

УДК 536.331

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ ОТ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ПЛОСКОГО ЭКРАНА

***Вазаева Н.В.**, студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Экология и промышленная безопасность»*

***Ганькина Д.К.**, студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Экология и промышленная безопасность»*

*Научный руководитель: Степанов С.И., к.т.н., доцент к
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
E9@mx.bmstu.ru*

Человеческий организм обладает высокой чувствительностью к тепловому излучению. Согласно действующим нормативным документам интенсивность лучистых тепловых потоков свыше 140 Вт/м² считается вредной для человека при любой величине облучаемой поверхности тела [1].

В тоже время интенсивность направленного к Земле потока солнечной радиации превышает допустимую почти на порядок, а интенсивность теплового излучения в производственных условиях – на несколько порядков.

Для сохранения здоровья и обеспечения безопасности человека в таких условиях необходимо применение средств защиты.

Одним из основных технических средств защиты от теплового излучения являются экраны.

При выборе экрана необходима предварительная оценка его ожидаемой эффективности.

Для количественной оценки эффективности экранов используются в основном два параметра – степень снижения плотности теплового потока m и коэффициент эффективности η , определяемые как:

$$m = \frac{q_0}{q_2},$$

$$\eta = \frac{q_0 - q_2}{q_0}.$$

Здесь: q_0 – плотность теплового потока излучением без экрана, q_2 – плотность теплового потока за экраном.

Для двух плоских поверхностей, расположенных параллельно друг другу, плотность теплового потока излучением без экрана может быть вычислена по формулам:

$$q_0 = \sigma \varepsilon_{\text{пр0}} (T_1^4 - T_2^4),$$

$$\varepsilon_{\text{пр0}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}.$$

Здесь: $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ – постоянная Больцмана, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$; $\varepsilon_{\text{пр0}}$ – приведенная степень черноты; T_1 – температура источника излучения, $^{\circ}\text{К}$; ε_1 – степень черноты источника излучения; T_2 – температура приемника излучения, $^{\circ}\text{К}$; ε_2 – степень черноты приемника излучения.

Эффективности можно рассчитать, используя аналитическое решение, приведенное в работах [2,3,4], согласно которому при равной степени черноты излучателя ε_1 , приемника излучения ε_2 и обеих сторон экрана $\varepsilon_{\text{э1}}, \varepsilon_{\text{э2}}$ (рис.1)

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_{\text{э1}} = \varepsilon_{\text{э2}}$$

степень снижения плотности теплового потока m равна:

$$m = \frac{q_0}{q_2} = n + 1,$$

где n – количество экранов [2,3]. В частности, один экран снижает плотность теплового потока излучением в 2 раза. При этом коэффициент эффективности равен $\eta=0,5$.

Кроме того, из аналитического решения следует, что эффективность экрана может быть повышена путем снижения степени черноты экрана. Так, например, при степени черноты излучателя и приемника $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,8$ и степени черноты экрана

$\varepsilon_{\text{э1}} = \varepsilon_{\text{э2}} = 0,1$ отношение тепловых потоков увеличивается до $\frac{q_0}{q_2} = 13,6$, а коэффициент

эффективности $\eta=0,926$ [3].

Недостатком этих оценок является то, что они не учитывают конвективный теплообмен экрана с окружающей средой и тепловое сопротивление экрана.

Облучаемый экран, как правило, имеет температуру значительно выше температуры окружающего воздуха. При этом теплота, отдаваемая экраном конвекцией в окружающую среду, может быть соизмерима с лучистыми тепловыми потоками и должна учитываться в расчетах.

Тепловое сопротивление экранов, выполненных из металлов и других тонких листовых материалов с высоким коэффициентом теплопроводности, как правило, мало и им можно пренебречь. Но, если в экранах используются теплоизоляционные материалы, то вклад теплового сопротивления может быть существенным.

В данной работе предлагается методика расчета эффективности плоского непрозрачного экрана, расположенного параллельно источнику и приемнику излучения, учитывающая влияние конвективного теплообмена на поверхности экрана и его теплового сопротивления. В основе методики – численное решение системы уравнений, описывающих тепловой баланс на экране.

Расчетная схема представлена на рисунке 1.

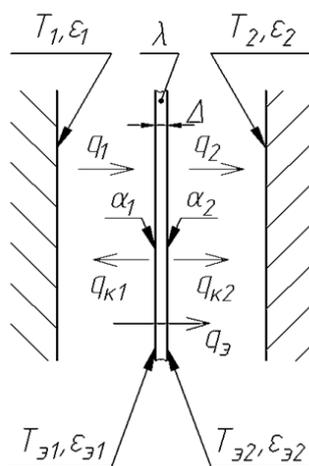


Рис. 1. Расчетная схема

Баланс тепла на экране в стационарных условиях описывается системой уравнений (1) – (9):

$$q_1 - q_{к1} = q_{э}, \quad (1)$$

$$q_2 + q_{к2} = q_{э}, \quad (2)$$

$$q_{э} = \frac{T_{э1} - T_{э2}}{R}, \quad (3)$$

$$q_1 = \sigma_{\text{пр1}}(T_1^4 - T_{э1}^4), \quad (4)$$

$$q_2 = \sigma_{\text{пр2}}(T_2^4 - T_{э2}^4), \quad (5)$$

$$q_{к1} = \alpha_1(T_{э1} - T_0), \quad (6)$$

$$q_{K2} = \alpha_2(T_{\text{Э2}} - T_0), \quad (7)$$

$$\varepsilon_{\text{ПР1}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{Э1}}} - 1}, \quad (8)$$

$$\varepsilon_{\text{ПР2}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{Э2}}} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}. \quad (9)$$

Здесь: q_1 – плотность теплового потока излучением от источника излучения к экрану, $\frac{Вт}{м^2}$; q_2 – плотность теплового потока излучением от экрана к приемнику излучения, $\frac{Вт}{м^2}$; q_{K1} – плотность конвективного теплового потока на экране со стороны источника излучения, $\frac{Вт}{м^2}$; q_{K2} – плотность конвективного теплового потока на экране со стороны приемника излучения, $\frac{Вт}{м^2}$; $q_{\text{Э}}$ – плотность теплового потока, проходящего через экран, $\frac{Вт}{м^2}$; $T_{\text{Э1}}$ – температура экрана со стороны источника излучения, $^{\circ}K$; $T_{\text{Э2}}$ – температура экрана со стороны приемника излучения, $^{\circ}K$; T_0 – температура окружающей среды, $^{\circ}K$; $R = \frac{\Delta}{\lambda}$ – тепловое сопротивление экрана, $\frac{м^2 K}{Вт}$; Δ – толщина экрана, м; λ – коэффициент теплопроводности материала экрана, $\frac{Вт}{мK}$; α_1 – коэффициент теплоотдачи на экране со стороны источника излучения, $\frac{Вт}{м^2 K}$; α_2 – коэффициент теплоотдачи на экране со стороны приемника излучения, $\frac{Вт}{м^2 K}$; $\varepsilon_{\text{ПР1}}$ и $\varepsilon_{\text{ПР2}}$ – приведенные степени черноты со стороны источника и приемника излучения соответственно.

В работе рассматривается частный случай, когда степени черноты и коэффициенты теплоотдачи удовлетворяют соотношениям:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2,$$

$$\varepsilon_{\text{Э1}} = \varepsilon_{\text{Э2}} = \varepsilon_{\text{Э}},$$

$$\varepsilon_{\text{ПР2}} = \varepsilon_{\text{ПР1}} = \varepsilon_{\text{ПР}},$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha.$$

При этих допущениях система уравнений баланса тепла в экране (1) – (9) сводится к уравнению:

$$\varepsilon_{\text{ПР}}(T_1^4 + T_2^4) - \varepsilon_{\text{ПР}}(T_{\text{Э1}}^4 + T_{\text{Э2}}^4) - \alpha(T_{\text{Э1}} + T_{\text{Э2}}) + 2\alpha T_0 = 0. \quad (10)$$

Введя средние температуры:

$$T_{\text{СР1}} = \frac{(T_{\text{Э1}} + T_{\text{Э2}})}{2},$$

$$T_{\text{СР4}} = \sqrt[4]{\frac{(T_{\text{Э1}}^4 + T_{\text{Э2}}^4)}{2}},$$

уравнение (10) можно представить в виде:

$$\varepsilon_{\text{ПР}} T_P^4 - \varepsilon_{\text{ПР}} T_{\text{СР4}}^4 - \alpha T_{\text{СР1}} + \alpha T_0 = 0. \quad (11)$$

Тепловой поток через экран $q_{\text{Э}}$ всегда имеет конечную величину. В случае бесконечно малого теплового сопротивления экрана R произведение $(q_{\text{Э}} R)$ также будет бесконечно малым и температуры горячей и холодной сторон экрана и средние температуры будут равны

$$T_{\text{Э1}} = T_{\text{Э2}},$$

$$T_{\text{СР1}} = T_{\text{СР4}}.$$

Произведя замену $T_{\text{СР1}} = T_{\text{СР4}} = T_{\text{СР}}$, получим трансцендентное уравнение относительно средней температуры экрана

$$T_{\text{СР}}^4 + \frac{\alpha}{\varepsilon_{\text{ПР}}} T_{\text{СР}} = T_P^4 + \frac{\alpha}{\varepsilon_{\text{ПР}}} \times T_0. \quad (12)$$

Здесь

$$T_P = \sqrt[4]{\frac{(T_1^4 + T_2^4)}{2}}.$$

температура экрана $T_{\text{СР}}$ при условии $\alpha = 0$ (без теплообмена).

Трансцендентное уравнение (12) решается численно с помощью стандартного математического обеспечения.

Подстановка $T_{\text{СР}}$ в систему уравнений (1) – (2), (4) – (9) позволяет полностью рассчитать теплообмен в экране с бесконечно малым тепловым сопротивлением. Решение будет практически точным, так как численное решение уравнения (12) может быть получено с любой заранее заданной точностью.

Если тепловое сопротивление экрана не является бесконечно малым, температуры $T_{\text{Э1}}$ и $T_{\text{Э2}}$ не равны. Увеличение теплового сопротивления экрана приводит к

увеличению разности температур $T_{\text{Э1}}$ и $T_{\text{Э2}}$; но при этом, как показали проведенные расчеты, изменение температур сторон экрана происходит так, что средние температуры T_{CP1} и T_{CP4} приближенно остаются равными в достаточно большой окрестности точки $T_{\text{Э1}} = T_{\text{Э2}}$ (рис.2).

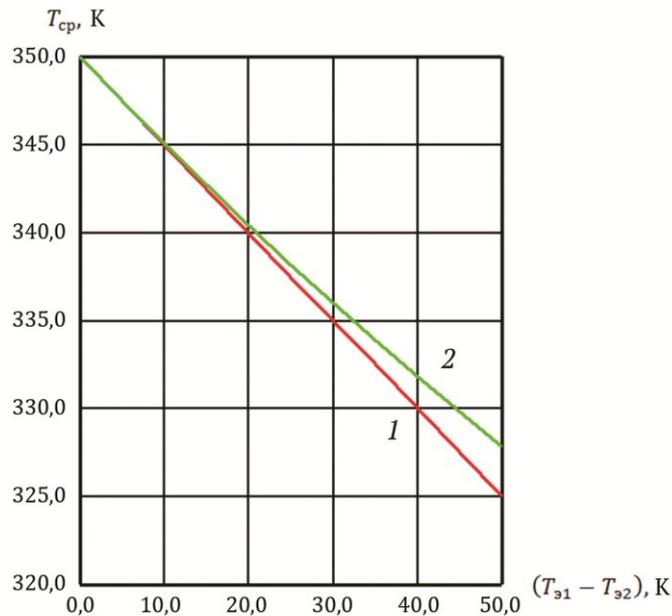


Рис. 2 Изменение средних температур в экране с конечной величиной теплового сопротивления
1 – T_{CP1} , 2 – T_{CP4}

Это свойство можно использовать для приближенного вычисления температур $T_{\text{Э1}}$ и $T_{\text{Э2}}$ через среднюю температуру T_{CP}

$$T_{\text{Э1}} = T_{\text{CP}} + 0,5 \times (q_1 - q_{\text{K1}}) \times R, \quad (13)$$

$$T_{\text{Э2}} = T_{\text{CP}} - 0,5 \times (q_1 - q_{\text{K1}}) \times R. \quad (14)$$

При этом решение системы уравнений (1) – (2), (4) – (9), (13) – (14) будет приближенным. Точность решения можно контролировать по сходимости теплового баланса в экране.

$$q_1 - q_{\text{K1}} = q_2 + q_{\text{K2}}.$$

По изложенной выше методике проведены расчеты эффективности экрана при температуре источника излучения $T_1=536 \text{ К}$, температуре приемника излучения $T_2=306 \text{ К}$, температуре окружающего воздуха $T_0=296 \text{ К}$, степенях черноты излучателя и

приемника излучения $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,8$ и плотности теплового потока излучением без экрана

$$q_0 = 2800 \frac{Bm}{M^2}.$$

Результаты представлены на рисунке 3 в виде зависимостей коэффициентов эффективности экрана η от степени черноты экрана (Рис. 3а), коэффициента теплоотдачи на поверхности экрана α (Рис. 3б) и теплового сопротивления экрана R (Рис. 3в).

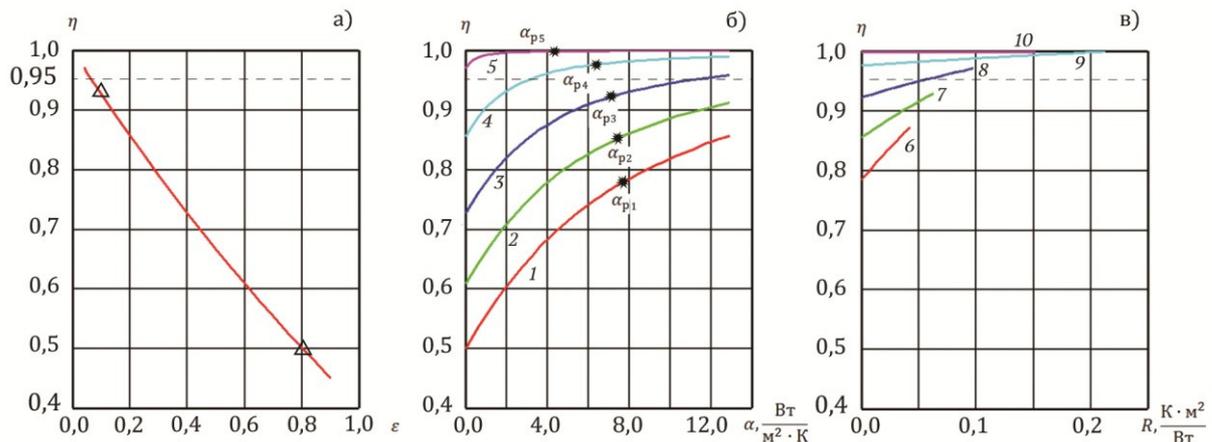


Рис. 3. Зависимость коэффициента эффективности плоского параллельного непрозрачного экрана от а) степени черноты экрана ε_3 , б) коэффициента теплоотдачи на поверхности экрана α , в) теплового сопротивления экрана R .

Δ - расчетные данные [2,3]; * - значения α_p , рассчитанные по формуле (15) для свободной конвекции; ---- нормативная величина η при $q_2 = 140 \frac{Bm}{M^2 K}$; 1 – при $\varepsilon_3 = 0,8$; 2 – $\varepsilon_3 = 0,6$; 3 – $\varepsilon_3 = 0,4$; 4 – $\varepsilon_3 = 0,2$; 5 – $\varepsilon_3 = 0,04$; 6 – $\varepsilon_3 = 0,8$ и $\alpha = \alpha_{p1}$; 7 – $\varepsilon_3 = 0,6$ и $\alpha = \alpha_{p2}$; 8 – $\varepsilon_3 = 0,4$ и $\alpha = \alpha_{p3}$; 9 – $\varepsilon_3 = 0,2$ и $\alpha = \alpha_{p4}$; 10 – $\varepsilon_3 = 0,04$ и $\alpha = \alpha_{p5}$

На рисунке 4 представлена зависимость равновесного коэффициента теплоотдачи α_{p1} от степени черноты экрана ε_3 .

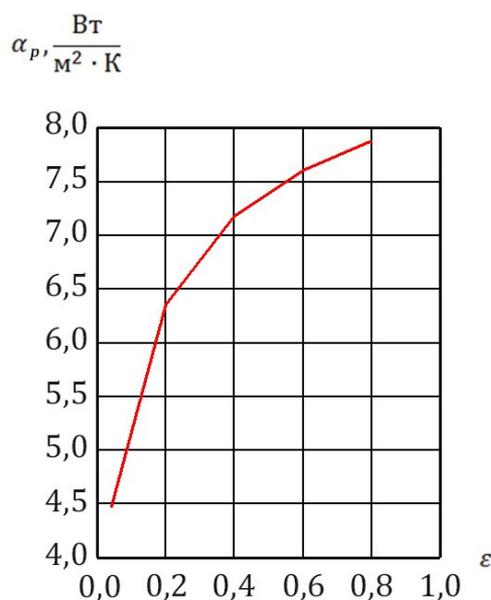


Рис. 4. Зависимость равновесного коэффициента теплоотдачи α_{p1} от степени черноты экрана ϵ_{Σ}

Полученная в расчетах зависимость эффективности экрана от его степени черноты, приведенная на рисунке 3а, хорошо совпадает с известными данными, опубликованными в работах [2,3].

Зависимости коэффициента эффективности от коэффициента теплоотдачи (рисунок 3б) связаны со степенью черноты экрана, определяющей при заданной величине коэффициента теплоотдачи равновесную температуру экрана. При уменьшении степени черноты равновесная температура экрана снижается, а эффективность экрана растет.

При наиболее вероятном режиме охлаждения экрана, свободной турбулентной конвекции, теплообмен на плоском экране (вертикально расположенной пластине) описывается зависимостью [4]:

$$Nu = 0,15(Gr Pr_{\text{жс}})^{0,33} \left(\frac{Pr_{\text{жс}}}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25},$$

в которой коэффициент теплоотдачи α , входящий в число Нуссельта $Nu = \frac{\alpha X}{\lambda}$, не зависит от характерного размера X , входящего в числа Нуссельта в первой степени, а в число Грасгофа $Gr = \frac{g\beta(T_{CP} - T_0)X^3}{\nu^2}$ в третьей. В результате формула для коэффициента теплоотдачи принимает вид

$$\alpha = \lambda * 0,15 \left(\frac{g\beta(T_{CP} - T_0)}{\nu^2}\right)^{0,33} (Pr_{\text{жс}})^{0,33} \left(\frac{Pr_{\text{жс}}}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25}. \quad (15)$$

Здесь: λ – коэффициент теплопроводности, $\frac{Вт}{м К}$; Pr – число Прандтля, индекс «ж» означает, что физические параметры выбираются по температуре потока, а индекс «ст» – по температуре стенки; g – ускорение свободного падения, $\frac{м}{с^2}$; β – коэффициент объемного расширения; ν – коэффициент кинематической вязкости, $\frac{м^2}{с}$. В расчетах теплообмена все параметры определены по воздуху.

В результате расчетов для степеней черноты экрана, равных 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; 0,04; получены следующие значения равновесных коэффициентов теплоотдачи $\alpha_{P1} = 7,88 \frac{Вт}{м^2 К}$, $\alpha_{P2} = 7,61 \frac{Вт}{м^2 К}$, $\alpha_{P3} = 7,18 \frac{Вт}{м^2 К}$, $\alpha_{P4} = 6,36 \frac{Вт}{м^2 К}$, $\alpha_{P5} = 4,47 \frac{Вт}{м^2 К}$ соответственно.

Вклад теплообмена при свободной конвекции в эффективность экрана достаточно высок. При степени черноты экрана порядка 0,8 он достигает 50 % (кривая 1 на рисунке 3б). Влияние теплообмена необходимо учитывать в практических расчетах эффективности экранов.

Влияния теплового сопротивления экрана на его коэффициент эффективности оценивалось приближенно. Расчетные данные, приведенные на рисунке 3в, обеспечивают выполнение теплового баланса на экране с точностью 5 %. При расширении диапазона по величине теплового сопротивления точность снижается.

В то же время полученные данные хорошо отражают тенденцию изменения коэффициента эффективности экрана с увеличением теплового сопротивления экрана $R = \frac{\Delta}{\lambda}$ и позволяют при необходимости обоснованно выбрать теплозащитный материал (λ) и оценить требуемую толщину теплозащитного покрытия (Δ), обеспечивающие выполнение норматива по интенсивности теплового излучения для условий применения экрана (пунктир на рисунке 3в).

В целом, предлагаемая методика позволяет, варьируя параметры: степень черноты, коэффициент теплоотдачи на поверхности и тепловое сопротивление экрана – определяющие тепловое равновесие на экране в заданных условиях эксплуатации – выбрать экран, снижающий тепловой поток излучением до нормативной величины.

Методика может быть использована для практических расчетов экранов, предназначенных для защиты от теплового излучения.

Список литературы

1. Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда.
2. Архаров А.М., Афанасьев В.Н. Теплотехника. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 711 с.
3. Кошкин В.К. Теплопередача в авиационной и ракетно-космической технике. М.: Машиностроение, 1975. 624 с.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоатомиздат, 1987. 376 с.