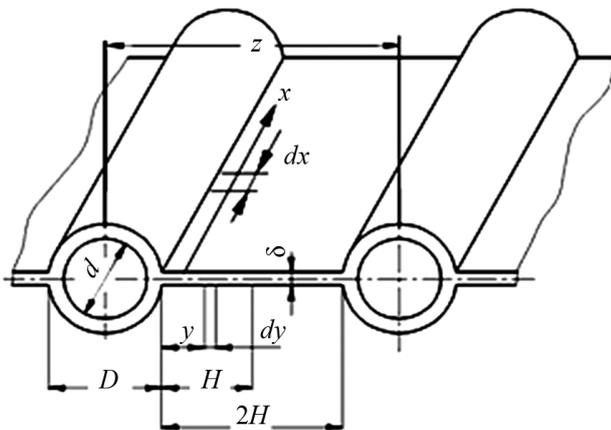


Рис. 1. Схема излучающего элемента панельного холодильника-излучателя

класса ПХИ, близких по свойствам материала и геометрическим характеристикам к прототипам, созданным в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» из композиционных материалов. Было получено, что некоторые массогабаритные преимущества имеет ПХИ, работающий на теплоносителе дифенильная смесь, однако этот результат является частным случаем и не гарантирует преимущества данного теплоносителя при других параметрах излучателя.

В настоящей работе поставлены следующие основные цели:

- 1) на основе модели ПХИ в виде параллельных потоков разработать алгоритмы оптимизации;
- 2) сравнить ПХИ, работающие на жидкометаллическом теплоносителе и на высокотемпературном органическом теплоносителе при найденных для каждого из них оптимальных параметрах.

Поиск оптимальных параметров ПХИ можно проводить на базе аналитических приближенных решений. Такие решения представлены, например, в работах [6–8]. Там предлагается удобный для анализа подход асимптотики «коротких» ребер. Однако в настоящей работе алгоритмы оптимизации разрабатываются на базе прямого численного решения уравнений математической модели [4].

### Математическая модель ПХИ

В силу высокой теплопроводности материала стенки канала вводится еще одно предположение – о постоянстве по окружности внутренней  $T_1$  и внешней  $T_2$  температур трубки, в том числе у корня ребра. Термическое сопротивление материала учитывается ( $T_1 > T_2$ ).

Тогда отводимое от теплоносителя тепло на длине  $dx$  определяется следующими соотношениями:

– количество тепла, отдаваемое теплоносителем,

$$dQ = -Gc_p \cdot dT_f; \quad (1)$$

– количество тепла, переданное внутренней стенке канала от теплоносителя,

$$dQ = \alpha(T_f - T_1)[\pi d] \cdot dx; \quad (2)$$

– количество тепла, прошедшее через стенку канала,

$$dQ = \frac{\lambda_{TP}}{(D-d)/2}(T_1 - T_2)[\pi(d+D)/2] \cdot dx; \quad (3)$$

– количество тепла, излученное наружной поверхностью трубки и оребрением,

$$dQ = (\varepsilon_{\text{ТР}} \sigma T_2^4 - q_{\odot} / 2) [\pi D - 2\delta] \cdot dx + 2Q_R \cdot dx, (4)$$

где  $Q_R$  – тепло, отведенное излучением половиной одного ребра (с двух сторон), равное стоку тепла в ребро;  $T_f, c_p, G$  – температура, удельная теплоемкость и расход теплоносителя через один канал;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи в канале;  $d, D$  – внутренний и внешний диаметр трубок;  $\delta$  – толщина ребра;  $\lambda_{\text{ТР}}$ ,  $\varepsilon_{\text{ТР}}$  – коэффициент теплопроводности материала стенок канала и эффективная (с учетом переизлучения) излучательная способность материала трубок;  $q_{\odot}$  – поток солнечной радиации (эффективный – с учетом отражения);  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>/К<sup>4</sup> – постоянная Стефана–Больцмана.

В стационарном случае все количества тепла  $dQ$  равны. Совместное решение системы (1)–(4) дает возможность определить  $T_f, T_1, T_2, Q$  при известном стоке тепла в ребро  $Q_R$ . Для определения теплового состояния ребра (половины ребра с одной стороны трубки) и вычисления  $Q_R$  служит уравнение излучающего теплопроводного ребра при наличии внешней радиации с соответствующими граничными условиями:

$$\frac{d}{dy} \left( \delta \lambda \frac{dT}{dy} \right) = 2\varepsilon \sigma T^4 - q_{\odot}; (5)$$

$$T|_{y=0} = T_2; \quad \frac{dT}{dy} \Big|_{y=H} = 0,$$

где  $\lambda$  и  $\varepsilon$  – коэффициент теплопроводности и эффективная излучательная способность материала оребрения;  $y, H$  – пространственная координата по ребру и его длина. Уравнение (5) решается итерационно с помощью неявной разностной схемы методом прогонки.

Кроме уравнений (1)–(5) систему следует дополнить теплогидравлическими соотношениями для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , которые принимаются согласно справочной литературе [9, 10].

Заключительным этапом решения является вычисление гидравлического сопротивления канала, которое проводится согласно соотношениям:

$$\Delta p = \xi \frac{\rho_f U^2 L}{2 d};$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Re} \leq 1189 \rightarrow \xi = 64 / \text{Re} \\ \text{Re} > 1189 \rightarrow \xi = 0.316 / \text{Re}^{0.25} \end{array} \right\},$$

где  $\rho_f = f(T_f)$ ,  $U$  – плотность и скорость теплоносителя в канале;  $L$  – длина канала;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса.

Следует отметить, что расчетная методика использует эмпирические теплогидравлические соотношения, которые вызывают доверие, однако могут быть скорректированы при проведении специальных экспериментальных исследований. Допущение о том, что пренебрегается распространением тепла вдоль потока и, в первую очередь, допущение о постоянстве температуры по окружности трубки нуждаются в определении границ применимости. Разработку 2- и 3-мерных моделей мы рассматриваем как следующий этап исследований, направленный на проведение поверочных уточняющих расчетов. Для проведения оптимизационных расчетов целесообразно использовать простую представленную выше математическую модель.

С целью реализации данной математической модели была разработана вычислительная программа. Расчетный шаг по длине потока при различных условиях задавался обратно пропорциональным количеству потоков  $n$  и во всех проведенных расчетах не превышал 1% от  $L$ . Контроль сходимости численного решения уравнения (5) по итерациям осуществляется с помощью разностного аналога уравнения энергетического баланса ребра. При выполнении нескольких итераций значение энергетической невязки  $|\Delta|$  стремится к значению  $|\Delta| \approx 1/N$ , где  $N$  – количество пространственных узлов. Таким образом, погрешности расчета требуемой длины потока, связанные с ошибками вычислительного характера, оцениваются величиной не более 1–2%, а высокое быстродействие и устойчивость сходимости решения разработанной программы позволяет за приемлемое время проводить десятки тысяч расчетов с различными комбинациями исходных данных, что реализовано в следующих алгоритмах.

### Постановка задачи

Свойства материала ПХИ соответствуют свойствам алюминиевых сплавов (плотность  $\rho = \rho_{\text{ТР}} = 2700$  кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность  $\lambda = \lambda_{\text{ТР}} = 180$  Вт/(м·К)). Предполагается наличие «зачерняющего» покрытия ( $\varepsilon = \varepsilon_{\text{ТР}} = 0.9$ ).

В качестве теплоносителя используется либо дифенильная смесь, либо расплав 25% Na и 75% K. Свойства теплоносителей приняты по данным [11].

Условия работы:

- тепловая мощность ПХИ не менее  $Q = 1400$  кВт;
- поток солнечной радиации  $q_{\odot} = 1380$  Вт/м<sup>2</sup>;
- температуры теплоносителя на входе в ПХИ  $T_{f\text{вх}} = 650$  К;
- температуры теплоносителя на выходе из ПХИ  $T_{f\text{вых}} = 380$  К;
- потери давления при перекачивании теплоносителя не более  $\Delta p = 0.1$  МПа.

Заданная максимальная величина потерь давления связана с возможностями электромагнитных насосов, предназначенных для перекачивания жидкометаллического теплоносителя.

Суммарный расход теплоносителя через все каналы задан мощностью и температурами:

$$G_{\Sigma} = Q / \int_{T_{f\text{вых}}}^{T_{f\text{вх}}} c_p \cdot dT.$$

При использовании дифенильной смеси –  $G_{\Sigma} = 2.14$  кг/с, при использовании расплава Na-K –  $G_{\Sigma} = 5.08$  кг/с.

### Оптимизация ПХИ по массе

Масса ПХИ  $M$  включает в себя массу орбления  $M_R = \delta(Z - D)Lnp$ , массу трубок

$M_T = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)Lnp$ , а также массу находяще-

гося в них теплоносителя  $M_f = \frac{\pi d^2}{4}Lnp\rho_f$ , где  $\rho_f$  – средняя плотность теплоносителя в трубках.

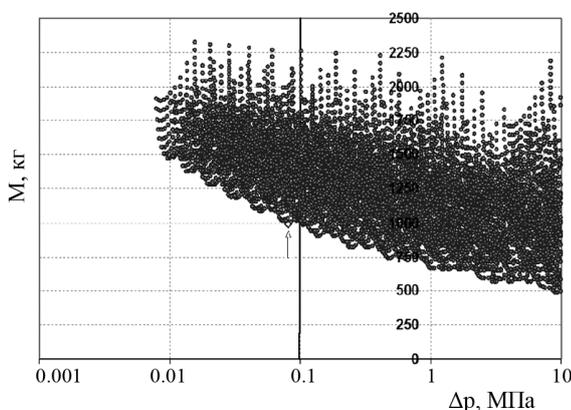


Рис. 2. Масса различных вариантов панельных холодильников-излучателей с теплоносителем дифенильная смесь в зависимости от потерь давления по результатам первой итерации расчета

Теперь выбираются геометрические параметры ПХИ такими, чтобы излучаемая мощность была не менее 1400 кВт, потери давления не превышали 0.1 МПа, а масса была минимальной ( $M = M_R + M_T + M_f \rightarrow \min$ ). Алгоритм оптимизации итерационный. На первой итерации задаются следующие параметры:

- внутренний диаметр трубки  $d$  варьируется от 1 до 15 мм с шагом 1 мм;
- наружный диаметр трубки задается как  $D = d + 2$  (толщина стенки трубки 1 мм);
- расстояние между центрами трубок  $Z = 2H + D$  варьируется от 50 до 150 мм с шагом 10 мм;
- толщина ребра  $\delta$  изменяется от 0.1 до 1 мм с шагом 0.1 мм;
- количество потоков  $n$  изменяется от 4 до 40, как и в работе [4], с шагом 4.

Всего выполняется  $15 \times 10 \times 10 \times 10 = 15000$  расчетов с различными комбинациями параметров. Результаты первой итерации иллюстрируются на рис. 2 для ПХИ с теплоносителем дифенильная смесь. В зависимости от сочетания параметров потери давления изменяются от величин порядка 0.01 МПа до  $10^7$  МПа, масса – примерно от 250 до 2250 кг. Количество вариантов, удовлетворяющих условию  $\Delta p \leq 0.1$  МПа, равно 2410 (16%), из которых выбран единственный с наименьшей массой (табл. 1).

На втором этапе оптимизации уточняется полученный результат. Искомые параметры варьируются в окрестностях найденной точки с меньшим на порядок шагом изменения параметров (см. табл. 1). Уточнение параметров позволило выиграть еще около 5% по массе. Далее будут приводиться только окончательные результаты оптимизации.

Аналогичные вычисления проведены для теплоносителя Na-K (см. табл. 1). В результате получено, что преимущество по массе имеет ПХИ с теплоносителем дифенильная смесь – около 34%. Однако следует обратить внимание, что в обоих вариантах число потоков максимальное из задаваемых по условиям расчета. Поэтому далее проведены расчеты, допускающие большее количество потоков  $n \leq 400$  (см. табл. 1).

В табл. 1 приведена удельная масса панели  $M/F$ , где  $F = n \cdot L \cdot Z$  – площадь конструкции излучателя. Удельная масса характеризует геометрическое совершенство ПХИ. В случае

Таблица 1. Оптимальные варианты ПХИ по минимуму массы при различном количестве потоков

Параметр	Варианты расчетов				
	$n \leq 40$			$n \leq 400$	
	Дифенильная смесь		Na-K	Дифен. смесь	Na-K
	1-я итерация	2-я итерация			
$M$ , кг	990.2	954.9	1277	449.4	513.3
$M/F$ , кг/м <sup>2</sup>	1.97	1.82	2.6	0.82	0.93
$d$ , мм	10	9.6	13.1	3.2	3.9
$\delta$ , мм	0.2	0.19	0.28	0.1	0.1
$Z$ , мм	110	114	119	75	75
$n$	40	40	40	315	400
$L$ , м	114.3	114.9	103	23.1	18.3
$Q_R/Q$	0.752	0.758	0.736	0.833	0.815

большого количества потоков удельная масса ПХИ из алюминиевых сплавов близка к удельной массе ПХИ из композиционных материалов, для которых  $M/F = 0.7-0.8$  кг/м<sup>2</sup>. Также приводится отношение количества тепла, отданного оребрением, к полному отданному количеству тепла. Несмотря на малую толщину, ребра излучают 73–83% мощности.

Исходя из полученных результатов, можно сделать два вывода:

1. При найденных оптимальных параметрах преимущество по массе имеет ПХИ с теплоносителем дифенильная смесь: в случае малого количества потоков  $n = 40$  – около 34%, в случае достаточно большого количества потоков  $n \leq 400$  преимущество составляет около 14%. Далее будем считать дифенильную смесь более предпочтительным теплоносителем.

2. При разработке конструкции ПХИ с минимальной массой следует стремиться к минимально технологически возможной толщине ребра, малому диаметру канала (порядка 3 мм) и большому количеству потоков (сотни).

Тем не менее, наиболее легкий образец ПХИ не является более работоспособным. Созданный математический аппарат позволяет предложить другой вид оптимизации – не по минимальной массе, а по метеоритной неуязвимости ПХИ.

### Оптимизация ПХИ с целью повышения метеоритной неуязвимости

Очевидно, что вероятность неповреждения (ВНП) трубок ПХИ, которую обозначим  $\Omega$ , метеороидами ( $M$ ) и частицами космического

мусора (КМ) является не менее важной величиной, чем масса. Методика расчета ВНП заимствована из [12, 13] и предполагает следующую последовательность действий.

1. На основе решения предельного баллистического уравнения [12] вычисляется критическая масса частицы  $M$  или КМ, которая способна пробить трубку, по формулам

$$m_M = \frac{\pi}{6} \left( \frac{1}{943} \frac{a^3 H_B^4 \rho^2 \delta_T}{v_M^3} \right)^{\frac{54}{19}} \frac{1}{\rho_M^{19}},$$

$$m_{KM} = \frac{\pi}{6} \left( \frac{1}{943} \frac{a^3 H_B^4 \rho^2 \delta_T}{v_{KM}^3} \right)^{\frac{54}{19}} \frac{1}{\rho_{KM}^{19}},$$

где  $\delta_T = (D-d)/2$  – толщина стенки трубки;  $a = 5100$  м/с,  $H_B = 80 \cdot 10^6$  Па,  $\rho = 2700$  кг/м<sup>3</sup> – скорость звука, твердость материала трубки по Бринеллю и плотность соответственно. Если частица является метеороидом, то ее скорость и плотность принимаются равными  $v_M = 18000$  м/с,  $\rho_M = 1000$  кг/м<sup>3</sup> [12]; если частицей является космический мусор, то  $v_M = 8000$  м/с,  $\rho_M = 2700$  кг/м<sup>3</sup>.

2. Вычисляется плотность потока метеороидов с критической массой

$$\Psi_M = 31557600 \cdot k_3 \cdot 10^\Phi,$$

где  $\Phi = -13.4 - 1.21g(m_M \cdot 10^{-3})$  – согласно ГОСТ 25645.128–85 [14];  $k_3 = 0.715$  – коэффициент затенения Земли на орбите высотой 800 км [13].

3. Плотность потока частиц космического мусора [13]:

$$\Psi_{\text{KM}} = 10^A - 10^B,$$

$$A = -6.568 \cdot 10^{-3} \left[ \lg(m_{\text{KM}} \cdot 10^{-3}) \right]^3 -$$

$$-0.186 \left[ \lg(m_{\text{KM}} \cdot 10^{-3}) \right]^2 -$$

$$-2.291 \lg(m_{\text{KM}} \cdot 10^{-3}) - 7.59,$$

$$B = -1.132 \cdot 10^{-3} \left[ \lg(m_{\text{KM}} \cdot 10^{-3}) \right]^3 -$$

$$-4.404 \cdot 10^{-3} \left[ \lg(m_{\text{KM}} \cdot 10^{-3}) \right]^2 -$$

$$-0.988 \cdot \lg(m_{\text{KM}} \cdot 10^{-3}) - 4.828.$$

4. Вычисление ВНП [12, 13]:

$$\Omega = \exp \left[ -(\Psi_M + \Psi_{\text{KM}}) S \tau \right],$$

где  $\tau$  – время пребывания в космическом пространстве (в годах);  $S = n \cdot L \cdot D$  – площадь сечения трубок.

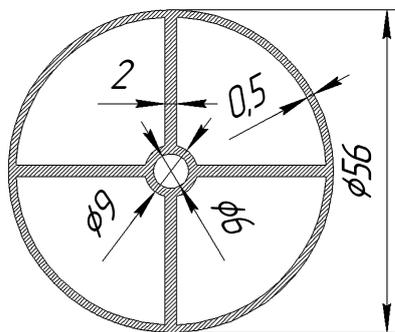


Рис. 3. Одна из схем поперечного сечения трубчатого холодильника излучателя

Процедура вычисления ВНП включена в программу расчета ПХИ. Условия оптимизации несколько изменены. В качестве теплоносителя рассматривается только дифенильная смесь, поэтому увеличены допустимые потери давления до 0.5 МПа. В число варьируемых параметров кроме  $d, \delta, Z, n$  включен также внешний диаметр трубки  $D$ . Расчет заключается в поиске таких геометрических параметров, чтобы излучаемая мощность была не менее 1400 кВт, потери давления не превышали 0.5 МПа, масса была не более некоторой заданной величины, а ВНП стремился к максимуму. Результаты представлены в табл. 2.

Отметим, что при оптимизации по ВНП при ограниченной массе вместо простого увеличения толщины стенок канала оказывается более выгодным еще и увеличение толщины и ширины ребер.

Эффективным способом противометеоритной защиты является применение экранов/бамперов, на которых высокоскоростная частица дробится и рассеивается, что существенно снижает ее поражающие возможности. В развитие этой идеи нашими коллегами предложена оригинальная конструкция излучающего устройства – трубчатый холодильник-излучатель (ТХИ) [15]. Канал с теплоносителем оребрен двумя-четырьмя ребрами и окружен тонким защитным бампером, который одновременно является излучающей поверхностью (рис. 3). ТХИ изготавливается из композиционных материалов или алюминиевых сплавов.

Полученные результаты по ВНП, приведенные в табл. 2, интересно сравнить с характеристиками ТХИ. Расчеты показывают, что при ра-

Таблица 2. Оптимальные варианты ПХИ по вероятности неповреждения высокоскоростными частицами

Параметр	Варианты расчетов		
	$M \leq 2000$ кг	$M \leq 2500$ кг	$M \leq 3000$ кг
$M$ , кг	1993	2499	2893
$M / F$ , кг/м <sup>2</sup>	3.89	4.98	5.91
$d$ , мм	1.8	1.8	1.9
$\delta_T (D)$ , мм	5.4 (12.6)	6.9 (15.6)	7.9 (17.7)
$\delta$ , мм	0.74	0.77	0.84
$Z$ , мм	162	165	170
$n$	350	350	310
$L$ , м	9,0	8.7	9.3
$Q_R / Q$	0,84	0.81	0.80
ВНП ( $\tau = 2$ года)	0.675	0.791	0.842

боте на очень близком режиме трубчатый холодильник имеет массу около 2000 кг ( $M/F = 3.1-3.3 \text{ кг/м}^2$ ) и гораздо более высокую ВНП = 0.966–0.975, однако более сложен в изготовлении по сравнению с обычным панельным излучателем.

Для повышения метеоритной неустойчивости «классического» ПХИ предлагается снабдить каждый поток быстродействующими клапанами, которые будут его отсекают при резком падении давления (т.е. в случае утраты герметичности). На выходе потока целесообразно установить обычный обратный клапан механического действия (пружинный), на входе – более сложный, например, такой, как показан на рис. 4.

Установка клапанов – это простое решение, но методика расчета надежности ПХИ с отсечными клапанами ранее не разрабатывалась. Во-первых, следует учесть массу клапанов при расчете массы ПХИ. Оценки показывают (см. рис. 4), что пара клапанов вместе с прочим оборудованием имеет массу не более 1 кг (но, например, при наличии 300 потоков это дает дополнительно 300 кг). Во-вторых, задается вероятность срабатывания пары клапанов при повреждении одного потока величиной  $\varphi$ . Этот параметр нуждается в экспериментальной отработке и проверке. Сейчас для определенности задано достаточно низкое значение  $\varphi = 0.975$ .

Если  $\Omega$  – это ВНП панельного холодильника-излучателя, и излучатель содержит  $n$  потоков, то ВНП каждого отдельного потока  $\omega = \sqrt[n]{\Omega}$ .

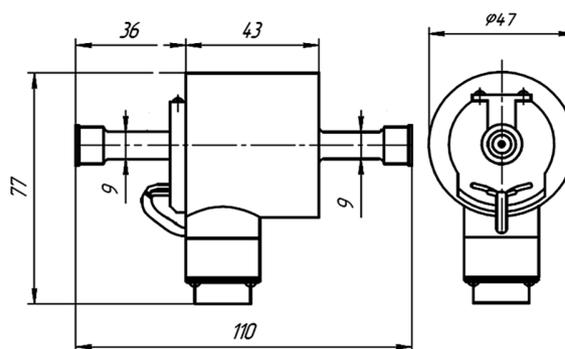


Рис. 4. Электрореле. Масса 405 г, проходной диаметр 6 мм, вероятность срабатывания 0.99999; применяется в пилотируемой космонавтике. Разработка РКК «Энергия»

Количество возможных состояний системы (повреждения/неповреждения) равно  $2^n$ . Из них количество сочетаний по  $i$  из  $n$

$C_n^i = \frac{n!}{(n-i)!i!}$  соответствует количеству вариантов того, что повреждено  $i$  потоков.

Таблица 3. Оптимальные варианты панельных холодильников-излучателей с запорными клапанами

Параметр	Варианты расчетов		
	$M \leq 2000$ кг	$M \leq 2500$ кг	$M \leq 3000$ кг
$M$ , кг	1999	2492	2999
$M/F$ , кг/м <sup>2</sup>	3.46	4.48	5.40
$d$ , мм	2	1.8	1.8
$\delta_T$ , (D), мм	5 (12)	6.1 (14)	7.5 (16.8)
$\delta$ , мм	0.4	0.61	0.64
$Z$ , мм	157	176	185
$n$	320	350	345
$L$ , м	11.5	9.0	8.7
$Q_R/Q$	0.82	0.82	0.80
ВНП ( $\tau = 2$ года)	0.583	0.734	0.821
Количество поврежденных потоков	8	6	5
Надежность ПХИ ( $\tau = 2$ года)	0.987	0.992	0.995

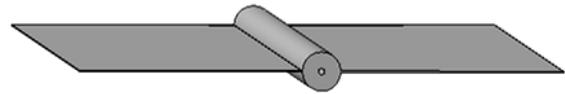
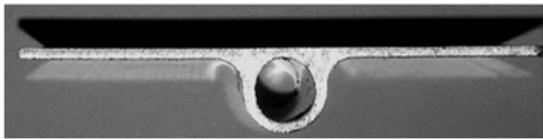


Рис. 5. Фотография цельнотянутого алюминиевого профиля (слева) и предлагаемый прототип (справа)

Вероятность повреждения  $i$  потоков из  $n$  потоков равна  $C_n^i \omega^{n-i} (1-\omega)^i$ , а вероятность того, что повреждено не более чем  $k$  из  $n$  потоков – это  $\sum_{i=0}^{i=k} C_n^i \omega^{n-i} (1-\omega)^i$ . Тогда определение надежности ПХИ, оснащенного запорными клапанами предполагает два действия.

1) Определение количества поврежденных потоков:

$$\sum_{i=0}^{i=k} C_n^i \omega^{n-i} (1-\omega)^i \geq 0.9999999. \quad (6)$$

Здесь определяется такое число  $k$ , чтобы выполнялось неравенство (6). Тогда с вероятностью не менее 0.9999999 (близкой к 1) будет повреждено не более чем  $k$  из  $n$  потоков. Расчеты показывают, что количество поврежденных потоков – достаточно ограниченная величина, даже при относительно низком  $\Omega$ .

2) Определение надежности ПХИ, т.е. вероятности того, что при повреждении  $k$  потоков сработали клапаны

$$P = \sum_{i=0}^{i=k} C_n^i \omega^{n-i} (1-\omega)^i \phi^i.$$

Процедура определения надежности ПХИ с отсечными клапанами была включена в оптимизационный алгоритм по выбору геометрических параметров, аналогично тому, как была включена процедура расчета ВНП. Результаты вычислений приведены в табл. 3 и показывают, что применение отсечных клапанов может существенно повысить надежность ПХИ.

По итогам проведенной работы можно предложить концепцию проектирования «классического» панельного холодильника-излучателя. Он представляет собой набор толстостенных трубок (со стенкой толщиной 5–8 мм), малым диаметром канала (2–3 мм) и большим количеством потоков (300–400). В качестве теплоносителя рекомендуется дифенильная смесь. Изготовление целесообразно выполнять из алюминиевых сплавов вытяжкой цельного

профиля (рис. 5). Преимуществом такой конструкции является высокая технологичность и отсутствие контактных термических сопротивлений, а оснащение каждого потока запорными клапанами позволяет добиться высокой надежности системы.

## Выводы

Разработан математический аппарат для оптимизации панельных холодильников-излучателей, который позволил получить следующие новые результаты.

1. Вопреки традиционным представлениям, жидкометаллический теплоноситель Na-K, несмотря на свою высокую теплопроводность, не дает преимуществ по эффективности панельных холодильников-излучателей по сравнению с дифенильной смесью. Наоборот, теплообменники с этим теплоносителем проигрывают по массе от 34% до 14% при изменении количества потоков от 40 до 400.

2. При разработке конструкции панельных холодильников-излучателей с минимальной массой следует стремиться к минимальной технологически возможной толщине ребра (0.1 мм), малому диаметру канала (2–3 мм) и большому количеству потоков (300–400).

3. Кроме оптимизации по массе предложен альтернативный алгоритм отыскания наилучших параметров с целью повышения метеоритной неустойчивости панельных холодильников-излучателей, когда задана тепловая мощность, предельные потери давления и предельно допустимая масса, а поиск решения проводится по наибольшему значению вероятности неповреждения трубок панельных холодильников-излучателей. При оптимизации по вероятности неповреждения при ограниченной массе вместо простого увеличения толщины стенок канала оказывается более выгодным еще и увеличение толщины и ширины ребер.

4. С целью повышения надежности панельных холодильников-излучателей предлагается оснастить каждый поток запорными клапанами,

которые будут его отсекают при повреждении. Разработаны математические подходы, позволяющие определить количество поврежденных потоков и надежность панельных холодильников-излучателей с запорными клапанами. Проведен поиск оптимальных геометрических параметров.

По итогам проведенной работы предлагается концепция проектирования панельного холодильника-излучателя, который отличается высокой технологичностью, а применение запорных клапанов позволяет добиться его высокой надежности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Грязнов Г.М., Пупко В.Я.** «Топаз-1» – советская космическая ядерно-энергетическая установка // *Природа*. 1991. № 10. С. 30–36.
2. **Синявский В.В.** Научно-технический задел по ядерному электроракетному межорбитальному буксиру «Геркулес» // *Космическая техника и технологии*. 2013. № 3. С. 25–46.
3. **Mason L.S.** A Power Conversion Concept for the Jupiter Icy Moons Orbiter // AIAA-2003-6007. 2003. P. 1–10.
4. **Волков Н.Н., Волкова Л.И., Григорьев А.Л., Ильмов Д.Н., Каревский А.В., Мамонтов Ю.Н., Миронов В.В., Соболев В.В., Филатов Н.И.** Расчетное сопоставление эффективности применения различных теплоносителей для панельных холодильников-излучателей космических аппаратов // *Теплоэнергетика*. 2018. № 11. С. 78–86.
5. **Чечеткин А.В.** Высокотемпературные теплоносители. М.: Энергия, 1971. 496 с.
6. **Черкасов С.Г.** Асимптотические решения в задаче о теплопроводном излучающем ребре // *Теплофизика высоких температур*, 2011. Т. 49. № 6. С. 955–957.
7. **Черкасов С.Г., Лаптев И.В.** Приближенное аналитическое решение двумерной задачи о теплопроводном излучающем ребре // *Теплофизика высоких температур*. 2017. Т. 55. № 1. С. 81–84.
8. **Черкасов С.Г., Лаптев И.В.** Приближенный метод расчета теплового режима панельного холодильника-излучателя // *Тепловые процессы в технике*. 2018. Т. 10. № 3-4. С. 116–124.
9. **Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федьинский О.С.** Жидкометаллические теплоносители. М.: Атомиздат, 1976. 328 с.
10. **Уонг Х.** Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.
11. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
12. **Миронов В.В., Толкач М.А.** Баллистические предельные уравнения для оптимизации системы защиты космических аппаратов от микрометеороидов и космического мусора // *Космическая техника и технологии*. 2016. № 3(14). С. 26–42.
13. **Миронов В.В., Толкач М.А.** Модели метеороидной среды в околоземном космическом пространстве и определение плотности потока метеороидов // *Космическая техника и технологии*. 2017. № 2(17). С. 5–16.
14. **ГОСТ 25645.128–85.** Вещество метеороидное. Модель пространственного распределения. М.: Издательство стандартов, 1985. 24 с.
15. **Волков Н.Н., Волкова Л.И., Грибков П.В., Кушинский А.М., Миронов В.В., Хамдамов С.С.** Элемент устройства сброса низкопотенциальной энергии космического аппарата. Патент на изобретение № 2603698. Российская Федерация, заявка №2015139565 от 18.09.2015, опубликован 27.11.2016. Бюл. №33. 7 с.

## Optimizing the panel-type heat exchanger-irradiator of space power plants

**D.N. Il'mov, V.A. Mavrov**

*SSC «Keldysh Research Centre», Moscow, 125438, Russia  
e-mail: ilmovdn@mail.ru; vasilij.mavrov@yandex.ru*

One of the key elements of the high-power nuclear power plant is heat-exchanging unit – «cooler-irradiator», meant for dumping into outer space the part of the heat that cannot be transformed into a useful work. The panel-type radiator is relatively easy-to-manufacture and processable. It represents a structure of parallel finned tubes through which coolant is circulating. A convenient model for the panel-type irradiator analyzing is its representation in the form of the simple set of parallel tubes (flows) connected by the plate, i.e. two half-fins. The single flow spreading may be rather large, and then, it represents in reality a coiled pipe of series-connected tubes. The problem of the panel thermal state exact calculation is partial and associated with thorough working-out of the specific structure. In a more general case, it is expedient to reduce the problem to the two single-dimension ones, such as heat proliferation over the rib orthogonally to the flow, and the coolant cooling down as it moves alongside the flow. Based on this approach, a mathematical model is proposed, algorithms for optimal parameters searching are developed. It was found, that despite its high thermal conductivity, the liquid metal coolant Na-K does not offer advantages on the panel-type irradiator effectiveness compared to the diphenyl

mixture. While developing the panel-type irradiator structure with minimum weight, it is necessary to strive to the minimum possible fin thickness. Besides the optimization on mass, the alternative algorithm for the best parameters search with the view of enhancing the meteorite invulnerability of the panel-type irradiator while specifying the thermal power, maximum permissible pressure losses and marginal mass, was proposed. The solution search herewith is performed on the greatest probability value of the irradiator tubes non-damaging by the meteoroids and space debris particles. When optimizing for the probability of non-damage at limited mass, instead of the simple channel walls thickness increasing, the fins width and thickness increasing appears even more practical. To improve reliability of the panel-type irradiator the article proposes equipping each flow with shutoff valve, which would cut it off in case of damaging. Mathematical approaches allowing determining the number of damaged flows and reliability of the panel-type irradiator with shutoff valves were developed. Following the results of the work, the concept of the panel type cooler-irradiator designing, distinguishing by the higher fabricability, is being proposed. The shutoff valves implementation would allow attaining its high reliability.

**Keywords:** radiant heat exchanger, panel-type cooler-irradiator, heat-conducting radiating fin, liquid metal coolant, high-temperature organic coolants, diphenyl mixture, non-damage probability by meteoroids and particles of space debris.

## REFERENCES

1. **Gryaznov G.M., Pupko V.Ya.** «Topaz-1» – sovetskaya kosmicheskaya yaderno-ehnergeticheskaya ustanovka [«Topaz-1» Soviet space nuclear power generation uni]. *Priroda – Nature*, 1991, no. 10, pp. 30–36. In Russ.
2. **Sinyavskii V.V.** Nauchno-tekhnicheskij zadel po yadernomu ehlektoraketnomu mezhorbital'nomu buksiru «Gerkules» [Advanced technology for nuclear electric propulsion orbital transfer vehicle «Hercules»]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii – Space Engineering and Technology*, 2013, no. 3, pp. 25–45. In Russ.
3. **Mason L.S.** A Power Conversion Concept for the Jupiter Icy Moons Orbiter. AIAA-2003-6007, 2003. pp. 1–10.
4. **Volkov N.N., Volkova L.I., Grigor'ev A.L., Il'mov D.N., Karevskii A.V., Mamontov Yu.N., Mironov V.V., Sobolev V.V., Filatov N.I.** Raschetnoe sopostavlenie effektivnosti primeneniya razlichnykh teplonositelej dlya panel'nykh kholodil'nikov-izluchatelej kosmicheskikh apparatov [Comparative estimation of the effect from using different coolants in panel-type radiators of spacecrafts]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 2018, vol. 65, no. 11, pp. 825–832. In Russ.
5. **Chechetkin A.V.** *Vysokotemperaturnye teplonositeli* [High-temperature heat exchangers]. Moscow: Energiya, 1971. 496 p. In Russ.
6. **Cherkasov S.G.** Asymptotic solutions in the problem of a heat-conducting radiating rib. *High Temperature*, 2011, vol. 49, no. 6, pp. 924–926.
7. **Cherkasov S.G., Laptev I.V.** Approximate analytical solution of a 2D problem for a heat conducting emitting plate. *High Temperature*, 2017, vol. 55, no. 1, pp. 75–78.
8. **Cherkasov S.G., Laptev I.V.** Priblizhennyj metod rascheta teplovogo rezhima panel'nogo kholodil'nika-izluchatelya [Simplified method for thermal mode computing of a panel-type refrigerator-radiator]. *Teplovyje protsessy v tekhnike – Thermal Processes in Engineering*, 2018, vol. 10, no. 3-4, pp. 116–124. In Russ.
9. **Borishanskii V.M., Kutateladze S.S., Novikov I.I., Fedynskii O.S.** *Zhidkometallicheskie teplonositeli* [Liquid-metal heat exchangers]. Moscow: Atomizdat, 1976. 328 p. In Russ.
10. **Wong H.Y.** *Handbook of Essential Formulae and Data on Heat Transfer for Engineers*, Longman, London, 1977. 236 p. (Russ. Ed. Wong H.Y. *Osnovnye formuly i dannye po teploobmenu dlya inzhenerov. Spravochnik*. Moscow, Atomizdat, 1979. 216 p.)
11. **Vargaftik N.B.** *Spravochnik po teplofizicheskim svojstvam gazov i zhidkostej* [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow: Nauka, 1972. 720 p. In Russ.
12. **Mironov V.V., Tolkach M.A.** Ballisticheskie predel'nye uravneniya dlya optimizatsii sistemy zashhity kosmicheskikh apparatov ot mikrometeoroidov i kosmicheskogo musora [The ballistic limiting equations for optimization of system of protection of space vehicles from micrometeorites and space garbage]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii – Space Engineering and Technology*, 2016, no. 3(14), pp. 26–42. In Russ.
13. **Mironov V.V., Tolkach M.A.** Modeli meteoroidnoj sredy v okolozemnom kosmicheskom prostranstve i opredelenie plotnosti potoka meteoroidov [Models of the meteoritic environment in a near-earth space and definition of fluence of meteorites]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii – Space Engineering and Technology*, 2017, no. 2(17), pp. 5–16. In Russ.
14. *GOST 25645.128-85. Veshhestvo meteornoe. Model' prostranstvennogo raspredeleniya* [Substance meteoric. Model of space distribution]. Moscow, Standardinform Publ., 1985. 24 p. In Russ.
15. **Volkov N.N., Volkova L.I., Gribov P.V., Kushinsky A.M., Mironov V.V., Khamdamov S.S.** *Element ustrojstva sbrosa nizkopotencial'noj ehnergii kosmicheskogo apparata* [Element of spacecraft low-potential energy release device]. Patent RF no. 2603698, 2015.