

*А.Я. Шаршанов, к.ф.-м.н., доцент, НУГЗУ*

## ТЕПЛОЗАЩИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНОГО СЛОЯ

(представлено д.т.н. Тарасенком А.А.)

Проведено сравнение теплозащитного действия однородного и случайно-неоднородного покрытия. Показано, в какой ситуации учет неоднородности существенен.

**Ключевые слова:** тепловая защита, случайно-неоднородное покрытие, ослабление теплового потока.

**Постановка проблемы.** Пожар, как правило, означает наличие высокотемпературных источников тепла, делающих актуальной задачу защиты окружающих объектов от избыточных тепловых потоков. Одним из возможных способов защиты является нанесение на защищаемую поверхность дополнительного покрытия. Проблемой является выявление зависимости защитного действия таких покрытий от характера их физических свойств.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Защитное действие покрытий исследовалось давно и продолжается сейчас. Множество работ рассматривают использование для теплозащиты покрытия с низкой теплопроводностью, достигаемой включением в неоднородную структуру материала пустотелых образований [1]. Ряд работ посвящено использованию материалов, теплозащитное действие которых достигается за счет вызываемой нагреванием эндотермической реакции [2, 3]. Как вариант такой защиты можно трактовать использование гелиевых систем [4]. Последние зачастую являются неоднородными, однако анализируются как однородные. Группа исследований посвящена ситуации, когда неоднородность свойств вещества отражающего покрытия приводит к разогреву покрытия в электромагнитном поле теплового излучения [5-9]. В данной работе будет рассмотрено проявление влияния более простого обстоятельства, а именно, как нелинейная зависимости локальных защитных свойств покрытия от его толщины отражается в интегральных защитных характеристиках покрытия в случае случайного характера толщины.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является оценка защитного действия случайно-неоднородного по толщине покрытия. Расчет проведен в случае, когда защищаемое тело является термически толстым. В таком пределе, как было показано в работе [10], нанесение покрытия в квазистационарном пределе формально приводит к увеличению термического сопротивления процесса передачи тепла на величину термического сопротивления теплопроводности защитного слоя.

Пусть на плоский незащищенный участок поверхности площадью  $dF$  падает тепловой поток  $dQ$ . Его величина определяется уравнением

## ТЕПЛОТДАЧИ

$$dQ = \frac{\Delta t}{R_\alpha} \cdot dF \text{ Вт}, \quad (1)$$

где  $R_\alpha \equiv 1/\alpha$  – термического сопротивления теплоотдачи,  $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$ , а  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ ;  $\Delta t$  – перепад температур между горячей средой и защищаемой поверхностью,  $\text{К}$ . В этом случае, если на данную поверхность нанести почти плоский слой (нормаль к его поверхности отклоняется на малый угол от нормали к защищаемой поверхности) защитного материала, то тепловой поток, попадающий на защищаемую поверхность, примет величину

$$dQ_s = \frac{\Delta t}{R_\alpha + R_\lambda} \cdot dF, \text{ Вт}. \quad (2)$$

Здесь  $R_\lambda(h) \equiv h/\lambda$  – термического сопротивления теплопроводности плоского слоя,  $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $h$  – толщина слоя,  $\text{м}$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала слоя,  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ .

Тепловой поток  $Q_s$  через конечный участок защищенной поверхности получается интегрированием соотношения (2) по её площади  $F$

$$Q_s = \int_F \frac{\Delta t}{R_\alpha + R_\lambda} \cdot dF, \text{ Вт}. \quad (3)$$

Используем то обстоятельство, что толщина защитного слоя  $h$  является случайной функцией местоположения. Введем плотность вероятности доли площадей защитного слоя с заданной толщиной

$$g(h) \equiv \frac{1}{F} \cdot \frac{dF}{dh}, \text{ м}^{-1}. \quad (4)$$

где  $F$  – общая защищаемая площадь,  $\text{м}^2$ .

Используя соотношения (1) – (4), представим поток тепла (3) в виде

$$Q_s = k \cdot Q, \text{ Вт}, \quad (5)$$

где  $Q = \frac{\Delta t}{R_\alpha} \cdot F$ ,  $\text{Вт}$ , – общий поток тепла через поверхность без защиты, а

$k$  – коэффициент ослабления теплового потока случайным защитным слоем, равный

$$k = \int_0^\infty \frac{g(h) \cdot dh}{1 + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot h}. \quad (6)$$

Коэффициент (6) существенно зависит от конкретной зависимости плотности распределения  $g(h)$ . Достаточно общая структура этой функции имеет вид

$$g(h) = P_0 \cdot \delta(h) + \vartheta(h) \cdot \tilde{g}(h), \text{ м}^{-1}. \quad (7)$$

Здесь  $\delta(h)$  – дельта-функция Дирака, одно из основных свойств которой записывается соотношением

$$\int_0^{\infty} f(h) \cdot \delta(h) \cdot dh = f(0), \quad (8)$$

где  $f(h)$  – произвольна гладкая в нуле функция от  $h$ . Символом  $\vartheta(h)$  обозначена функция Хэвисайда (единичная положительная ступенька, возникающая при  $h = 0$ ).

В соответствии с соотношениями (4), (7), (8) множитель  $P_0$  является вероятностью реализации защитного слоя нулевой толщины, что предположительно совпадает с долей незащищенной площади. Функция  $\tilde{g}(h)$  описывает распределение площадей защитного слоя в случае  $h > 0$ . В ходе дальнейших оценок будем предполагать, что распределение  $g(h)$  определяется двумя характерными длинами: 1) наиболее вероятным (кроме нулевого) значением толщины защитного слоя  $a$ , м; 2) характерным масштабом изменения толщины слоя  $\sigma$ , м.

Естественно предположить, что вид распределения существенно зависит от величины  $ym = a/\sigma$ , являющейся наиболее вероятной толщиной защитного слоя, обезразмеренной на характерный масштаб изменения. Предположим, что вероятность  $P_0$  определяется только  $ym$ , а зависимость  $\tilde{g}(h)$  имеет вид усеченного нормального распределения

$$\tilde{g}(h) = \frac{C}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h}{\sigma} - ym\right)^2\right], \text{ м}^{-1}. \quad (9)$$

Множитель  $C$  определяется из условия нормировки

$$\begin{aligned} 1 &= \int_0^{\infty} g(h) \cdot dh = P_0(ym) + \frac{C}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{1}{2} (y - ym)^2\right] \cdot dy = \\ &= P_0(ym) + \frac{C}{2} \cdot \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{ym}{\sqrt{2}}\right)\right], \end{aligned} \quad (10)$$

в котором символом  $\operatorname{erf}(Z)$  обозначен Гауссов интеграл ошибок.

Если принять не критичную для получаемых результатов гипотезу, что вероятность  $P_0$  совпадает с общей вероятностью отрицательных зна-

чений толщины  $h$  в нормальном распределении, то

$$P_0(y_m) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma}} \int_{-\infty}^0 \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{h}{\sigma} - y_m \right)^2 \right] \cdot dh = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{y_m}{\sqrt{2}} \right) \right]. \quad (11)$$

В этом случае из выражения (10) следует, что  $C = 1$ , и коэффициент ослабления теплового потока случайным защитным слоем равен

$$k(y_m, Bi) = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{y_m}{\sqrt{2}} \right) \right] + \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^{\infty} \frac{\exp \left[ -\frac{1}{2} (y - y_m)^2 \right]}{1 + Bi \cdot y} \cdot dy. \quad (12)$$

В формуле (12) введен безразмерный параметр

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \sigma}{\lambda}, \quad (13)$$

который можно трактовать как критерий Био, связанный с характерным изменением толщины защитного слоя  $\sigma$ .

Графики зависимости коэффициента ослабления теплового потока случайным защитным слоем  $k(y_m, Bi)$  от  $y_m$  при различных значениях критерия  $Bi$  представлены на рис. 1.

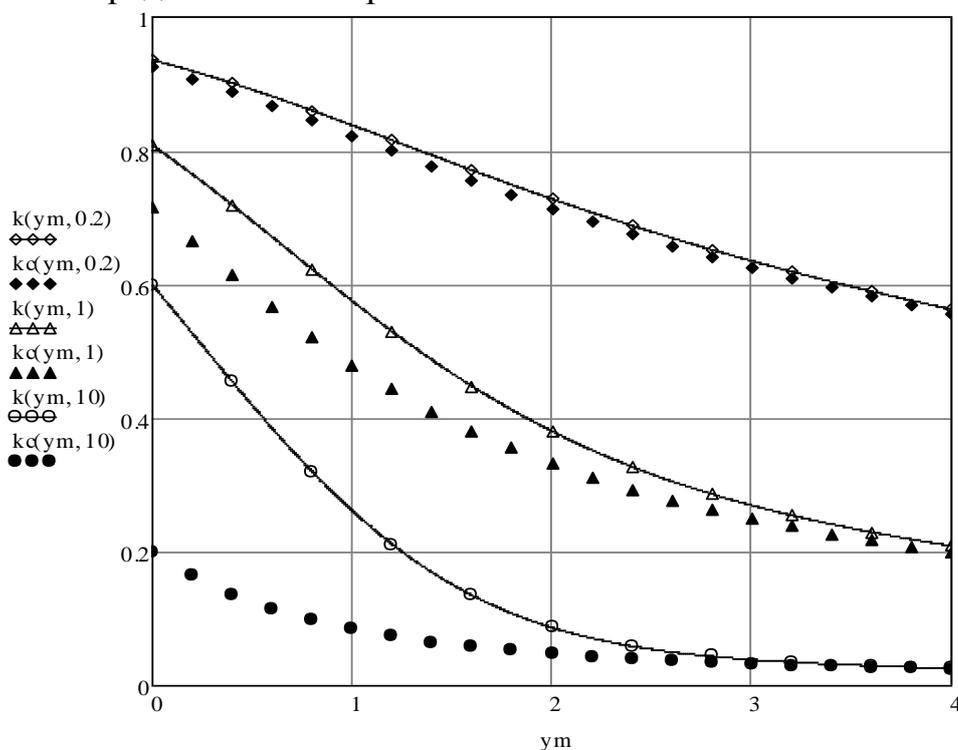


Рис. 1. Графики зависимости коэффициента ослабления теплового потока защитным слоем случайной толщины  $k(y_m, Bi)$  и соответствующим ему защитным слоем постоянной толщины  $k_\alpha(y_m, Bi)$  при различных значениях критерия  $Bi$

Величина  $k_c(y_m, Bi)$  на рисунке 1 является коэффициентом ослабления теплового потока слоем постоянной толщины, равной средней толщине соответствующего слоя случайной толщины

$$k_c(y_m, Bi) = \frac{1}{1 + Bi \cdot \bar{y}(y_m)}, \quad (14)$$

где  $\bar{y}$  – обезразмеренное на  $\sigma$  среднее значение толщины слоя случайной толщины

$$\bar{y}(y_m) = \frac{1}{\sigma} \cdot \int_0^{\infty} h \cdot g(h) \cdot dh = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^{\infty} y \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}(y - y_m)^2\right] \cdot dy. \quad (15)$$

Сравнение графиков рисунка 1 демонстрирует отличие защитного действия покрытий случайной и неслучайной толщины.

**Выводы.** Проведено сравнение теплозащитного действия однородного и случайно-неоднородного покрытия. Показано, что учет неоднородности толщины покрытия существенен при совместном выполнении двух условий: 1) не малой величине вариаций толщины по сравнению с её средним значением ( $\sigma \sim a$ ); 2) не малым значением вариационного критерия Био  $\left(Bi = \frac{\alpha \cdot \sigma}{\lambda} \geq 1\right)$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gabriele Landucci G., Rossi F., Nicoletta C., Zanelli S. Design and testing of innovative materials for passive fire protection // Fire Safety Journal. – 2009. – Vol.44. No. 8. – P. 1103–1109.
2. Alifanov O.M., Budnik C.A., Mikhailov V.V., Nenarokomov A.B. An Experimental Computational System for Materials Thermal Properties Determination and its Application for Spacecraft Testing // Acta Astronautica». 2007. Vol. 61. P. 341–351.
3. Heimann R.B. and Lehmann H.D. Recently patented work on thermally sprayed coatings for protection against wear and corrosion of engineered structures // Recent Patents on Materials Science. Bentham Sc. Publ. Ltd. – 2008. – No. 1. – P. 41–55.
4. Шаршанов А.Я., Абрамов Ю.А., Киреев А.А. Моделирование охлаждения термически толстого тела огнетушащим гелеобразующим составом. // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2013. – Т. 8. № 2. – С. 65–71.
5. Manara J., Arduini-Schuster M., Ratzer-Scheibe H. -J. and Schulz U. Infrared-optical properties and heat transfer coefficients of semitransparent thermal barrier coatings // Surface and Coatings Technology. – 2009. – Vol. 203. No. 8. – P. 1059–1068.

6. Merzlikin V., Sidorov O., Cheranev S., Antonakopoulos N. Optimal spectral optical and thermo radiating characteristics of semitransparent heat-insulating coatings for low-heat-rejection diesel engines // 11th Int. Conference on Engines and Vehicle (ICE2011). 11 September 2011, Capri-Naples, Italy. Book of abstracts, 2011. P. 41. Conference CD-ROM. Paper No. 11ICE-0173. – 10 p.

7. Shen Wei, Wang Fu-chi, Fan Qun-Bo, Ma Zhuang. Effects of defects on the effective thermal conductivity of thermal barrier coatings // Applied Mathematical Modelling. – 2012. – Vol. 36. No. 5. – P. 1995–2002.

8. Staggs J.E.J. A theoretical appraisal of the effectiveness of idealised ablative coatings for steel protection. // Fire Safety Journal. – 2008. – Vol. 43. No. 8. – P. 618–625.

9. Collin A., Marchand A., Kadi A., Acem Z., Charette H. Study on visible–IR radiative properties of personal protective clothings for firefighting // Fire Safety Journal. – 2015. – Vol. 71. – P. 9–19.

10. Шаршанов А.Я. Расчет защиты массивного тела теплозащитным покрытием // Проблемы пожарной безопасности. Сб. науч. тр. – Харьков: УГЗУ.- 2006 – Вып.20 – С. 75–80.

*Получено редколлегией 10.03.2018*

А.Я. Шаршанов

**Теплозахисна дія випадково-неоднорідного шару**

Проведено порівняння теплозахисної дії однорідного і випадково-неоднорідного покриття. Показано, в якій ситуації врахування неоднорідності істотне

**Ключові слова:** тепловий захист, випадково-неоднорідне покриття, ослаблення теплового потоку.

A. Sharshanov

**Thermal protection of a randomly inhomogeneous layer**

A comparison of the heat-shielding effect of a homogeneous and randomly inhomogeneous coating is made. It is shown in which situation the consideration of heterogeneity is essential.

**Keywords:** thermal protection, randomly inhomogeneous coating, heat flux attenuation.