

## ГЛАВА 2. Проектирование пассивной тепловой защиты КА

В качестве пассивной тепловой защиты космических аппаратов и отдельных агрегатов, входящих в их состав, наиболее часто используют экранно-вакуумную теплоизоляцию (ЭВТИ), представляющую собой систему экранов, передача теплового потока через которую осуществляется, в основном, посредством излучения. Обеспечение теплового режима с помощью ЭВТИ применяют, в частности, в конструкции баков с криогенной жидкостью, модулей КА и аппаратов, размещаемых на поверхности Луны и других планет. В этом случае главной задачей теплового проектирования таких конструкций является выбор необходимого числа экранов, обеспечивающих требуемый тепловой режим.

Рассмотрим вопросы теплового проектирования указанных конструкций на следующих примерах.

### 8. Определение числа экранов, обеспечивающих тепловой режим лунного модуля

Расчет носит поверочный характер. Будем считать заданными: форму аппарата и его размеры; количество членов экипажа и мощность, рассеиваемую приборами внутри аппарата; температуру внутри аппарата и его оболочки  $T_0$ ; оптические свойства внешней поверхности аппарата, экранов и поверхности Луны; закон изменения температуры поверхности Луны и потока излучения Солнца во времени (угол возвышения Солнца); значения соответствующих диффузных угловых коэффициентов.

Примем также в качестве допущений, что днище аппарата идеально теплоизолировано, а поверхность Луны является абсолютно черной.

Изменение температуры поверхности Луны на ее экваторе представлено на рис. 8.1.

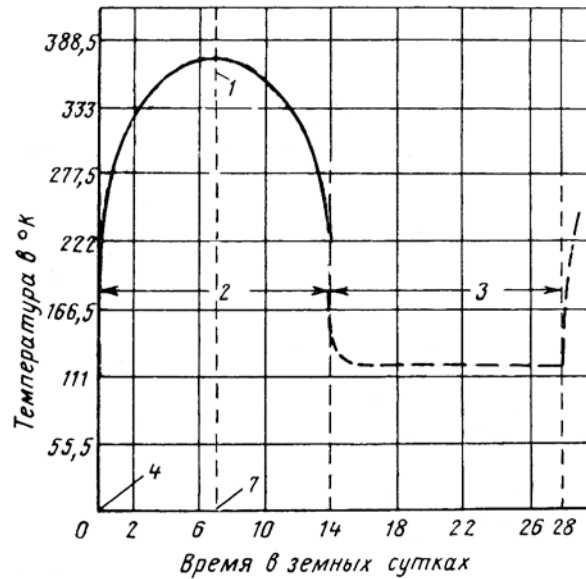


Рис. 8.1. Изменение температуры поверхности Луны во времени (в земных сутках): 1 — полдень, соответствующий 7 суткам после восхода Солнца; 2 — лунный день; 3 — лунная ночь; 4 — момент начала восхода Солнца

В период лунного дня температура лунной поверхности изменяется в соответствии с формулой

$$T_m = 373,5 \sin^{1/6}(\beta_S), \quad (8.1)$$

где  $\beta_S$  — угол между направлением на Солнце и горизонталью (угол возвышения Солнца), равный

$$\beta_S = \frac{90 \cdot \tau_a}{7}. \quad (8.2)$$

В формуле (8.2)  $\tau_a$  — время, отсчитываемое от восхода Солнца в земных сутках.

В период лунной ночи температура поверхности Луны принимается равной 111 К.

Для участка поверхности лунного модуля, покрытого ЭВТИ с числом слоев  $n$  в условиях установившегося теплообмена справедливы следующие выражения для плотности результирующего потока излучения,

рис. 8.2:

$$q_{0,1} = \frac{\sigma(T_0^4 - T_1^4)}{\frac{1}{\varepsilon_0} + \frac{1}{\varepsilon} - 1} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\varepsilon_0 + \varepsilon - \varepsilon_0 \varepsilon} \sigma(T_0^4 - T_1^4); \quad (8.3)$$

$$q_{1,2} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon} - 1} = \frac{\varepsilon \sigma(T_1^4 - T_2^4)}{(2 - \varepsilon)}; \quad (8.4)$$

$$q_{n-1,n} = \frac{\varepsilon \sigma(T_{n-1}^4 - T_n^4)}{2 - \varepsilon}; \quad (8.5)$$

$$q_n = \varepsilon_n \sigma T_n^4 - A_S q_S \cos \Theta_S - \varepsilon_n \sigma T_m^4 \varphi_{m,n}; \quad (8.6)$$

$$q_{0,1} = q_{1,2} = q_{n-1,n} = q_n. \quad (8.7)$$

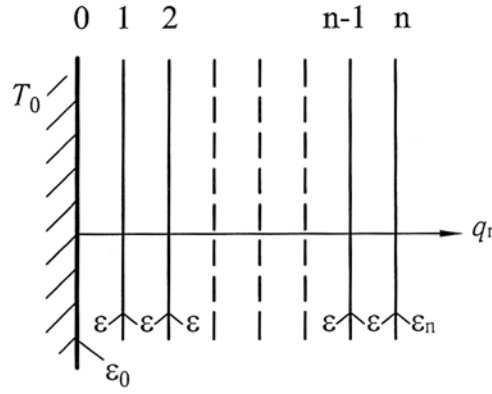


Рис. 8.2. Схема расположения экранов на поверхности лунного модуля с температурой  $T_0$ , равной температуре, поддерживаемой внутри модуля

В формуле (8.6)  $\varphi_{m,n}$  — диффузный средний угловой коэффициент, определяющий долю собственного излучения лунной поверхности, падающей на рассматриваемый участок поверхности модуля;  $\Theta_S$  — угол между направлением на Солнце и внешней нормалью к поверхности участка модуля, рис. 8.3.

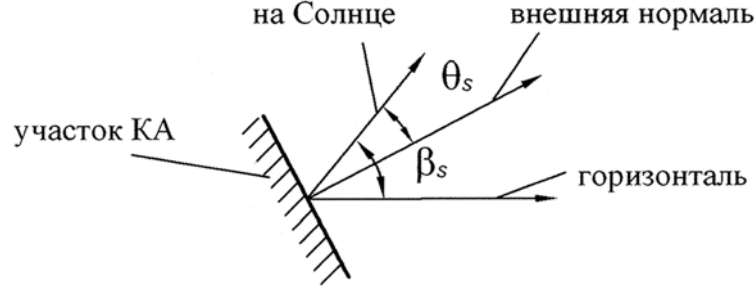


Рис. 8.3. К определению углов  $\Theta_s$  и  $\beta_s$

В уравнениях (8.3)–(8.6) содержатся четыре неизвестных температуры  $T_1, T_2, T_{n-1}$  и  $T_n$ . Для дальнейшего расчета необходимо знать лишь температуру внешнего экрана  $T_n$ . Выразим ее через известную температуру  $T_0$ , исключив из рассмотрения другие неизвестные температуры.

Из выражений (8.4) и (8.5) с учетом (8.7) следует, что

$$T_1^4 - T_2^4 = T_{n-1}^4 - T_n^4. \quad (8.8)$$

Последнее соотношение означает, что разность четвертых степеней температур двух соседних слоев одинакова для всех слоев, участвующих в теплообмене излучением. Это обстоятельство позволяет написать

$$T_1^4 - T_n^4 = (T_{n-1}^4 - T_n^4)(n - 1). \quad (8.9)$$

Приравнивая правые части выражений (8.3) и (8.5), найдем

$$\frac{\varepsilon_0(T_0^4 - T_1^4)}{\varepsilon_0 + \varepsilon - \varepsilon_0\varepsilon} = \frac{T_{n-1}^4 - T_n^4}{2 - \varepsilon}. \quad (8.10)$$

Выразим из (8.10) в явном виде значение  $T_0^4$

$$T_0^4 = T_1^4 + \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon - \varepsilon_0\varepsilon}{\varepsilon_0(2 - \varepsilon)}(T_{n-1}^4 - T_n^4). \quad (8.11)$$

Используя далее совместно уравнения (8.5) и (8.6), получим

$$T_{n-1}^4 - T_n^4 = \frac{(2 - \varepsilon)\varepsilon_n}{\varepsilon} T_n^4 - \frac{2 - \varepsilon}{\varepsilon\sigma} (\varepsilon_n\sigma T_m^4\varphi_{m,n} + A_S q_S \cos \Theta_s). \quad (8.12)$$

Представим (8.11), подставив в него вместо  $T_1^4$  выражение из соотношения (8.9), в виде

$$T_0^4 = T_n^4 + (T_{n-1}^4 - T_n^4) \left[ \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon - \varepsilon_0 \varepsilon}{\varepsilon_0(2 - \varepsilon)} + (n - 1) \right]. \quad (8.13)$$

Заменяем в последнем уравнении разность  $(T_{n-1}^4 - T_n^4)$  ее значением из соотношения (8.12) и найдем

$$T_0^4 = T_n^4 + C_1 \cdot C_2 T_n^4 - C_2 C_3, \quad (8.14)$$

где

$$C_1 = \frac{(2 - \varepsilon) \varepsilon_n}{\varepsilon}; \quad (8.15)$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon - \varepsilon_0 \varepsilon}{\varepsilon_0(2 - \varepsilon)} + n - 1; \quad (8.16)$$

$$C_3 = \frac{2 - \varepsilon}{\varepsilon \sigma} (\varepsilon_n \sigma T_m^4 \varphi_{m,n} + A_S q_S \cos \Theta_S). \quad (8.17)$$

Из формулы (8.14) может быть найдена неизвестная температура внешнего экрана

$$T_n = \sqrt[4]{\frac{T_0^4 + C_2 \cdot C_3}{1 + C_1 \cdot C_2}}. \quad (8.18)$$

Подстановка последнего выражения в формулу (8.6) позволяет получить соотношение для расчета плотности результирующего потока излучения внешней поверхности лунного модуля

$$q_n = \varepsilon_n \sigma \left( \frac{T_0^4 + C_2 C_3}{1 + C_1 C_2} \right) - \varepsilon_n \sigma T_m^4 \varphi_{m,n} - A_S q_S \cos \Theta_S. \quad (8.19)$$

Знак результирующего потока в формуле (8.19) может быть как положительным, так и отрицательным. Положительное его значение указывает на то, что излучение покидает рассматриваемый участок поверхности, а отрицательное — наоборот.

Полный поток результирующего излучения стороны аппарата площадью  $F$  равен

$$Q = q_n \cdot F. \quad (8.20)$$

Разбивая поверхность лунного модуля на ряд участков и рассчитывая результирующие потоки для каждого из них по формуле (8.20), можно определить суммарный результирующий поток излучения для всего модуля, который либо покидает аппарат, либо проникает в него

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N q_{n_i} \cdot F_i - Q_{\text{чел}} \cdot p - Q_{\text{пр}}, \quad (8.21)$$

где  $Q_{\text{чел}}$  — мощность, рассеиваемая одним членом экипажа;  $p$  — число членов экипажа;  $Q_{\text{пр}}$  — мощность, рассеиваемая приборами внутри модуля.

Для обеспечения заданной температуры  $T_0$  в объеме модуля суммарный результирующий поток должен быть равен 0

$$Q_{\Sigma} = 0. \quad (8.22)$$

Достижение этой цели является задачей проектирования системы обеспечения теплового режима (СОТР). Выполнить условие (8.22) можно попытаться, в частности, выбором соответствующего количества экранов, закрывающих внешнюю поверхность модуля или отдельные ее части (величина  $n$  в формулах (8.16) и (8.19)). Если этой меры оказывается недостаточно, то внутри модуля следует предусмотреть нагреватель или холодильное устройство в зависимости от знака величины  $Q_{\Sigma}$ . Расчеты теплового режима модуля необходимо выполнить для условий лунного дня и лунной ночи.

Остановимся на некоторых частных случаях использования полученного выше выражения для плотности потока результирующего излучения (8.19). Исключая из уравнения (8.19) член, определяющий поток прямого солнечного излучения, поглощаемый изолированной оболочкой модуля, получим зависимость для расчета плотности потока результирующего излучения между экранированной стенкой и лунной поверхностью

$$q_{\Pi} = \varepsilon_n \sigma \left( \frac{T_0^4 + C_2 \cdot C_3}{1 + C_1 \cdot C_2} \right) - \varepsilon_n \sigma T_m^4 \varphi_{m,n}, \quad (8.23)$$

где

$$C_3 = \frac{(2 - \varepsilon)}{\varepsilon} \varepsilon_n T_m^4 \varphi_{m,n}. \quad (8.24)$$

Если в указанных условиях теплообмена ( $q_S = 0$ ) поверхность обращена к Луне, то в двух последних формулах достаточно строго величину углового коэффициента  $\varphi_{m,n}$  можно принять равной 1.

Для расчета плотности потока результирующего излучения между плоской пластиной, обращенной к Солнцу, и Солнцем в уравнении (8.19) следует опустить слагаемые, содержащие  $T_m^4$ , и определять  $q_n$  по формуле

$$q_n = \varepsilon_n \sigma \left( \frac{T_0^4 + C_2 C_3}{1 + C_1 C_2} \right) - A_S q_S \cos \Theta_S, \quad (8.25)$$

где

$$C_3 = \frac{(2 - \varepsilon)}{\varepsilon \sigma} A_S q_S \cos \Theta_S. \quad (8.26)$$

Плотность результирующего потока излучения, характеризующая потери тепла КА, находящегося в дальнем космосе, когда на него не действует излучение Солнца, Луны и других планет, определяется формулой

$$q_n = \frac{\varepsilon_n \sigma T_0^4}{1 + C_1 C_2}. \quad (8.27)$$

и  $C_3 = 0$ .

В этом случае, если излучательная способность внешней поверхности последнего экрана  $\varepsilon_n = \varepsilon$ , то формула (8.27) принимает вид

$$q_n = C_{\varepsilon, \varepsilon_0} \cdot \sigma T_0^4,$$

где

$$C_{\varepsilon, \varepsilon_0} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\varepsilon + \varepsilon_0(1 - \varepsilon) + \varepsilon_0[2n - 1 - (n - 1)\varepsilon]}. \quad (8.28)$$

Из последнего выражения видно, что при отсутствии экранирования ( $n = 0$ )

$$q_n = \varepsilon_0 \sigma T_0^4.$$

Значение равновесной температуры внешней поверхности лунного модуля  $T_{n,p}$  определяется из уравнения (8.6)

$$T_{n,p} = \sqrt[4]{\frac{A_S q_S \cos \Theta_S}{\varepsilon_n \sigma} + T_m^4 \varphi_{m,n}}$$

и для заданного ее положения относительно Луны и Солнца сильно зависит от отношения поглотительной способности к излучательной  $A_S/\varepsilon_n$ .

На рис. 8.4, в качестве примера, показана зависимость равновесной температуры горизонтальной поверхности, обращенной к Солнцу ( $\varphi_{m,n} = 0$ ) от времени для трех различных отношений  $A_S/\varepsilon_n$ .

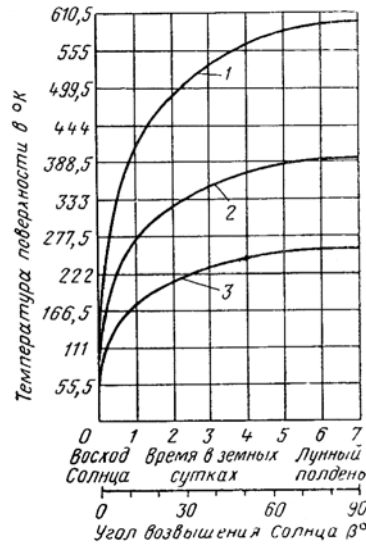


Рис. 8.4. Зависимость равновесной температуры теплоизолированной с внутренней стороны горизонтальной поверхности: 1 — полированный алюминий  $\varepsilon = 0,05$ ,  $A_S = 0,26$ ; 2 — черное тело; 3 — белая краска  $\varepsilon = 0,95$ ,  $A_S = 0,18$ .



## 9. Выбор оптимального числа теплоизолирующих экранов бака с криогенным компонентом топлива

Для длительного хранения криогенного топлива в условиях космического пространства используют баки с пассивной системой обеспечения теплового режима (ПСОТР), основой которой служит многослойная экранно-вакуумная тепловая изоляция (ЭВТИ). При увеличении числа слоев ЭВТИ уменьшаются поток тепла в стенку бака и масса испарившейся жидкости, но одновременно возрастает и масса самой тепловой защиты. В этом случае одной из основных задач теплового проектирования ПСОТР является выбор такого числа экранов, которое обеспечивает минимум суммарной массы тепловой защиты  $m_{\text{тепл}}$

$$m_{\Sigma} = m_{\text{тепл}} + m_{\text{исп}}.$$

Рассмотрим два варианта решения поставленной задачи, в первом из которых жидкость в баке находится при температуре испарения  $T_1$ , а во втором — в переохлажденном состоянии при температуре  $T_{\text{нач}}$ .

Запишем выражение для плотности результирующего потока излучения, поступающего в условиях установившегося теплообмена к внешней теплоизолированной поверхности бака, в виде

$$q_{\text{рез}} = \frac{\sigma(T_S^4 - T_1^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_S} - \frac{1}{2}\right) + 2N \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{эк}}} - \frac{1}{2}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_{\delta}} - \frac{1}{2}\right)}, \quad (9.2)$$

где  $T_S$  — температура внешней поверхности ЭВТИ;  $T_1$  — температура поверхности бака, принимаемая равной средней температуре жидкости в баке;  $\varepsilon_S, \varepsilon_{\text{эк}}, \varepsilon_{\delta}$  — степени черноты внешней поверхности ЭВТИ, экранов и стенки бака соответственно;  $N$  — число экранов.

В первом варианте расчета, когда все подведенное к жидкости тепло идет на ее испарение (прогрев жидкости до температуры испарения отсутствует) количество испарившейся жидкости вычисляют по формуле

$$m_{\text{исп}} = \frac{q_{\text{рез}} \cdot S \cdot \tau_{\text{исп}}}{r_{\text{исп}}}, \quad (9.3)$$

где  $S$  — нагреваемая поверхность бака;  $\tau_{\text{исп}}$  — время испарения;  $r_{\text{исп}}$  — теплота парообразования жидкости.

Масса тепловой изоляции ЭВТИ может быть представлена суммой масс экранов  $m_{\text{эк}}$  и прокладок (вуали) между ними  $m_{\text{пр}}$

$$\begin{aligned} m_{\text{тепл}} &= m_{\text{эк}} + m_{\text{пр}} = NS\delta_{\text{эк}}\rho_{\text{эк}} + (N-1)S\delta_{\text{пр}}\rho_{\text{пр}} = \\ &= [N\delta_{\text{эк}}\rho_{\text{эк}} + (N-1)\delta_{\text{пр}}\rho_{\text{пр}}] S, \end{aligned} \quad (9.4)$$

где  $\delta_{\text{эк}}, \delta_{\text{пр}}$  — толщины экранов и прокладок, а  $\rho_{\text{пр}}, \rho_{\text{эк}}$  — плотности их материалов соответственно.

Подставляя в соотношение (9.3) вместо  $q_{\text{рез}}$  его выражение из (9.2) и суммируя полученную зависимость с  $m_{\text{тепл}}$  из (9.4), найдем

$$\begin{aligned} m_{\Sigma} &= \frac{\sigma(T_S^4 - T_1^4) S \tau_{\text{исп}}}{\left[ \left( \frac{1}{\varepsilon_S} - \frac{1}{2} \right) + 2N \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{эк}}} - \frac{1}{2} \right) + \left( \frac{1}{\varepsilon_{\delta}} - \frac{1}{2} \right) \right] r_{\text{исп}}} + \\ &+ [N\delta_{\text{эк}}\rho_{\text{эк}} + (N-1)\delta_{\text{пр}}\rho_{\text{пр}}] S. \end{aligned} \quad (9.5)$$

Функция  $m_{\Sigma}$  зависит от числа экранов и имеет экстремум. Взяв производную от  $m_{\Sigma}$  по числу экранов  $N$  и приравняв ее нулю, получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial m_{\Sigma}}{\partial N} &= \frac{-2 \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{эк}}} - \frac{1}{2} \right) \sigma(T_S^4 - T_1^4) S \tau_{\text{исп}}}{\left[ \left( \frac{1}{\varepsilon_S} - \frac{1}{2} \right) + 2N \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{эк}}} - \frac{1}{2} \right) + \left( \frac{1}{\varepsilon_{\delta}} - \frac{1}{2} \right) \right]^2 r_{\text{исп}}} + \\ &+ (\delta_{\text{эк}}\rho_{\text{эк}} + \delta_{\text{пр}}\rho_{\text{пр}}) S = 0. \end{aligned} \quad (9.6)$$

Обозначим

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{1}{\varepsilon_S} - \frac{1}{2}; \quad b = \frac{1}{\varepsilon_{\text{эк}}} - \frac{1}{2}; \quad c = \frac{1}{\varepsilon_{\delta}} - \frac{1}{2}; \\ d &= 2 \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{эк}}} - \frac{1}{2} \right) \sigma(T_S^4 - T_1^4) S \tau_{\text{исп}}, \end{aligned} \right\} \quad (9.7)$$

Из формулы (9.6) с учетом обозначений (9.7) следует, что

$$\frac{d}{(a + 2Nb + c)^2 r_{\text{исп}}} = K, \quad (9.8)$$

где

$$K = (\delta_{\text{эк}}\rho_{\text{эк}} + \delta_{\text{пр}}\rho_{\text{пр}}) \cdot S. \quad (9.9)$$

Выражая  $N$  из (9.8), найдем

$$N = N_{\text{опт}} = \frac{1}{2b} \sqrt{\frac{d}{K \cdot r_{\text{исп}}}} - \frac{a+c}{2b}. \quad (9.10)$$

После подстановки в формулу (9.10) вместо  $a, b, c, d$  и  $K$  их выражений из (9.7), (9.8) получим формулу для расчета оптимального числа экранов

$$N_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\sigma(T_S^4 - T_1^4) \cdot \tau_{\text{исп}}}{2r_{\text{исп}} \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{эк}}} - \frac{1}{2} \right) (\delta_{\text{эк}}\rho_{\text{эк}} + \delta_{\text{пр}}\rho_{\text{пр}})} - \frac{\left( \frac{1}{\varepsilon_S} - \frac{1}{2} \right) + \left( \frac{1}{\varepsilon_\delta} - \frac{1}{2} \right)}{2 \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{эк}}} - \frac{1}{2} \right)}}. \quad (9.11)$$

Во втором варианте расчета жидкость в баке имеет температуру ниже температуры кипения и требуется некоторое время на ее подогрев до этой температуры. Если общее время пребывания аппарата на орбите составляет  $\tau$ , а время нагрева переохлажденной жидкости от  $T_{\text{нач}}$  до температуры кипения  $\tau_{\text{н}}$ , то

$$\tau_{\text{исп}} = \tau - \tau_{\text{н}}. \quad (9.12)$$

Количество энергии, затрачиваемой на изменение температуры жидкости массой  $m_{\text{т}}$  в интервале  $\Delta T = T_{\text{кип}} - T_{\text{нач}}$ , связано с плотностью результирующего потока излучения соотношением

$$m_{\text{т}}c_{\text{р}}(T_{\text{кип}} - T_{\text{нач}}) = q_{\text{рез}} \cdot S \cdot \tau_{\text{н}}, \quad (9.13)$$

где  $q_{\text{рез}}$  определяется по формуле (9.2), в которой вместо температуры  $T_1$  используется температура  $T_{\text{нач}}$ .

Из формулы (9.13) время, потребное на подогрев массы компонента топлива  $m_{\text{т}}$ , равно

$$\tau_{\text{н}} = \frac{m_{\text{т}}c_{\text{р}}(T_{\text{кип}} - T_{\text{нач}})}{q_{\text{рез}} \cdot S}. \quad (9.14)$$

Подставляя  $\tau_{\text{н}}$  из (9.14) в формулу (9.12) с учетом выражения (9.2), получим

$$\tau_{\text{исп}} = \tau - \frac{m_{\text{т}} c_{\text{р}} \Delta T \left[ \left( \frac{1}{\varepsilon_S} - \frac{1}{2} \right) + 2N \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{эк}}} - \frac{1}{2} \right) + \left( \frac{1}{\varepsilon_{\delta}} - \frac{1}{2} \right) \right]}{\sigma(T_S^4 - T_{\text{нач}}^4) S}. \quad (9.15)$$

Используя обозначения (9.7), запишем (9.15) в виде

$$\tau_{\text{исп}} = \tau - \frac{p(a + 2Nb + c)}{f \cdot S}, \quad (9.16)$$

где дополнительно обозначено

$$\left. \begin{aligned} p &= m_{\text{т}} c_{\text{р}} \Delta T; \\ f &= \sigma(T_S^4 - T_{\text{нач}}^4). \end{aligned} \right\} \quad (9.17)$$

Из формулы (9.3) совместно с выражением (9.16) найдем

$$m_{\text{исп}} = \frac{q_{\text{рез}} S}{r_{\text{исп}}} \left[ \tau - \frac{p(a + 2Nb + c)}{f \cdot S} \right]. \quad (9.18)$$

Принимая во внимание соотношения (9.18) и (9.4), представим суммарную массу испарившейся жидкости и тепловой изоляции так

$$m_{\Sigma} = \frac{q_{\text{рез}} \cdot S}{r_{\text{исп}}} \left[ \tau - \frac{p(a + 2Nb + c)}{f \cdot S} \right] + [N \delta_{\text{эк}} \rho_{\text{эк}} + (N - 1) \delta_{\text{пр}} \rho_{\text{пр}}] S. \quad (9.19)$$

Записав  $q_{\text{рез}}$  в виде выражения

$$q_{\text{рез}} = \frac{f}{a + 2Nb + c},$$

преобразуем формулу (9.19) и найдем

$$m_{\Sigma} = \frac{f S \tau}{r_{\text{исп}}(a + 2Nb + c)} - \frac{p}{r_{\text{исп}}} + [N \delta_{\text{эк}} \rho_{\text{пр}} + (N - 1) \delta_{\text{пр}} \rho_{\text{пр}}] \cdot S. \quad (9.20)$$

Для определения оптимального числа экранов, при котором масса  $m_{\Sigma}$  имеет минимальное значение, запишем ее производную от  $N$  и приравняем ее нулю

$$\frac{\partial m_{\Sigma}}{\partial N} = -\frac{2b f S \tau}{r_{\text{исп}}(a + 2Nb + c)^2} + (\delta_{\text{эк}} \rho_{\text{эк}} + \delta_{\text{пр}} \rho_{\text{пр}}) S = 0.$$

Из последнего выражения следует, что

$$a + 2Nb + c = \sqrt{\frac{2bf\tau}{r_{\text{исп}}(\delta_{\text{эк}}\rho_{\text{эк}} + \delta_{\text{пр}}\rho_{\text{пр}})}}. \quad (9.21)$$

После подстановки в (9.21) обозначений из (9.7) и (9.17), выполняя необходимые преобразования, получим

$$N = N_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\sigma(T_S^4 - T_{\text{нач}}^4) \cdot \tau}{2\left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{эк}}} - \frac{1}{2}\right) r_{\text{исп}}(\delta_{\text{эк}}\rho_{\text{эк}} + \delta_{\text{пр}}\rho_{\text{пр}})}} - \frac{\left(\frac{1}{\varepsilon_S} - \frac{1}{2}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_{\delta}} - \frac{1}{2}\right)}{2\left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{эк}}} - \frac{1}{2}\right)}. \quad (9.22)$$

Полученная зависимость для оптимального числа экранов при наличии периода прогрева переохлажденной жидкости до температуры кипения (формула (9.22)) отличается от формулы (9.11) тем, что в формуле (9.22) содержится полное время функционирования бака вместо  $\tau_{\text{исп}}$  и температура  $T_{\text{нач}}$  вместо температуры  $T_1$ .

Примечательно, что оптимальное число экранов не зависит от массы компонента топлива и его теплоемкости. При заданном времени функционирования бака в заправленном состоянии эти параметры влияют на время прогрева жидкости до  $T_{\text{кип}}$  /формула (9.14)/ и время ее испарения /формула (9.15)/.

Через узлы соединения криогенного бака с другими элементами конструкции аппарата от них к баку может передаваться достаточно большое количество тепла путем теплопроводности и излучения, что увеличивает испарение жидкости в баке. Для решения этой проблемы в конструкции узлов соединения с целью уменьшения теплообмена могут быть использованы низкотеплопроводные материалы, экраны и малая площадь контакта деталей на пути передачи тепла теплопроводностью.

Устройства такого типа представляют собой, по-существу, большое термическое сопротивление для радиационно-кондуктивного потока тепла.

Схема одного из возможных вариантов указанного устройства представлена на рис. 9.1.

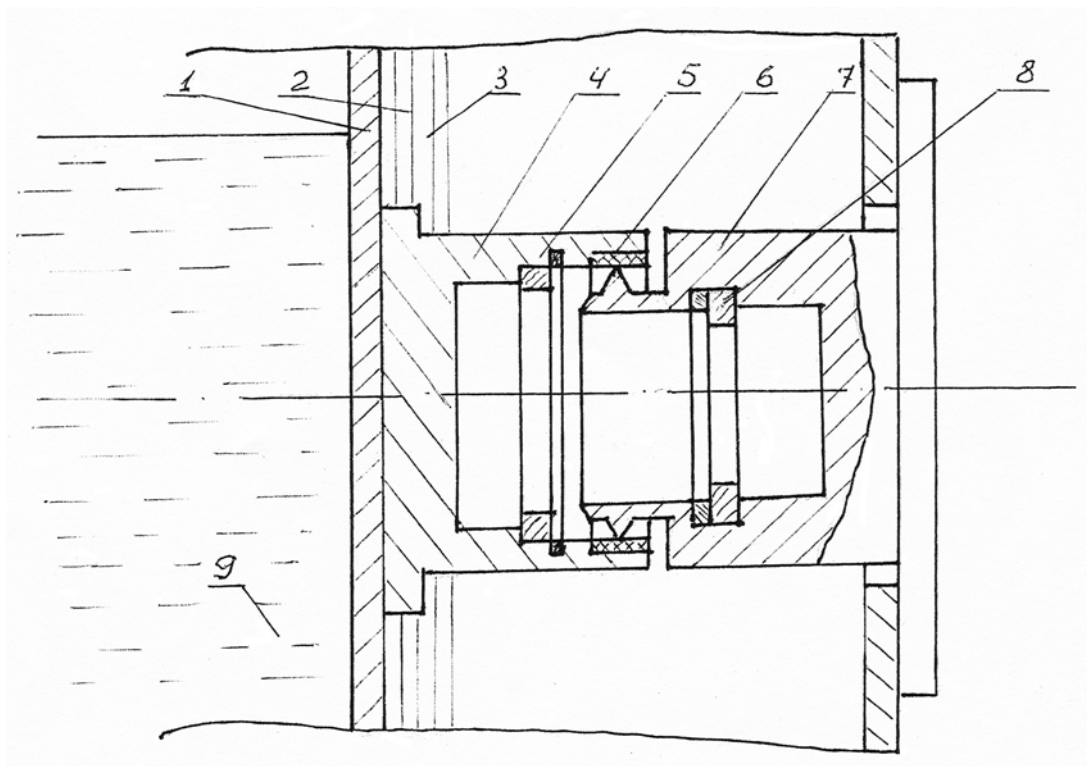


Рис. 9.1. Схема устройства теплового "моста": 1 — стенка бака с криогенным компонентом; 2 — слои экранновакуумной изоляции; 3 — прокладки; 4 — штуцер; 5 и 8 — вставки с двумя экранами каждая; 6 — кольцо из низкотеплопроводного материала; 7 — деталь крепления бака к корпусу; 9 — полость бака, заполненная жидкостью