



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Ю. Г. Жулев, Ю. Ф. Потапов, Эффективность
трубчатых излучателей космических аппаратов,
снабженных метеорной защитой, *ТВТ*, 1968, том 6,
выпуск 3, 487–492

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.239.90.61

11 ноября 2024 г., 00:23:40



УДК 536.8 : 629.19

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРУБЧАТЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, СНАБЖЕННЫХ МЕТЕОРНОЙ ЗАЩИТОЙ

Ю. Г. Жулев, Ю. Ф. Потапов

Рассмотрена задача о расчете излучательной способности и оптимизации по весу трубчатого панельного излучателя, у которого трубки с теплоносителем для защиты от метеоритов экранированы концентрично расположенными трубками-экранами.

Уравнения, выведенные для произвольных степеней черноты поверхностей излучателя, численно решены на ЭВМ для случая абсолютного черных поверхностей рассматриваемой излучающей системы.

Как известно, отвод тепла от космических аппаратов возможен только излучением, и одной из возможных излучательных систем является изображенный на рис. 1, а, радиатор, который состоит из трубок, соединенных теплопроводными перемычками (сплошными линиями показана одна секция радиатора). Отводимая от трубок с теплоносителем тепловая энергия излучается в окружающее пространство с поверхностей трубок и перемычек. Излучательная способность такого радиатора исследовалась в ряде работ (см., например, [1]—[3]).

Недостатком такой излучательной системы является возможность повреждения метеоритами трубок с теплоносителем.

Одним из возможных способов осуществления защиты трубок от пробоа, как указано в [4], является создание такого трубчатого радиатора, у которого трубки с теплоносителем находятся внутри концентрично расположенных защитных трубок — экранов (рис. 1, б). В этом случае часть отводимой от охлаждаемых трубок тепловой энергии будет передаваться на экранирующую трубку и затем с нее излучаться в окружающее пространство, а другая часть будет отводиться от трубки теплопроводными перемычками и затем излучаться с их поверхности.

В связи с изложенным представляет интерес исследовать излучательную способность и методы оптимизации изображенной на рис. 1, б, излучательной системы.

Рассматриваемую задачу будем решать при следующих предположениях: температура охлаждаемых трубок постоянна по периметру и длине, все поверхности являются серыми диффузными излучателями, температура не изменяется по толщине стенки экранирующей трубки и перемычки, тепловой контакт экранирующей трубки и перемычки идеальный, окружающее пространство является абсолютно черным телом с нулевой температурой.

Чтобы определить излучательную способность рассматриваемой системы, необходимо найти распределение температуры: вдоль экранирующей трубки [$t = f(\alpha)$ при $0 \leq \alpha \leq 1/2\pi$], перемычки [$T_l = f(x_l)$ при $0 \leq x_l \leq l$] и участка перемычки между экраном и внутренней трубкой [$T_L = f(x_L)$ при $0 \leq x_L \leq L$].

Если рассмотреть тепловые балансы выделенных на рис. 1, б, элементов экранирующей трубки и перемычки, то легко получить следующие

УДК 536.8 : 629.19

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРУБЧАТЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, СНАБЖЕННЫХ МЕТЕОРНОЙ ЗАЩИТОЙ

Ю. Г. Жулев, Ю. Ф. Потапов

Рассмотрена задача о расчете излучательной способности и оптимизации по весу трубчатого панельного излучателя, у которого трубки с теплоносителем для защиты от метеоритов экранированы концентрично расположенными трубками-экранами.

Уравнения, выведенные для произвольных степеней черноты поверхностей излучателя, численно решены на ЭВМ для случая абсолютного черных поверхностей рассматриваемой излучающей системы.

Как известно, отвод тепла от космических аппаратов возможен только излучением, и одной из возможных излучательных систем является изображенный на рис. 1, а, радиатор, который состоит из трубок, соединенных теплопроводными перемычками (сплошными линиями показана одна секция радиатора). Отводимая от трубок с теплоносителем тепловая энергия излучается в окружающее пространство с поверхностей трубок и перемычек. Излучательная способность такого радиатора исследовалась в ряде работ (см., например, [1]—[3]).

Недостатком такой излучательной системы является возможность повреждения метеоритами трубок с теплоносителем.

Одним из возможных способов осуществления защиты трубок от пробоа, как указано в [4], является создание такого трубчатого радиатора, у которого трубки с теплоносителем находятся внутри концентрично расположенных защитных трубок — экранов (рис. 1, б). В этом случае часть отводимой от охлаждаемых трубок тепловой энергии будет передаваться на экранирующую трубку и затем с нее излучаться в окружающее пространство, а другая часть будет отводиться от трубки теплопроводными перемычками и затем излучаться с их поверхности.

В связи с изложенным представляет интерес исследовать излучательную способность и методы оптимизации изображенной на рис. 1, б, излучательной системы.

Рассматриваемую задачу будем решать при следующих предположениях: температура охлаждаемых трубок постоянна по периметру и длине, все поверхности являются серыми диффузными излучателями, температура не изменяется по толщине стенки экранирующей трубки и перемычки, тепловой контакт экранирующей трубки и перемычки идеальный, окружающее пространство является абсолютно черным телом с нулевой температурой.

Чтобы определить излучательную способность рассматриваемой системы, необходимо найти распределение температуры: вдоль экранирующей трубки [$t = f(\alpha)$ при $0 \leq \alpha \leq 1/2\pi$], перемычки [$T_l = f(x_l)$ при $0 \leq x_l \leq l$] и участка перемычки между экраном и внутренней трубкой [$T_L = f(x_L)$ при $0 \leq x_L \leq L$].

Если рассмотреть тепловые балансы выделенных на рис. 1, б, элементов экранирующей трубки и перемычки, то легко получить следующие

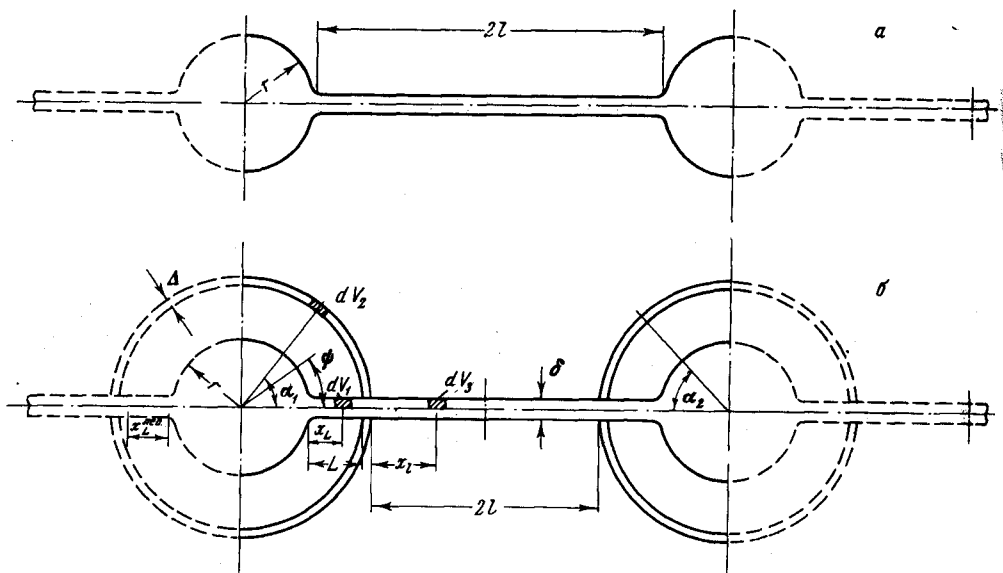


Рис. 1

дифференциальные уравнения:

$$\frac{d^2 T_L}{dx_L^2} - \frac{\varepsilon_1}{\lambda_n \delta / 2} [\sigma T_L^4 - E_{\text{пад}} \psi(x_L) - E_{\text{пад}} \alpha(x_L)] = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d^2 T_l}{dx_l^2} - \frac{\varepsilon_1}{\lambda_n \delta / 2} [\sigma T_l^4 - E_{\text{пад}} \alpha_1(x_l) - E_{\text{пад}} \alpha_2(x_l)] = 0, \quad (2)$$

$$\frac{1}{(r+L)^2} \frac{d^2 t}{d\alpha^2} - \frac{\varepsilon_2}{\lambda_n \Delta} [2\sigma t^4 - E_{\text{пад}} \alpha_2(\alpha_1) - E_{\text{пад}} x_l(\alpha_1) - E_{\text{пад}} \psi(\alpha_1) - E_{\text{пад}}^{пр} x_L(\alpha_1) - E_{\text{пад}} \alpha_1(\alpha_1) - E_{\text{пад}}^{лев} x_L(\alpha_1)] = 0. \quad (3)$$

Граничные условия будут иметь следующий вид:
для уравнения (1)

$$T_L = T_0, \quad \frac{dT_L}{dx_L} = -\frac{1}{\lambda_n \delta / 2} [Q_{\text{рез}}(x_l) + Q_{\text{рез}}(\alpha) - Q_{\text{рез}}(\psi)] \quad \text{при } x_L = 0; \quad (4)$$

для уравнения (2)

$$T_l = T_L^{\text{кон}} \quad \text{при } x_l = 0, \quad dT/dx_l = 0 \quad \text{при } x_l = l; \quad (5)$$

для уравнения (3)

$$t = T_L^{\text{кон}} \quad \text{при } \alpha = 0, \quad dt/d\alpha = 0 \quad \text{при } \alpha = 1/2 \pi. \quad (6)$$

Второе из условий (4) выражает общий тепловой баланс рассматриваемой системы, а первое из условий (6) — условие идеального теплового контакта в месте стыковки экранирующей трубки и перемычки.

Входящие в (4) — (6) результирующие потоки определяются из соотношений

$$Q_{\text{рез}}(x_l) = \varepsilon_1 \int_0^l [\sigma T_l^4 - E_{\text{пад}} \alpha_1(x_l) - E_{\text{пад}} \alpha_2(x_l)] dx_l, \quad (7)$$

$$Q_{\text{рез}}(\psi) = \varepsilon_3 \int_0^{\frac{1}{2}\pi} [\sigma T_0^4 - E_{\text{пад } x_L}(\psi) - E_{\text{пад } \alpha}(\psi)] r d\psi, \quad (8)$$

$$Q_{\text{рез}}(\alpha) = \varepsilon_2 \int_0^{\frac{1}{2}\pi} [\sigma t^4 - E_{\text{пад } \alpha_2}(\alpha_1) - E_{\text{пад } x_l}(\alpha_1)] (r + L) d\alpha. \quad (9)$$

В рассматриваемой задаче удобно ввести безразмерные переменные

$$\begin{aligned} \bar{T}_L &= \frac{T_L}{T_0}, & \bar{t} &= \frac{t}{T_0}, & \bar{T}_l &= \frac{T_l}{T_0}, & \bar{x}_l &= \frac{x_l}{L}, \\ \bar{x}_L &= \frac{x_L}{L}, & \bar{l} &= \frac{l}{L}, & \bar{r} &= \frac{r}{L}, & \bar{E} &= \frac{E}{\sigma T_0^4}. \end{aligned} \quad (10)$$

При этом уравнения (1) — (3) и граничные условия (4) — (6) запишутся в безразмерном виде следующим образом:

$$d^2 \bar{T}_L / d\bar{x}_L^2 - N_1 \varepsilon_1 [\bar{T}_L^4 - \bar{E}_{\text{пад } \psi}(\bar{x}_L) - \bar{E}_{\text{пад } \alpha}(\bar{x}_L)] = 0, \quad (1a)$$

$$d^2 \bar{T}_l / d\bar{x}_l^2 - N_1 \varepsilon_1 [\bar{T}_l^4 - \bar{E}_{\text{пад } \alpha_1}(\bar{x}_l) - \bar{E}_{\text{пад } \alpha_2}(\bar{x}_l)] = 0, \quad (2a)$$

$$d^2 \bar{t} / d\alpha^2 - N_2 \varepsilon_2 [2\bar{t}^4 - \Sigma \bar{E}_{\text{пад}}(\alpha_1)] = 0 \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} (\Sigma \bar{E}_{\text{пад}}(\alpha_1)) &= [\bar{E}_{\text{пад } \alpha_2}(\alpha_1) + \bar{E}_{\text{пад } x_l}(\alpha_1) + \bar{E}_{\text{пад } \psi}(\alpha_1) + \\ &+ \bar{E}_{\text{пад } x_L}^{\text{лев}}(\alpha_1) + \bar{E}_{\text{пад } x_L}^{\text{пр}}(\alpha_1) + \bar{E}_{\text{пад } \alpha_1}(\alpha_1)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{T}_L = 1, \quad \frac{d\bar{T}_l}{d\bar{x}_l} &= -N_1 \left\{ \varepsilon_1 \int_0^l [\bar{T}_l^4 - \bar{E}_{\text{пад } \alpha_1}(\bar{x}_l) - \bar{E}_{\text{пад } \alpha_2}(\bar{x}_l)] d\bar{x}_l + \right. \\ &+ (\bar{r} + 1) \varepsilon_2 \int_0^{\frac{1}{2}\pi} [\bar{t}^4 - \bar{E}_{\text{пад } \alpha_2}(\alpha_1) - \bar{E}_{\text{пад } x_l}(\alpha_1)] d\alpha - \bar{r} \varepsilon_3 \times \\ &\times \left. \int_0^{\frac{1}{2}\pi} [1 - \bar{E}_{\text{пад } x_L}(\psi) - \bar{E}_{\text{пад } \alpha_1}(\psi)] d\psi \right\} \quad \text{при } \bar{x}_L = 0; \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\bar{T}_l = \bar{T}_L^{\text{кон}} \quad \text{при } \bar{x}_l = 0; \quad d\bar{T} / d\bar{x}_l = 0 \quad \text{при } \bar{x}_l = \bar{l}; \quad (5a)$$

$$\bar{t} = \bar{T}_L^{\text{кон}} \quad \text{при } \alpha = 0; \quad d\bar{t} / d\alpha = 0 \quad \text{при } \alpha = 1/2 \pi. \quad (6a)$$

Выражения для определения плотностей падающих потоков могут быть получены (см., например, [2]) из следующего общего соотношения для определения плотности падающего излучения на поверхность i с поверхности j

$$E_{\text{пад } j}(i) = \int_{F_j} E_{\text{эф } j} F(ij) dF_j, \quad (11)$$

где F_j , $E_{\text{эф } j}$ и $F(ij)$ — соответственно площадь поверхности j , плотность эффективного излучения с этой поверхности и угловой коэффициент между элементами поверхностей j и i .

Решение полученной системы уравнений позволяет определить эффективность рассматриваемого излучателя $\bar{\theta}$, которая представляет собой отношение действительно отводимого теплового потока от одной секции излучателя Q_d к тому предельному тепловому потоку $Q_{\text{пред}}$, который отводился бы от рассматриваемого излучателя при бесконечно большой теплопроводности материала экранирующей трубки и перемычек и при степени черноты всех поверхностей, равной единице.

Очевидно, что $Q_{\text{пред}}$ будет определяться из соотношения

$$Q_{\text{пред}} = 2(r + L + l) \sigma T_0^4. \quad (12)$$

Выражение для определения $\bar{\theta}$ будет иметь вид

$$\bar{\theta} = \left\{ \varepsilon_2 (1 + \bar{r}) \int_0^{\frac{1}{2}\pi} [\bar{t}^4 - \bar{E}_{\text{пад } \alpha_2}(\alpha_1) - \bar{E}_{\text{пад } x_l}(\alpha_1)] d\alpha + \right. \\ \left. + \varepsilon_1 \int_0^{\bar{l}} [\bar{T}_l^4 - \bar{E}_{\text{пад } \alpha_1}(\bar{x}_l) - \bar{E}_{\text{пад } \alpha_2}(\bar{x}_l)] d\bar{x}_l \right\} [1 + \bar{r} + \bar{l}]^{-1}. \quad (13)$$

Видно, что эффективность рассматриваемой системы является функцией параметров $N_1, N_2, \bar{r}, \bar{l}, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$.

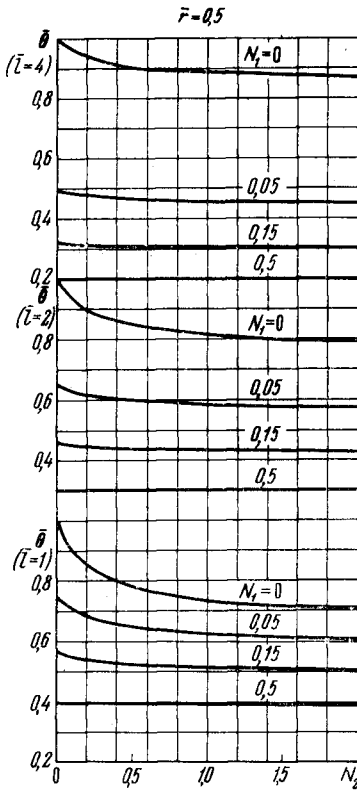


Рис. 2

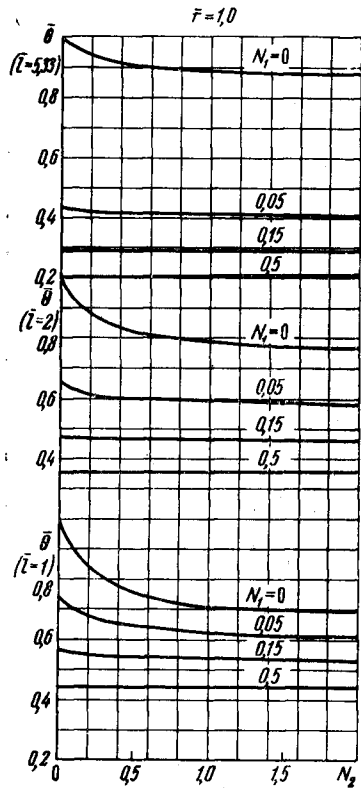


Рис. 3

Полученная выше система уравнений была решена численно на машине методом последовательных приближений для случая $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 1$. Последовательность решения была следующей. Для принятых в очередном приближении функций $\bar{t}_n(\bar{x})$, $\bar{T}_{l_n}(\bar{x})$ и $\bar{T}_L(\bar{x})$, удовлетворяющих граничным условиям (4а) — (6а) при $\bar{x}_L = 0$, $\bar{x}_l = 0$ и $\alpha = 0$, последовательными приближениями определялись все величины плотности падающих потоков и эффективных излучений. Затем решались уравнения (1а) — (3а) и определялись значения $\bar{t}_{n+1}(\bar{x})$, $\bar{T}_{l_{n+1}}(\bar{x})$ и $\bar{T}_{L_{n+1}}(\bar{x})$, которые использовались для проведения вычислений следующего приближения.

Результаты расчетов представлены на рис. 2—4 в виде зависимостей эффективности системы $\bar{\theta}$ от параметров N_1, N_2, \bar{r} и \bar{l} . Так как $Q_{\text{д}} = Q_{\text{пред}} \bar{\theta}$, то, имея зависимости рис. 2—4, можно легко определять действительно излучаемый тепловой поток, если известна геометрия излуча-

теля и значения T_0 и λ , а также проводить оптимизацию рассматриваемой системы.

Рассмотрим, например, метод оптимизации, позволяющий определить параметры системы, при которых имеет место максимум отношения излучаемого в окружающее пространство тепла Q_d к весу системы G . Искомое отношение будет определяться выражением

$$\frac{Q_d}{G} = \frac{4(r+l+L)\sigma T_0^4 \bar{\theta}}{2\pi(r+L)\Delta\gamma_0 + 2(L+l)\delta\gamma_n + G_{тр}}, \quad (14)$$

где $G_{тр}$ — вес единицы длины охлаждаемой трубки вместе с теплоносителем. Это выражение легко приводится к удобному для оптимизации безразмерному соотношению

$$\beta = \frac{Q_d}{G} \left(\frac{r^2 \gamma_n}{2T_0 \lambda_n} \right) =$$

$$= \frac{\bar{r}^2 (\bar{r} + \bar{l} + 1) \bar{\theta}}{[2(\bar{l} + 1)/N_1 + \xi_1 (\bar{r} + 1)^3 / N_2 + \xi_2 \bar{r}^3]} \quad (15)$$

($\xi_1 = \pi\gamma_0\lambda_n / \gamma_n\lambda_0$, $\xi_2 = G_{тр}\lambda_n / 2\sigma T_0^3 \gamma_n r^3$), где ξ_1 и ξ_2 — безразмерные комплексы.

Соотношение (15) и зависимости рис. 2—4 позволяют в каждом конкретном случае определять оптимальные по весу параметры излучателя. Например, если, наряду с T_0 , r , $G_{тр}$ и материалом перемычки, известными величинами являются также толщина и материал экранирующей трубки, а также размер L (которые могут выбираться из соображений метеорной защиты), то параметры N_2 и \bar{r} , а также комплексы ξ_1 и ξ_2 являются известными, и тогда соотношение (15) и зависимости рис. 2—4 позволяют найти значения параметров \bar{l} и N_1 при которых β достигает максимума.

Условные обозначения

r, L, l — соответственно радиус охлаждаемой трубки, зазор между охлаждаемой и экранирующей трубками и половина длины перемычки, δ и Δ — толщины перемычки и экранирующей трубки; T_l, t, T_0, T_L — соответственно температуры перемычки, экранирующей трубки, охлаждаемой трубки и участка перемычки между охлаждаемой и экранирующей трубками; σ — постоянная Стефана-Больцмана; x_1 и x_L — соответственно координаты вдоль перемычки и участка перемычки между охлаждаемой и экранирующей трубками; ψ и α — соответственно угловые координаты поверхности охлаждаемой и экранирующей трубок; $E_{пад j(i)}$ — плотность падающего излучения на поверхность i с поверхности j ; $E_{пад \alpha_L}^{лев}$ (α), $E_{пад \alpha_L}^{пр}$ (α) — соответственно плотности падающего излучения на внутреннюю поверхность экранирующей трубки с левого и правого

участков перемычки между охлаждаемой и экранирующей трубками (рис. 1, б); ϵ_1, ϵ_2 и ϵ_3 — соответственно степени черноты поверхности перемычки, экранирующей трубки и охлаждаемой трубки; $E_{эф(\psi)}$, $E_{эф^{вн}}(\alpha)$, $E_{эф^{нар}}(\alpha)$, $E_{эф}(x_1)$, $E_{эф}(x_L)$ — соответственно плотности эффективных излучений с поверхности охлаждаемой трубки, с внутренней и наружной поверхности экранирующей трубки, с поверхности перемычки и с поверхности участка перемычки между охлаждаемой и экранирующей трубками; $Q_{рез}(\alpha)$; $Q_{рез}(\psi)$ и $Q_{рез}(x_1)$ — соответственно результирующие пото-

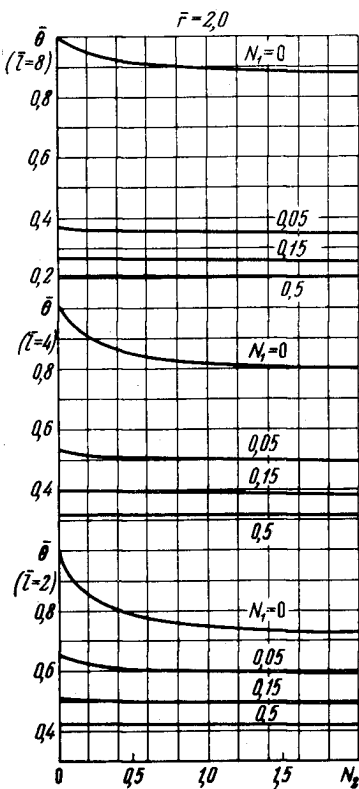


Рис. 4

ки, покидающие экранирующую и охлаждаемую трубки в пределах угла $1/2\pi$, и половина результирующего потока с одной поверхности перемычки; λ_0 , γ_0 , λ_n , γ_n — соответственно теплопроводности и удельные веса материалов экранирующей трубки и перемычки; N_1 и N_2 — безразмерные параметры:

$$N_1 = \frac{\sigma T_0^3 L^2}{\lambda_n \delta / 2}, \quad N_2 = \frac{\sigma T_0^3 (L + r)^2}{\lambda_0 \Delta}.$$

Москва

Поступила в редакцию
10 XI 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. О. Н. Фаворский, Я. С. Коданер. Вопросы теплообмена в космосе. «Высшая школа», 1967.
2. E. M. Sparrow, E. R. Eckert. J. Heat. Transfer., ser. C, 84, № 1, 1962.
3. Ю. Г. Жулев, В. А. Косаренков. Теплофизика высоких температур, 5, № 1, 1967.
4. Progress in Astronautics and Aeronautics. 11. Power System for Space Flight. An American Institute of Aeronautics and Astronautics Series, 1963.