

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСАДОК АККУМУЛЯТОРОВ ХОЛОДА БОРТОВЫХ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2004 Е. К. Красночуб

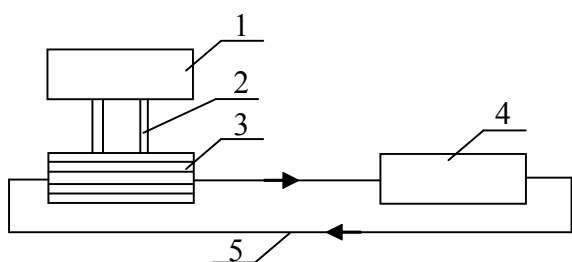
ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Разработаны математические модели теплообмена насадки аккумулятора холода и фотоприемного устройства аппаратуры наблюдения космического аппарата. Приведены основные расчетные формулы. Рассмотрены вопросы, связанные с определением теплофизических характеристик аккумуляторов холода бортовых криогенных систем охлаждения космических аппаратов.

Аккумуляторы холода (АХ) входят в состав бортовой криогенной системы охлаждения (БКСО) аппаратуры наблюдения космического аппарата (КА) и предназначены для обеспечения температурного режима фоточувствительных элементов фотоприемного устройства (ФПУ-ИК). Потребность в аккумуляторах холода обусловлена цикличностью работы систем охлаждения или не-

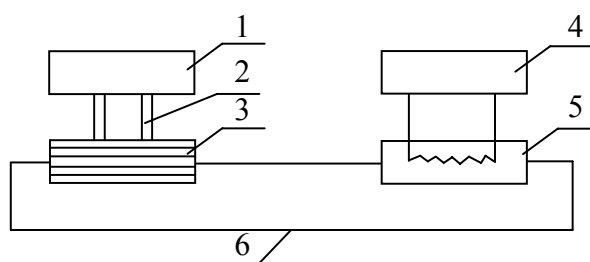
обходимостью получения на их криогенных уровнях дополнительной холодопроизводительности. Системы охлаждения на основе сублимационных аккумуляторов холода [1] обеспечивают на криогенных уровнях полезную холодопроизводительность полностью.

Принципиальные схемы охлаждения и термостатирования ФПУ-ИК на криогенных уровнях БКСО представлены на рис. 1.



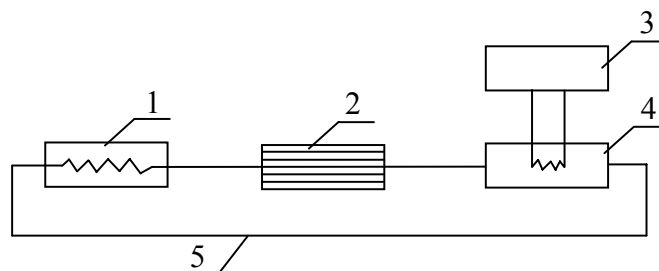
1 - Охлаждение и термостатирование ФПУ-ИК с помощью холодопроводов с использованием теплообменников МКС:

1 – ФПУ-ИК; 2 – холодопроводы; 3 – АХ; 4 – дроссельная МКС, детандерная МКС; 5 – теплообменники ДМКС, детандерная МКС



2 - Охлаждение и термостатирование ФПУ-ИК с помощью холодопроводов с использованием циркуляционного контура:

1 – ФПУ-ИК; 2 – холодопроводы; 3 – АХ; 4 – ГКМ, ТКМ, МК-ступень, РХ; 5 – ТН; 6 – циркуляционный контур



3 - Охлаждение и термостатирование ФПУ-ИК газом циркуляционного контура с использованием АХ:  
1 – ФПУ-ИК; 2 – АХ; 3 – ГКМ, ТКМ, МК-ступень, РХ;  
4 – ТН; 5 – циркуляционный контур

Рис. 1. Принципиальные схемы охлаждения и термостатирования ФПУ-ИК на криогенных уровнях БКСО

На рис. 1 приняты следующие сокращения: ГKM – газовая криогенная машина; ТКМ – теплоиспользующая ГKM; МК-ступень – магнитокалорическая ступень охлаждения; РХ – радиационный холодильник; МКС – микрокриогенная система; ДМКС – дроссельная МКС; ТН – турбоагрегат.

На схемах 1, 2 рис. 1 охлаждение и термостатирование ФПУ-ИК производится с помощью холодопроводов, по которым избыточное тепло от коммутаторов ФПУ-ИК отводится к аккумулятору холода в рабочем режиме ФПУ-ИК. В схеме 3 избыточное тепло от ФПУ-ИК отводится турбоагрегатом по циркуляционному контуру к микрокриогенной системе.

Аккумуляторы холода представляют собой емкости, в которых размещены различные рабочие тела - насадки. На рис. 2 представлена схема охлаждения ФПУ-ИК с аккумулятором холода, насадка которого может состоять, например, из шариков, пористого металла, путанки из проволоки, металлической сетки и т. д. На рис. 3 показана схема криостата для систем охлаждения 1, 2, в котором размещены ФПУ-ИК, криомодуль, обеспечивающий фоновую защиту ФПУ-ИК, с

ИК-фильтром и элементы БКСО с аккумуляторами холода нижнего и верхнего температурных уровней охлаждения ( $T_0 = 25; 80 K$  и  $T_0 = 80; 150 K$ ) на основе металлических рабочих тел.

Нагрев насадки происходит тепловым потоком, поступающим от коммутаторов ФПУ-ИК на маршруте съемки объектов наблюдения аппаратурой КА.

На рис. 4 представлена расчетная схема теплообмена насадки и ФПУ-ИК. Насадка принималась в виде неограниченной пластины с граничными условиями II рода на ее поверхностях: на одной поверхности действует постоянный тепловой поток  $q=const$ , вторая поверхность теплоизолирована ( $q=0$ ). Будем считать насадку однородным телом, имеющим, однако, теплофизические характеристики материала в соответствии с пористостью. Необходимо определить поле температур в насадке на момент окончания маршрута съемки.

Рассмотрим расчетные случаи работы аккумулятора холода.

Расчетный случай 1. Микрокриогенные системы: дроссельная микрокриогенная система или газовая криогенная машина и тур-

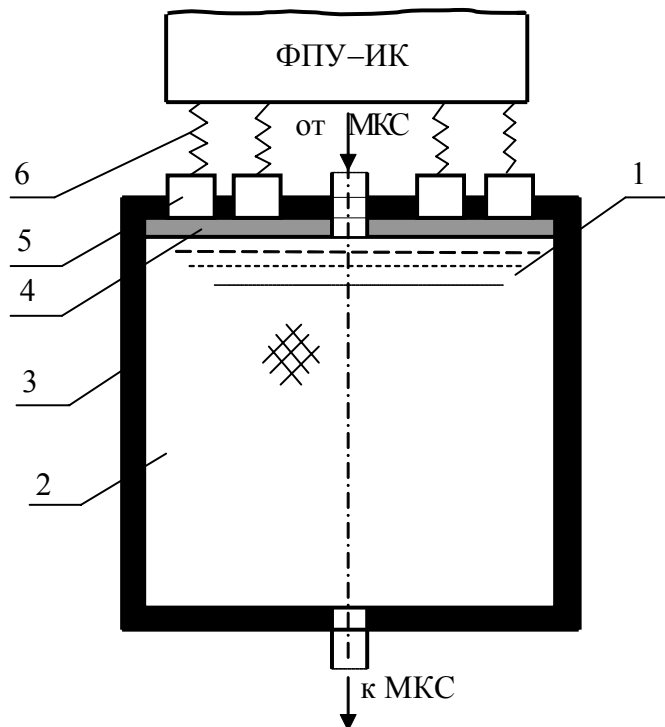


Рис. 2. Схема охлаждения ФПУ-ИК с аккумулятором холода

1 - выравнивающее газораспределительное устройство; 2 - рабочее тело AX (насадка); 3 - теплоизоляция; 4 - теплопроводящая пластина; 5 - контактные площадки AX; 6 - гибкие холодопроводы ФПУ-ИК

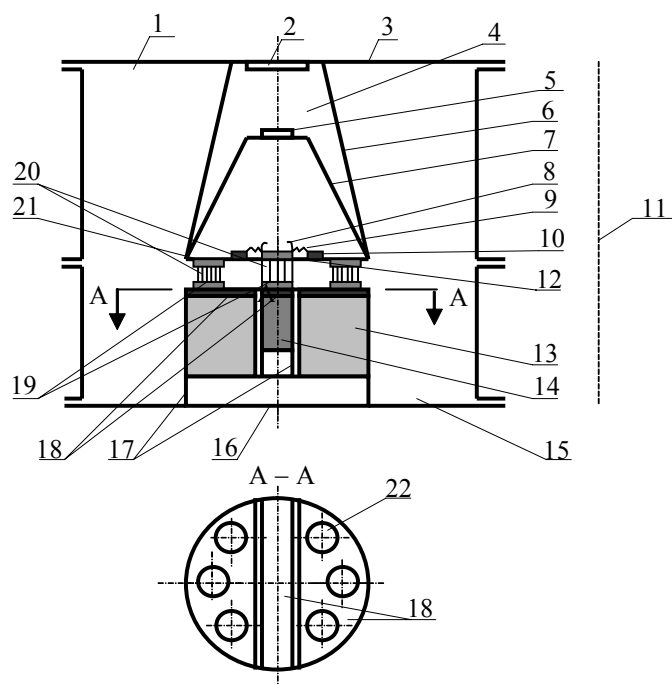


Рис. 3. Схема криостата с аккумулятором холода нижнего и верхнего температурных уровней охлаждения БКСО на основе металлических рабочих тел ( $T_0 = 20; 80 \text{ K}$ ,  $T_0 = 80; 150 \text{ K}$ )

1 - криостат; 2 - иллюминатор; 3 - крышка крепления криомодуля к спецаппаратуре КА; 4 - криомодуль; 5 - ИК-фильтр; 6 - корпус криомодуля; 7 - фоновзащитный экран; 8 - бленда ФПУ-ИК; 9 - шлейфы ФПУ-ИК; 10 - коммутаторы ФПУ-ИК; 11 - рама криостата; 12 - ФПУ-ИК; 13 - аккумулятор холода верхнего температурного уровня охлаждения БКСО; 14 - аккумулятор холода нижнего температурного уровня охлаждения БКСО; 15 - зона размещения агрегатов БКСО; 16 - крышка крепления аккумуляторов холода; 17 - термомосты; 18 - теплопроводные пластины аккумуляторов холода; 19 - контактные площадки аккумуляторов холода; 20 - холодопроводы; 21 - контактные площадки криомодуля; 22 - места расположения контактных площадок аккумулятора холода верхнего уровня охлаждения БКСО

бонагнетатель – не включены. Начальная температура насадки  $T_0 = const$ .

**Расчетный случай 2.** Отличается от расчетного случая 1 тем, что начальная температура насадки  $T(x, 0) = f(x)$ .

**Расчетный случай 3.** Работают газовая криогенная машина и турбонагнетатель или одна дроссельная микрокриогенная система. Начальная температура насадки  $T_0 = const$ .

Нагрев насадки от ФПУ-ИК происходит при ее продувке холодным газом от микрокриогенной системы.

В соответствии с системой координат на рис. 4 дифференциальное уравнение теплообмена в насадке будет иметь вид

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (\tau > 0, x \leq h). \quad (1)$$

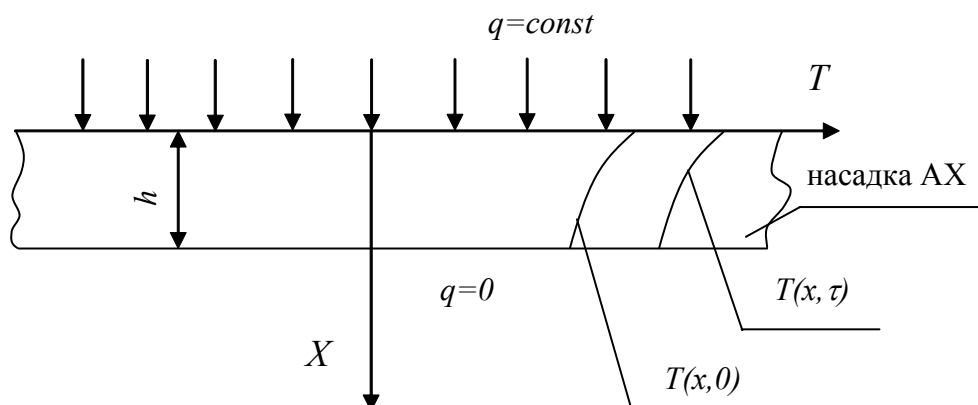


Рис. 4. Расчетная схема теплообмена ФПУ-ИК и насадки АХ

Здесь  $T(x, \tau)$  – температура насадки;  $h$  – высота пластины (длина насадки);  $a$  – коэффициент температуропроводности материала насадки,  $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ , где  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  – соответственно, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, плотность материала насадки;  $\tau$  – время нагрева насадки.

Условия теплообмена

$$T(x, 0) = f(x); \quad (2)$$

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = q(\tau); \quad (3)$$

$$\frac{\partial T(h, \tau)}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

В соответствии с [2] решение задачи будет иметь вид

$$\begin{aligned} T(x, \tau) = & \frac{1}{h} \left( \int_0^h f(x) dx + \frac{a}{\lambda} \int_0^\tau q(\vartheta) d\vartheta \right) + \\ & + \frac{2}{h} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi(h-x)}{h} \cdot \exp\left(-\frac{an^2 \cdot \pi^2 \cdot \tau}{h^2}\right) \times \\ & \times \int_0^h f(x) \cdot \cos \frac{n\pi(h-x)}{h} dx + \\ & + \frac{2a}{h \cdot \lambda} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \cos \frac{n\pi(h-x)}{h} \times \\ & \times \int_0^\tau q(\tau) \exp\left[-\frac{an^2 \cdot \pi^2}{h^2} (\tau - \vartheta)\right] d\vartheta. \end{aligned} \quad (5)$$

При постоянном тепловом потоке на границе  $x = 0$ ,  $q(\tau) = q = const$ , решение (5) принимает вид

$$\begin{aligned} T(x, \tau) = & \frac{1}{h} \left[ \int_0^h f(x) dx + \frac{a\tau}{\lambda} q \right] - \\ & - \frac{q}{\lambda} \cdot \frac{h^2 - 3(h-x)^2}{6h} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \frac{2}{h} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi(h-x)}{h} \cdot \exp\left(-\frac{an^2 \cdot \pi^2 \cdot \tau}{h^2}\right) \times \\ & \times \int_0^h f(x) \cdot \frac{\cos n\pi(h-x)}{h} dx - \\ & - \frac{2hq}{\lambda} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \cos \frac{n\pi(h-x)}{h} \cdot \frac{1}{n^2 \pi^2} \times \\ & \times \exp\left(-\frac{an^2 \cdot \pi^2 \cdot \tau}{h^2}\right). \end{aligned} \quad (6)$$

Решение (6) при  $f(x) = T_0 = const$ , т. е. при равномерной по “ $x$ ” начальной температуре насадки, будет иметь вид

$$\begin{aligned} T(x, \tau) = & T_0 + \frac{q}{\lambda} \left[ \frac{a\tau}{h} - \frac{h^2 - 3(h-x)^2}{6h} - \right. \\ & \left. - 2h \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cos \frac{n\pi(h-x)}{h} \cdot \frac{1}{n^2 \pi^2} \exp\left(-\frac{an^2 \cdot \pi^2 \cdot \tau}{h^2}\right) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, поле температур в насадке определяется выражением (7) для расчетного случая 1 и выражением (6) для расчетного случая 2.

Температурные условия на границе  $x=0$  определяют выбор материала насадки при заданных высоте насадки  $h$  и времени маршрута съемки объектов наблюдения. На границе  $x=0$  температура насадки не должна превосходить некоторый максимум:

$$T(0, \tau) - T_0 \leq T_{max}. \quad (8)$$

Обозначая

$$Fo \equiv a\tau / h^2 \quad (\text{критерий Фурье}), \quad (9)$$

из (7) будем иметь

$$\begin{aligned} \Delta T = & \frac{qh}{\lambda} \left[ Fo + \frac{1}{3} - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \times \right. \\ & \left. \times \cos \pi n \frac{2}{\pi^2 \cdot n^2} \exp(-\pi^2 n^2 Fo) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

На квазистационарном режиме

$$\Delta T = T(o, \tau) - T_0 = \frac{qh}{\lambda} \left[ Fo + \frac{1}{3} \right]. \quad (11)$$

Ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cos \pi n \cdot \frac{2}{\pi^2 \cdot n^2} \cdot \exp(-\pi^2 \cdot n^2 \cdot Fo) > 0. \quad (12)$$

Следовательно, расчеты температуры на поверхности насадки, проведенные по формуле (11), для квазистационарного режима приводят при выбранных высоте насадки  $h$ , времени съемки объектов наблюдения  $\tau$  (времени нагрева насадки) и заданных теплофизических характеристиках материала насадки к завышенным значениям  $\Delta T$ . В [3] время наступления квазистационарного режима рекомендуется брать из условия

$$Fo \geq 0,5, \quad (13)$$

т. е.

$$\tau \geq h^2 / (2a). \quad (14)$$

При  $Fo = 0,5$  значения  $\Delta T$ , вычисленные по формулам (10) и (11), отличаются на  $\sim 0,2\%$ .

Значение высоты насадки  $h$  определяется из соотношения (11) после подстановки

$$Fo = \frac{a\tau}{h^2} = \frac{\lambda\tau}{c\rho h^2}; \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} qc\rho h^2 + 3\lambda q\tau - 3\lambda c\rho h\Delta T &= 0; \\ h^2 - \frac{3\lambda\Delta T}{q} \cdot h + \frac{3\lambda\tau}{c\rho} &= 0; \\ h &= \frac{3}{2} \cdot \frac{\lambda\Delta T}{q} - \sqrt{\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{\lambda\Delta T}{q}\right)^2 - \frac{3\lambda\tau}{c\rho}}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Максимальное значение высоты насадки  $h_{max}$  будет при  $\Delta T = \Delta T_{max}$ ,  $\tau = \tau_{max}$ :

$$\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{\lambda\Delta T_{max}}{q}\right)^2 - \frac{3\lambda\tau_{max}}{c\rho} = 0; \quad (17)$$

$$h_{max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\lambda\Delta T_{max}}{q}; \quad (18)$$

$$\tau_{max} = \frac{3}{4} \lambda c \rho \left(\frac{\Delta T_{max}}{q}\right)^2. \quad (19)$$

Учитывая, что плотность теплового потока

$$q = Q/F, \quad (20)$$

где  $Q$  – тепловыделение коммутаторов,  $F$  – площадь нагрева, из (18) - (20) можно получить

$$\Delta T_{max} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Q}{F\sqrt{\lambda c \rho}} \cdot \sqrt{\tau_{max}}; \quad (21)$$

$$h_{max} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{a} \cdot \sqrt{\tau_{max}}. \quad (22)$$

Масса насадки АХ:

$$M_{max} = \rho \cdot F \cdot h_{max} = \sqrt{3} \left(F \cdot \frac{\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}}{c}\right) \cdot \sqrt{\tau_{max}}. \quad (23)$$

Из (21) – (23) следует, что массогабаритные и температурные характеристики насадки АХ определяются теплофизическими параметрами:

$\mu$  – теплофизическим коэффициентом массы,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}^{\frac{1}{2}}}$ ,

$$\mu = \frac{\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}}{c} = \sqrt{\frac{\lambda \rho}{c}}; \quad (24)$$

$\varepsilon$  – коэффициентом тепловой активности, или коэффициентом аккумуляции тепла [2],

$$\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}^{\frac{1}{2}}}{\text{м}^2 \text{К}},$$

$$\varepsilon = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}; \quad (25)$$

$a$  – коэффициентом температуропроводности материала,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

При заданных значениях массогабаритных и температурных характеристик насадки и времени ее нагрева, а именно  $\Delta T_{max}$ ,  $h_{max}$ ,  $M_{max}$ ,  $\tau_{max}$ , из системы трех уравнений (21) – (23) с тремя пока неизвестными теплофизическими параметрами материала насадки  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  можно получить

$$\lambda = \frac{2Q \cdot h_{max}}{3F \cdot \Delta T_{max}}; \quad (26)$$

$$c = \frac{2Q \cdot \tau_{max}}{M_{max} \cdot \Delta T_{max}}; \quad (27)$$

$$\rho = \frac{M_{max}}{h_{max} \cdot F}. \quad (28)$$

Тогда теплофизические коэффициенты  $\varepsilon$ ,  $a$ ,  $\mu$  будут иметь вид

$$\varepsilon = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Q \sqrt{\tau_{max}}}{F \cdot \Delta T_{max}}; \quad (29)$$

$$a = \frac{1}{3} \cdot \frac{h_{max}^2}{\tau_{max}}; \quad (30)$$

$$\mu = \frac{M_{max}}{\sqrt{3} \cdot F \cdot \sqrt{\tau_{max}}}. \quad (31)$$

Естественно, что при выбранных значениях  $\tau_{max}$ ,  $\Delta T_{max}$ ,  $h_{max}$ ,  $M_{max}$  может не оказаться материала с желаемыми значениями теплофизических параметров  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$ . Однако,

если при выбранном значении  $\tau_{max}$  предположить, что величины  $\Delta T_{max}$ ,  $h_{max}$ ,  $M_{max}$ , а вместе с ними величины  $a$ ,  $\mu$  должны иметь минимальные значения, то величины  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  можно найти из условий

$$\lambda \leq \frac{2Q \cdot h_{max}}{3F \cdot \Delta T_{max}}; \quad (32)$$

$$c \geq \frac{2Q \cdot \tau_{max}}{M_{max} \cdot \Delta T_{max}}; \quad (33)$$

$$\rho \geq \frac{M_{max}}{h_{max} \cdot F}. \quad (34)$$

С учетом (14) и (22) время наступления квазистационарного режима распределения температуры в насадке будет равно

$$\tau_{кв.с.} \geq \frac{(\sqrt{3a\tau_{max}})^2}{2a} \geq 1,5\tau_{max}.$$

Следовательно, квазистационарный режим для максимальной высоты насадки за время нагрева насадки на маршруте съемки не наступает. Однако предложенная методика может быть использована для получения значений параметров насадки АХ в первом приближении.

В таблице 1 приведены параметры насадок при заданных значениях начальных температур и превышениях температуры на поверхности насадок.

Проведенные расчеты по данным таблицы 1 показали, что наиболее приемлемыми материалами для начальной температуры

Таблица 1

Начальная температура насадки, К	Превышение температуры на поверхности насадки, не более, К	Высота насадки, не более, м	Масса насадки, не более, кг
20	1	0,2-0,3	5-10
80	3	0,2-0,3	5-10
150	3	0,2-0,3	5-10

насадки  $T_0 = 20\text{ K}$  является свинец, для  $T_0 = 80, 150\text{ K}$  – натрий и магний. С уменьшением коэффициента  $\mu$  уменьшается и масса насадки.

Расчетный случай 3 рассматривает нагрев насадки постоянным тепловым потоком  $q$  при продувке насадки холодным газом от микрокриогенной системы.

Предложим решение расчетного случая 3, основанное на использовании решений расчетных случаев 1, 2 и дополненное решением соответствующей задачи с внутренними источниками «холода» в насадке. Будем считать, что в насадке равномерно распределены внутренние источники «холода» суммарной интенсивностью, равной количеству тепла, вынесенного из насадки в единицу времени.

Решение задачи с внутренними источниками тепла, согласно принципу суперпозиции, может быть получено путем суммирования решений двух задач: одной – без внутренних источников, но с данными начальными и граничными условиями ( $t_1$ , расчетный случай 1, 2), и второй – с внутренними источниками, но с нулевыми начальными и граничными условиями ( $t_q$ ) [3]:

$$t = t_1 - t_q, \quad (35)$$

где  $t$  – температура насадки.

При граничных условиях II рода решение  $t_q = t_{ad}$ , где  $t_{ad}$  – адиабатическая температура в насадке к моменту времени  $\tau$ , т. е. температура, которую насадка с внутренними источниками «холода» приобрела бы при полном отсутствии теплообмена на поверхности. Эта температура равна

$$t_{ad} = \frac{1}{c \cdot \rho} \int_0^\tau q_V \cdot d\tau, \quad (36)$$

где  $q_V$  – мощность тепловых источников, отнесенная к единице объема насадки.

Решение (35) приобретает вид

$$t = t_1 - \frac{1}{c \cdot \rho} \cdot \int_0^\tau q_V \cdot d\tau. \quad (37)$$

В соответствии с (11) и (37) для задачи с источниками тепла будем иметь

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{q\tau}{c \cdot \rho \cdot h} - \frac{q_0 \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot h} + \frac{1}{3} \cdot \frac{qh}{\lambda} = \\ &= \frac{\tau}{c \cdot \rho \cdot h} (q - q_0) + \frac{1}{3} \cdot \frac{qh}{\lambda}; \end{aligned} \quad (38)$$

$$h = \frac{3}{2} \cdot \frac{\lambda \cdot \Delta T}{q} - \sqrt{\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{\lambda \cdot \Delta T}{q}\right)^2 - 3a\tau \cdot \left(1 - \frac{q_0}{q}\right)}, \quad (39)$$

где  $q_0 = q_V \cdot h$  – мощность тепловых источников, отнесенная к единице площади.

Тогда

$$\tau_{max} = \frac{3}{4} \lambda \cdot c \cdot \rho \left(\frac{\Delta T_{max}}{q}\right)^2 \cdot \frac{q}{1 + q_0}, \quad (40)$$

а  $h_{max}$  определяется по (18). Уравнения (19) и (40) отличаются множителем  $q/(1+q_0)$ .

После преобразований получаем

$$\lambda \leq \frac{2Q \cdot h_{max}}{3F \cdot \Delta T_{max}}; \quad (41)$$

$$\rho \geq \frac{M_{max}}{h_{max} \cdot F}; \quad (42)$$

$$c \geq \frac{2Q \cdot \tau_{max}}{M_{max} \cdot \Delta T_{max}} \cdot \frac{q - q_0}{q}. \quad (43)$$

Выражения (32), (34) и, соответственно, (41), (42) одинаковы, а (33) и (43) отлича-

ются множителем  $\frac{q - q_0}{q}$ .

Таким образом, предложенная методика позволяет для бортовых криогенных систем охлаждения сделать выбор материалов насадок аккумуляторов холода, исходя из имеющихся габаритно-массовых ограничений, условий теплообмена фотоприемного устройства и насадки и условий работы микрокриогенных систем. Методика может быть использована для моделирования процессов теплообмена в элементах конструкций и приборов различного назначения.

**Список литературы**

1. Красночуб Е. К. Исследование возможности использования сублимационных аккумуляторов холода для бортовых криогенных систем охлаждения маломассогабаритных космических аппаратов // Сб.научно-тех-

нических статей по ракетно-космической технике.- Самара: ЦСКБ, 1999. - С.182-184.

2. Лыков А. В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967. - 600 с.

3. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. - Л.: Энергия, 1968. - 304 с.

**DETERMING THERMAL PHYSICS CHARACTERISTIC OF COLD ACCUMULATOR NOZZLES OF SPACECRAFT AIRBORNE CRYOGENIC COOLING SYSTEMS.**

© 2004 E. K. Krasnochub

State Research and Production Space Rocket Centre "TSSKB-Progress"

Mathematical heat exchange models of a cold accumulator nozzle and photoreceiver of spacecraft supervision equipment are developed. Basic calculation formulas are given. Issues connected with determining thermal characteristic of cold accumulators of spacecraft airborne cryogenic cooling system are discussed.