

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ЭКРАНА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИЗЛУЧЕНИЯ СТРУИ ГОРЯЧЕГО ГАЗА

В.Н. Елисеев
Е.И. Бабарыкин

v.n.eliseev@gmail.com
evgeniy94@211.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

В современной технике для защиты различных технических устройств и живых организмов от вредного воздействия электромагнитного излучения широко применяют экраны. Сформулирована и решена задача определения температурного состояния плоского теплоизолированного металлического экрана. Рассмотрен пример определения поглощаемого теплового потока, поступающего к нему в виде излучения струи работающего двигателя. Результаты этого расчета указывают на зависимость поглощаемого экраном потока излучения от угла раствора струи на выходе из сопла при увеличении угла более 10°. Приведен расчет температурного состояния экрана, выполненного в виде двухслойной пластины. Один слой — металлический лист с покрытием, хорошо отражающим падающее на него излучение, другой — изоляция. Получены зависимости для приближенной оценки температурного поля экрана, полезные на этапе эскизного проектирования при выборе материала и конструкции экрана

Ключевые слова

Экран, защита, излучение, температурное состояние, газ, изоляция, конструкция

Поступила в редакцию 12.12.2017
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Источниками интенсивного теплового излучения принято считать тела, находящиеся в разных агрегатных состояниях с температурой более 1500 °С. Среди наиболее известных искусственных источников ИК- и УФ-диапазонов излучения находятся газоразрядные источники света, электрические дуги, лазеры, струи работающих ракетных двигателей и др.

Интенсивное излучение может отрицательно воздействовать на различные технические устройства и живые организмы. Проблема их защиты от действия ИК- и УФ-излучений имеет важное практическое значение. Одним из эффективных способов такой защиты является использование защитных экранов. Их применяют для экранирования самих источников излучения или защиты и снижения температуры оборудования и приборов, расположенных за экраном.

Уровень допустимой облученности и температуры в рабочих помещениях регламентирован стандартом [1].

Конструкции непрозрачных экранов и эффективность их использования хорошо известны. В качестве материалов для непрозрачных теплоотражающих

экранов часто используют альфоль (алюминиевую фольгу), алюминиевые сплавы, белую жемь и алюминиевую краску.

По конструктивному выполнению и назначению экраны условно разделяют на теплоотражающие, теплопоглощающие и теплопроводящие. Принадлежность экрана к той или иной группе зависит от того, какое из названных свойств выражено в нем наиболее заметно [2].

Постановка задачи и метод решения. Тепловой режим рассматриваемого в настоящей статье теплоотражающего экрана в значительной мере определяется величиной действующего на него интегрального потока излучения, продолжительностью воздействия и оптическими характеристиками отражающей поверхности. В определенных условиях даже экран, изготовленный из металлизированной пленки, наклеенной на твердую основу, в условиях естественной конвекции способен сохранять работоспособность в результате действия на него кратковременного импульса мощного излучения. Это создает возможность при определенном сочетании параметров теплового воздействия на экран и его оптических свойств использовать для расчета теплового режима экрана те или иные упрощенные математические модели.

Предложенная далее формулировка задачи предусматривает одну из таких постановок, в которой не учитывается отвод теплоты с внешней стороны экрана за счет конвекции и излучения. Смысл принятого допущения отражает стремление получить сравнительно простое аналитическое решение, позволяющее оценить тепловой режим экрана при действии на него умеренных значений потоков излучения. К сожалению, трудно дать четкое определение «умеренной» тепловой нагрузки, поскольку на температуру экрана, кроме нее, влияет продолжительность теплового воздействия и теплофизические свойства его поверхности.

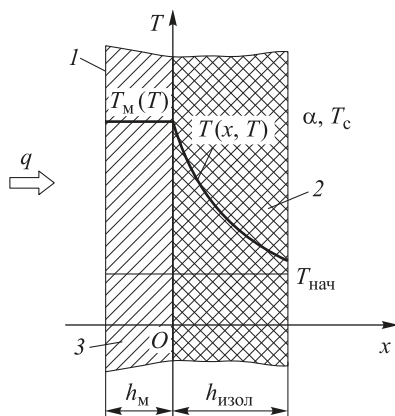


Рис. 1. Схема теплообмена пластины

Экран, предназначенный для защиты расположенного за ним оборудования от излучения струи или другого источника, выполнен в виде двухслойной конструкции. Внешняя сторона экрана, обращенная к источнику излучения, выполнена из металла с хорошо отражающей поверхностью. Другая сторона представляет собой слой изолирующего материала (рис. 1).

Для определения нестационарного температурного поля в двухслойной пластине с идеальным тепловым контактом между слоями использована следующая математическая модель:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}; \quad (1)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} + c_m \rho_m h_m \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial \tau} = q; \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T(h, \tau)}{\partial x} + \alpha [T(h, \tau) - T_c] = 0; \quad (3)$$

$$T(0, x) = T_{\text{нач}}. \quad (4)$$

Методы решения подобных краевых задач описаны в работах [3–7].
Применяя к задаче (1)–(4) преобразование Лапласа, получаем

$$a \frac{d^2 \bar{T}(x, s)}{dx^2} - s \bar{T}(x, s) + T_{\text{нач}} = 0; \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{d\bar{T}(0, s)}{dx} + c_m \rho_m h_m [s \bar{T}(0, s) - T_{\text{нач}}] - \frac{q}{s} = 0; \quad (6)$$

$$\lambda \frac{d\bar{T}(h, s)}{dx} + \alpha \left[\bar{T}(h, s) - \frac{T_c}{s} \right] = 0. \quad (7)$$

Решение уравнения (5) имеет вид

$$\bar{T}(x, s) - \frac{T_{\text{нач}}}{s} = A \operatorname{ch} \sqrt{\frac{s}{a}} x + B \operatorname{sh} \sqrt{\frac{s}{a}} x. \quad (8)$$

Определяя постоянные интегрирования A и B из граничных условий (6) и (7) и подставляя их в выражение (8), найдем решение задачи (5)–(7) в изображениях

$$\bar{T}(x, s) - \frac{T_{\text{нач}}}{s} = \frac{\Phi(s)}{\psi(s)} = \frac{\left\{ \alpha \left[\frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{s}} q \operatorname{sh} \sqrt{\frac{s}{a}} h - (T_{\text{нач}} - T_c) \right] + q \operatorname{ch} \sqrt{\frac{s}{a}} h \right\} \operatorname{ch} \sqrt{\frac{s}{a}} x}{sR(s)} - \frac{\left\{ \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{sa} c_m \rho_m h_m (T_{\text{нач}} - T_c) + q \left(\operatorname{sh} \sqrt{\frac{s}{a}} h + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{s}} \operatorname{ch} \sqrt{\frac{s}{a}} h \right) \right\} \operatorname{sh} \sqrt{\frac{s}{a}} x}{sR(s)}, \quad (9)$$

где

$$R(s) = \left[\lambda \sqrt{\frac{s}{a}} \operatorname{sh} \sqrt{\frac{s}{a}} h + (c_m \rho_m h_m s + \alpha) \operatorname{ch} \sqrt{\frac{s}{a}} h + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{sa} c_m \rho_m h_m \operatorname{sh} \sqrt{\frac{s}{a}} h \right], \quad (10)$$

$\Phi(s)$ и $\psi(s) = sR(s)$ — числитель и знаменатель в формуле (9).

Значения s определяются из условия равенства нулю выражения $sR(s)$ в знаменателе формулы (9). При этом либо $s = 0$, либо выражение в квадратных скобках (10) обращается в нуль. Из этого условия получаются все значения s , связанные с бесчисленным множеством корней $\mu_n (s_n = -\mu_n^2 a/h^2)$, определяемых из трансцендентного уравнения

$$\operatorname{tg} \mu = \frac{\operatorname{Bi} - \mu^2 K}{\mu(1 + \operatorname{Bi}K)}, \quad (11)$$

где $\operatorname{Bi} = \alpha h / \lambda$ — критерий Био и

$$K = \frac{c_M \rho_M h_M}{c \rho h},$$

c_M , ρ_M и h_M — теплоемкость, плотность и толщина металлической стенки; c , ρ и h — аналогичные параметры изоляции.

В работе [8] рассмотрена близкая по постановке задача, но с граничными условиями третьего рода, получено такое же характеристическое уравнение и приведен детальный его анализ для наиболее важных случаев.

Используя формулу обращения изображения, находим выражение для оригинала обратной функции

$$T(x, \tau) - T_{\text{нач}} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\Phi(s_n)}{\Psi'(s_n)} \exp(s_n \tau), \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} \Psi'(s_n) = & \frac{1}{2} \lambda (3 + \operatorname{Bi}) \sqrt{\frac{s}{a}} \operatorname{sh} \sqrt{\frac{s}{a}} + \left[\left(2 + \frac{1}{2} \operatorname{Bi} \right) s_n \operatorname{ch} \sqrt{\frac{s_n}{a}} h + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \left(3 \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{s_n a} + s_n \sqrt{\frac{s_n}{a}} h \right) \operatorname{sh} \sqrt{\frac{s_n}{a}} h \right] c_M \rho_M h_M + \left(\alpha + \frac{1}{2} \frac{\lambda h}{a} s_n \right) \operatorname{ch} \sqrt{\frac{s_n}{a}} h. \end{aligned} \quad (13)$$

Из выражения для $\Phi(s_n)$ (числитель формулы (9)) и соотношения (13) для $\Psi'(s_n)$ при $n = 0$ получаем

$$\Phi(0) = q \alpha \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{h}{\lambda} - \frac{x}{\lambda} \right) - \alpha (T_{\text{нач}} - T_c), \quad \Psi'(0) = \alpha$$

и

$$\frac{\Phi(0)}{\Psi'(0)} = T(x, \infty) - T_{\text{нач}} = q \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{h}{\lambda} - \frac{x}{h} \right) - (T_{\text{нач}} - T_c). \quad (14)$$

Равенство

$$T(x, \infty) = T_c + q \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{h}{\lambda} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

определяет стационарное температурное поле пластины, включая температуру металлической стенки

$$T(0, \infty) = T_M(0, \infty) = T_c + q \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{h}{\lambda} \right)$$

и установившуюся температуру внешней поверхности изоляции

$$T(h, \infty) = T_c + q \frac{1}{\alpha}.$$

Формула (12) с учетом выделенного в его правой части слагаемого (14) принимает вид

$$T(x, \tau) - T_{\text{нач}} = q \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{h}{\lambda} - \frac{x}{\lambda} \right) - (T_{\text{нач}} - T_c) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Phi(s_n)}{\Psi'(s_n)} \exp(s_n \tau). \quad (15)$$

Заменяя s_n в функциях $\Phi(s_n)$ и $\Psi'(s_n)$ уравнения (15) на μ_n , получим

$$\Phi(\mu_n) = D_1(n) \cos \mu_n \frac{x}{h} + D_2(n) \sin \mu_n \frac{x}{h}, \quad (16)$$

где

$$D_1(n) = \left[\frac{qh}{\lambda} \left(\cos \mu_n - \text{Bi} \frac{\sin \mu_n}{\mu_n} \right) - \text{Bi} (T_{\text{нач}} - T_c) \right]; \quad (17)$$

$$D_2(n) = \left[\frac{qh}{\lambda} \left(\sin \mu_n + \text{Bi} \frac{\cos \mu_n}{\mu_n} \right) + \text{Bi} K (T_{\text{нач}} - T_c) \mu_n \right]; \quad (18)$$

$$\Psi'(\mu_n) = - \left[\frac{3}{2} \text{Bi} K \mu_n \sin \mu_n + \left(2 + \frac{\text{Bi}}{2} \right) K \mu_n^2 \cos \mu_n + \frac{1}{2} (3 + \text{Bi}) \mu_n \sin \mu_n - \right. \\ \left. - \left(\text{Bi} - \frac{1}{2} \mu_n^2 \right) \cos \mu_n - \frac{1}{2} K \mu_n^3 \sin \mu_n \right] = -D_3(n). \quad (19)$$

После подстановки выражений (16)–(18) в уравнение (15) находим решение исходной задачи (1)–(4):

$$T(x, \tau) - T_{\text{нач}} = q \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{h}{\lambda} - \frac{x}{\lambda} \right) - (T_{\text{нач}} - T_c) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{D_1(n) \cos \mu_n \frac{x}{h} + D_2(n) \sin \mu_n \frac{x}{h}}{D_3(n)}, \quad (20)$$

где функции $D_1(n)$, $D_2(n)$ и $D_3(n)$ представлены формулами (17)–(19).

Выражение для нестационарной температуры металлической пластины получается из формулы (20) при $x = 0$:

$$T(0, \tau) = T_c + q \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{h}{\lambda} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{D_1(n)}{D_3(n)}. \quad (21)$$

Результаты исследования и их анализ. Для расчета температурного поля экрана с использованием зависимостей (20) и (21) необходимо знать поступающий к нему поток. Рассмотрим порядок его определения на следующем примере. Источником излучения служит струя горячего газа, выходящая из конического сопла (рис. 2). Наибольший вклад в образование потока излучения газовой смеси вносят трехатомные газы H_2O и CO_2 , имеющие селективный характер поглощения и излучения.

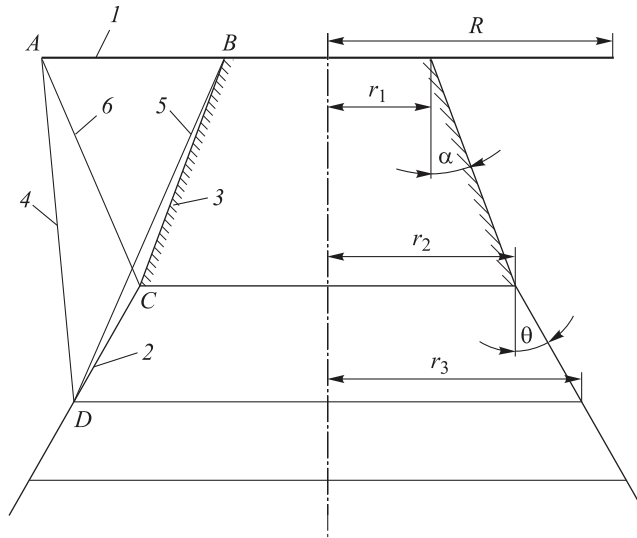


Рис. 2. Расчетная схема:

1 — экран; 2 — струя газа; 3 — сопло; 4, 5, 6 — линии, образующие поверхности усеченных конусов

Состав продуктов сгорания рабочего тела при заданном давлении на срезе сопла, которое варьировалось в интервале от 0,08 до 0,06 МПа, определялся с использованием программы TERRA. Плотность потока излучения струи находили по методике [9]. В качестве допущения предполагалось, что состав газа и давление по длине струи остаются постоянными и такими, как на срезе сопла.

Излучение струи только частично падает на экран, а остальная его часть уходит в окружающее пространство. Долю излучения, падающего на экран, рассчитывали с использованием соответствующих угловых коэффициентов $\varphi_{2,1}$, учитывающих форму и размеры струи [10].

Для оценки доли излучения, падающего на экран со стороны струи цилиндрической формы, использовали два варианта расчета. В первом из них угловой коэффициент вычислялся по формуле из [11],

$$\varphi_{2,1} = \frac{B}{8TH} + \frac{1}{2\pi} \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{A}{B} \right) - \frac{1}{2H} \left[\frac{(A+2)^2}{T^2} - 4 \right]^{\frac{1}{2}} \cos^{-1} \left(\frac{AT}{B} \right) - \frac{A}{2TH} \sin^{-1}(T) \right\}, \quad (22)$$

где $T = \frac{r_2}{R}$; $H = \frac{h}{r_2}$; $A = H^2 + T^2 - 1$; $B = H^2 - T^2 + 1$; h — высота цилиндра.

Во втором варианте расчета угловой коэффициент определялся с использованием метода натянутых нитей [10], в соответствии с которым для его вычисления использовались соотношения:

$$\begin{aligned} \varphi_{2,1} &= 1 - \varphi_{2,3} - \varphi_{2,4}; \\ \varphi_{2,3} &= \frac{F_2 + F_3 - F_5}{2F_2}; \\ \varphi_{2,4} &= \frac{F_2 + F_4 - F_6}{2F_2}, \end{aligned} \quad (23)$$

где F_2, F_3, F_4, F_5 и F_6 — поверхности, площади которых равны произведению длины линий 2, 3, и далее (см. рис. 2) на второй, достаточно большой, но обязательно одинаковый для всех поверхностей размер площадки, перпендикулярной к плоскости рис. 2. При вычислении угловых коэффициентов по формулам (23) этот размер сокращается.

Значения угловых коэффициентов для струй цилиндрической формы, рассчитанные по методу натянутых нитей, в среднем на 27 % больше коэффициентов, найденных по формуле (22). Данные расчета средних угловых коэффициентов, полученные с использованием соотношений (23), приведены на рис. 3. Газовую струю в этом расчете разбивали на несколько участков одинаковой длины.

Из рис. 3 следует, что угловой коэффициент $\varphi_{2,1}$, определяющий долю излучения, поступающего к экрану со стороны одного, двух и других участков струи, уменьшается с возрастанием их числа. В этом нет противоречия. Параметр $\varphi_{2,1}$ представляет собой в данном случае долю излучения, поступающего к экрану со стороны большей излучающей поверхности струи F_2 .

Плотность потока указанного излучения зависит от произведения $\varphi_{2,1}F_2$, которое имеет тенденцию к возрастанию с увеличением числа учитываемых в расчете участков разбиения струи.

Связь произведения $\varphi_{2,1}F_2$ с плотностью потока излучения определяется выражением [9, 10]

$$q = \varepsilon_{\text{эф}} \sigma T^4 \varphi_{2,1} \frac{F_2}{F_1},$$

где T — термодинамическая температура газовой смеси; $\varepsilon_{\text{эф}}$ — эффективная степень черноты экрана.

Приведенные на рис. 4 результаты расчета плотности потока q получены для условий теплообмена между экраном и струей, образующейся при сжигании несимметричного диметилгидразина с азотным тетраоксидом с использованием следующих исходных данных: давление на срезе сопла 0,06 МПа; внешний

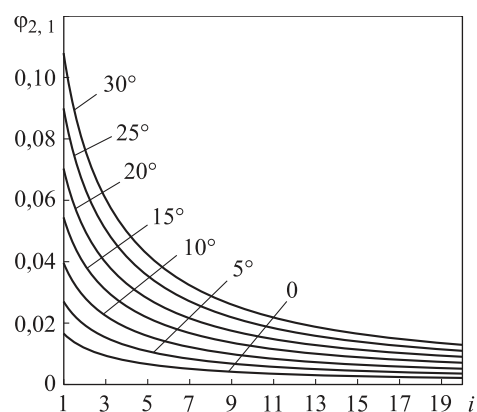


Рис. 3. Зависимость углового коэффициента от числа участков разбиения струи и угла ее раскрытия

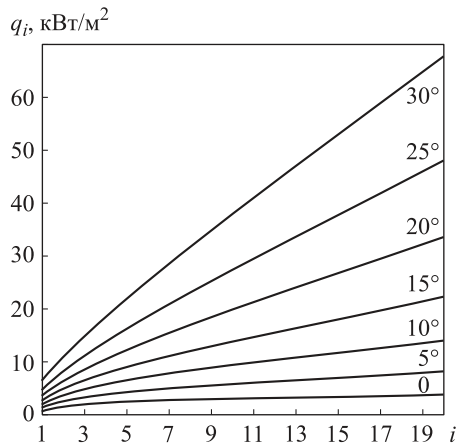


Рис. 4. Зависимость плотности потока излучения, поглощаемого экраном, от числа участков разбиения струи и угла ее раскрытия

радиус экрана $R = 0,8$ м; общая длина струи 8 м; длина участка разбиения струи 0,4 м; $r_1 = 0,19$ м; $r_2 = 0,57$ м; температура газа на срезе сопла 1873 К; степень черноты экрана с хромоникелевым покрытием 0,05; расстояние от экрана до срез сопла 0,71 м.

В расчетах излучения газовой струи учитывали излучение только двух газов, образующих смесь, — H_2O и CO_2 . Для определения эффективной степени черноты экрана использовали формулу

$$\varepsilon_{эф} = \varepsilon_1 [1 + (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_r)],$$

где ε_1 — степень черноты экрана; ε_r — степень черноты газовой струи, определяемая по методике, изложенной в книге [9].

Плотность потока излучения, поглощаемого экраном, при нулевом угле раствора струи (см. рис. 4) слабо зависит от числа участков ее разбиения, но заметно увеличивается при увеличении угла раствора. Это приводит не только к потерям удельной тяги двигателя, но и, как следует из рис. 4, ухудшает тепловой режим защитного экрана в результате повышенного поглощения излучения струи.

Полученные зависимости (20) и (21) дают возможность оценить температурное состояние экрана, приняв для этого в качестве примера: $q = 7 \cdot 10^3$ Вт/м²; $\alpha = 50$ Вт/(м²·К); $T_{нач} = T_c$; $h_m = 10^{-3}$ м; $c_m = 10^3$ Дж/(кг·К); $\rho_m = 2770$ кг/м³; $\lambda_m = 146$ Вт/(м·К); $h = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $c = 1670$ Дж/(кг·К); $\rho = 1500$ кг/м³; $\lambda = 0,42$ Вт/(м·К).

Результаты расчета показывают, в частности, что через 90 с от момента начала нагрева экрана температура металлической стенки составляет 447 К, а на внешней поверхности изоляции она достигает 360 К. Ряды в формулах (20) и (21) обладают хорошей сходимостью.

Заключение. Сформулирована и решена в приближенной постановке задача определения температурного состояния теплозащитного экрана, работающего в условиях умеренных тепловых нагрузок.

Выполнен анализ влияния на поступающий к экрану поток излучения со стороны струи горячих газов, ее длины и угла расходимости. Показано, что увеличение угла расходимости струи и ее длины приводит к существенному увеличению потока излучения, поступающего к поверхности экрана.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 12.1.005–88. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. М.: Стандартинформ, 2008. 49 с.
- Белов С.В., ред. Безопасность жизнедеятельности. М.: Высшая школа, 2007. 616 с.

3. *Беляев Н.М., Рядно А.А.* Методы нестационарной теплопроводности. М.: Высшая школа, 1978. 328 с.
4. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
5. *Карташев Э.М.* Аналитические методы в теплопроводности твердых тел. М.: Высшая школа, 1985. 480 с.
6. *Леонтьев А.И., ред.* Теория тепломассообмена. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 684 с.
7. *Телегин А.С., Швыдкий А.С., Ярошенко Ю.С.* Тепломассоперенос. М.: Академкнига, 2002. 456 с.
8. *Зарубин В.С.* Температурные поля в конструкции летательных аппаратов. Методы расчета. М.: Машиностроение, 1966. 216 с.
9. *Добровольский М.В.* Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 488 с.
10. *Зигель Р., Хауэлл Дж.* Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 935 с.
11. *Rea S.N.* Rapid method for determining concentric cylinder radiation view factors // AIAA Journal. 1975. Vol. 13. No. 8. P. 1122–1123. DOI: 10.2514/3.6964
URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/3.6964>

Елисеев Виктор Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Бабарыкин Евгений Игоревич — студент 6-го курса МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Елисеев В.Н., Бабарыкин Е.И. Оценка температурного состояния экрана, предназначенного для защиты от излучения струи горячего газа // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 4. С. 37–46. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-4-37-46

ESTIMATING THE THERMAL STATE OF A SCREEN ACTING AS PROTECTION FROM RADIATION EMITTED BY A HOT GAS JET

V.N. Eliseev
E.I. Babarykin

v.n.eliseev@gmail.com
evgeniy94@211.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Today's engineers widely use screens as means of protecting various devices and organisms from detrimental effects of electromagnetic radiation. We stated and solved the problem of determining the thermal state of a thermally insulated flat metal screen. We present an example case of determining the heat flow absorbed that comes in the form of radiation emitted by an engine jet. Our computations revealed that the heat flow absorbed by the screen depends on the jet flare angle as it leaves the nozzle when the angle is over 10°.

Keywords

Screen, protection, radiation, thermal state, gas, insulation, structure

We computed the thermal state of a screen represented by a double-layer plate. One of the layers is a sheet of metal with a coating that reflects the incident radiation well; the other layer consists of insulation. The equations we obtained for estimating the temperature field over the screen are useful at the preliminary design stage for selecting screen material and structure

Received 12.12.2017
© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] GOST12.1.005–88. Sistema standartov bezopasnosti truda (SSBT). Obshchie sanitarnogigienicheskie trebovaniya k vozdukhу rabochey zony [State standard GOST12.1.005–88. Occupational safety standards system. General sanitary requirements for working zone air]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 49 p.
- [2] Belov S.V., ed. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti [Health and safety]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2007. 616 p.
- [3] Belyaev N.M., Ryadno A.A. Metody nestatsionarnoy teploprovodnosti [Methods of transient heat conduction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1978. 328 p.
- [4] Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti [Heat conduction theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 600 p.
- [5] Kartashev E.M. Analiticheskie metody v teploprovodnosti tverdykh tel [Analytical methods of heat conduction in solid bodies]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 480 p.
- [6] Leont'ev A.I., ed. Teoriya teplomassoobmena [Heat and mass exchange theory]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1997. 684 p.
- [7] Telegin A.S., Shvydkiy A.S., Yaroshenko Yu.S. Teplomassoperenos [Heat and mass transfer]. Moscow, Akademkniga Publ., 2002. 456 p.
- [8] Zarubin V.S. Temperaturnye polya v konstruktsii letatel'nykh apparatov. Metody rascheta [Temperature fields in aircraft construction. Calculation methods]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 216 p.
- [9] Dobrovol'skiy M.V. Zhidkostnye raketnye dvigateli. Osnovy proektirovaniya [Liquid rocket engines. Principles of design]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2005. 488 p.
- [10] Siegel R., Howell J.R. Thermal radiation heat transfer. McGraw-Hill, 1972. 814 p.
- [11] Rea S.N. Rapid method for determining concentric cylinder radiation view factors. *AIAA Journal*, 1975, vol. 13, no. 8, pp. 1122–1123. DOI: 10.2514/3.6964
Available at: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/3.6964>

Eliseev V.N. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Spacecraft and Launch Vehicles, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Babarykin E.I. — 6th year student, Department of Spacecraft and Launch Vehicles, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Eliseev V.N., Babarykin E.I. Estimating the Thermal State of a Screen Acting as Protection from Radiation Emitted by a Hot Gas Jet. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 4, pp. 37–46 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2018-4-37-46