

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ДВУХСЛОЙНОГО ОГНЕЗАЩИТНОГО ЭКРАНА

(представлено д-ром техн. наук Басмановым А.Е.)

Построена математическая модель для расчета защитного действия двухслойного огнезащитного экрана. Показана большая эффективность двухслойного защитного экрана по сравнению с однослойным.

**Ключевые слова:** двухслойный огнезащитный экран, лучистый и конвективный потоки тепла, критическая температура, математическая модель.

**Постановка проблемы.** Для эвакуации пострадавших пожарно-спасательные подразделения оснащены соответствующими средствами спасения. Главным недостатком имеющихся средств эвакуации является отсутствие огнезащитного покрытия, которое способно снизить уровень влияния на тело пострадавшего такого опасного фактора пожара, как тепловой поток от открытого пламени. Сложившаяся ситуация делает актуальными исследования защитного действия теплоизоляционных накидок, предназначенных для защиты пострадавшего от влияния высокотемпературных источников энергии.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Для решения задачи в недавней работе [1] было рассмотрено защитное действие однослойного защитного покрытия, действующего как оптически непрозрачный экран. Время защитного действия такого экрана определяется временем его нагрева до опасного уровня температуры  $t_{cr}$ . Увеличение времени нагрева этого экрана за счет увеличения его толщины ограничено тем обстоятельством, что рост толщины экрана увеличивает его вес, что является отрицательным фактором. В качестве решения проблемы предлагается применение двухслойного экрана.

**Постановка задачи и ее решение.** В работе исследуется математическая модель нагревания защитного покрытия, представляющего собой экран, состоящий из двух оптически непрозрачных, но термически тонких слоев, разделенных газовой (воздушной) прослойкой. Определяется время нагревания экранирующих слоев под действием пламени до критических значений температуры. Схема расположения экрана изображена на рис. 1, на котором объектам соответствуют индексы: « $f$ » - пламя; «1» - горячий слой; «2» - холодный слой; « $w$ » - защищаемая поверхность. Используемые величины обозначены символами: « $T$ » - абсолютная температура, К; « $h$ » - толщина слоя, м; « $x$ » - расстоя-

ние от слоя экрана до ближайшей экранируемой поверхности, м; « $\rho$ » - плотность материала экрана, кг·м<sup>-3</sup>; « $c_p$ » - удельная массовая изобарная теплоемкость экранного слоя, Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>; « $\epsilon$ » - степень черноты (относительная излучательная способность) поверхностей. Предполагается, что суммарная толщина слоев  $h_s$  является постоянной величиной, то есть  $h_1 + h_2 = h_s = \text{const}$ .

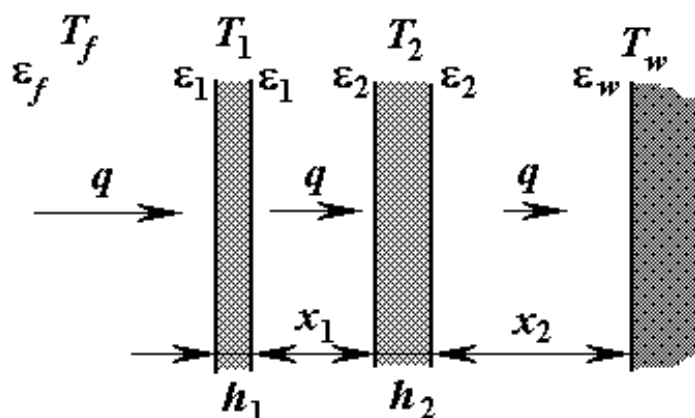


Рис. 1. Схема задачи термической защиты тела при помощи двухслойного экрана

Как и в работе [1] предполагается, что безопасность сохраняется, если удельный результирующий поток тепла от нагретшегося экрана к телу пострадавшего не превышает соответствующего критического значения  $q_{cr}$  ( $q_{cr} \approx 1200 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ ). Данный критерий накладывает требование на температуру  $t_2$  (°С) внутреннего слоя экрана: иначе говоря, критерий безопасности имеет вид

$$t_2 \leq t_{cr.2}, \quad (1)$$

где  $t_{cr.2}$  – критическое значение температуры внутреннего слоя экрана, соответствующее критическому значению  $q_{cr}$ . В работе [1] показано, что в зависимости от значений степеней черноты объектов и расстояний между ними, величина  $t_{cr.2}$  лежит в диапазоне от 130 до 280°С.

Сразу отметим, что вплоть до наступления неприемлемой ситуации изменение температуры поверхности защищаемого тела является незначительным. В связи с этим будем считать эту температуру постоянной (приблизительно равной  $T_w \approx 40 + 273$ , К).

Удельные тепловые потоки ( $q$ ) между слоями экрана и от экрана к защищаемой поверхности имеют две составляющие – радиационную ( $q_r$ ) и конвективную ( $q_c$ )

$$q = q_r + q_c. \quad (2)$$

Вклад радиационной составляющей в поток можно оценить соотношением [2]

$$q_r(T', T'', \varepsilon', \varepsilon'') = (\varepsilon'^{-1} + \varepsilon''^{-1} - 1)^{-1} \cdot \sigma \cdot [T'^4 - T''^4], \quad (3)$$

где  $\varepsilon'$ ,  $T'$  и  $\varepsilon''$ ,  $T''$  – соответственно, степени черноты, абсолютные температуры горячей и холодной поверхностей теплообмена;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$  – константа излучения абсолютно чёрного тела.

Конвективный теплоперенос вызван свободной конвекцией воздуха в зазоре между накидкой и телом потерпевшего. Адекватную оценку величины соответствующего удельного теплового потока дает выражение (смотри [2])

$$q_c(T', T'', x) = \varepsilon_{con} \cdot \frac{\lambda_a}{x} \cdot (T' - T''), \quad (4)$$

где  $x$  - характерное расстояние (толщина зазора) между поверхностями теплообмена, м;  $\lambda_a$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ; индекс «а» здесь и далее указывает на то, что соответствующая характеристика воздуха определяется при его средней температуре  $T_a = \frac{T' + T''}{2}$ .

Число подобия  $\varepsilon_{con}$  отображает обусловленное конвекцией воздуха возрастание теплопереноса. Величина  $\varepsilon_{con}$  определяется из критериального уравнения

$$\varepsilon_{con} = 0.18 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})_a^{0.25}, \quad (5)$$

в котором выражение в скобках представляет собой произведение критериев Грасгофа (Gr) и Прандтля (Pr)

$$(\text{Gr} \cdot \text{Pr})_a = \frac{g \cdot (T' - T'') \cdot x^3}{T_a \cdot \nu_a^2} \cdot \text{Pr}_a,$$

где  $g = 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  – ускорение свободного падения;  $\nu_a$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха,  $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ .

Отметим, что приведенные значения множителя и степени в критериальном уравнении (5) подразумевает выполнение ограничения

$$10^3 < (\text{Gr} \cdot \text{Pr})_a < 10^{10}.$$

Удельный тепловой поток от пламени на поверхность экрана можно оценить выражением (3) с соответствующими параметрами.

Для определения времени защитного действия экрана (времени нагрева её внутреннего слоя до температуры  $T_{cr} = t_{cr} + 273$ , К) рассматривается систему уравнений теплового баланса, являющаяся системой обыкновенных дифференциальных уравнений относительно времени  $\tau$

$$\rho_1 \cdot c_{p1} \cdot h_1 \cdot \frac{dT_1}{d\tau} = q_r(T_f, T_1, \varepsilon_f, \varepsilon_1) - q_r(T_1, T_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2) - q_c(T_1, T_2, x_1), \quad (6)$$

$$\rho_2 \cdot c_{p2} \cdot h_2 \cdot \frac{dT_2}{d\tau} = q_r(T_1, T_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2) + q_c(T_1, T_2, x_1) - q_r(T_2, T_w, \varepsilon_2, \varepsilon_w) - q_c(T_2, T_w, x_2), \quad (7)$$

все параметры которой описаны выше.

Отметим, что в случае однослойного экрана система (6), (7) заменяется на уравнение

$$\rho_s \cdot c_{ps} \cdot h_s \cdot \frac{dT_s}{d\tau} = q_r(T_f, T_s, \varepsilon_f, \varepsilon_s) - q_r(T_s, T_w, \varepsilon_s, \varepsilon_w) - q_c(T_s, T_w, x_s), \quad (8)$$

где индексом «s» помечены соответствующие характеристики однослойного экрана.

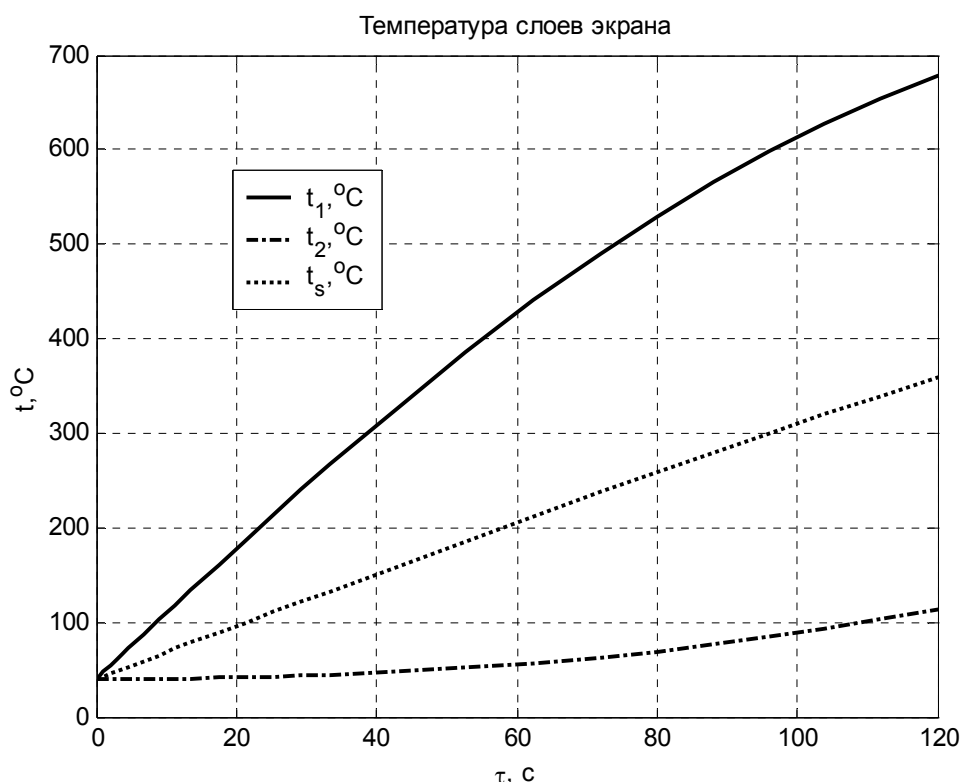
Система уравнений (6), (7) является математической моделью, описывающей защитное действие двухслойного экрана. В качестве начального условия к ней бралось равенство начальных значений температур слоев температуре защищаемой поверхности:  $T_1(0) = T_w$ ;  $T_2(0) = T_w$ .

Данная система, а также не зависящее от нее уравнение (8), решались численно с использованием среды Matlab. Результаты одного из типичных вариантов представлены на рисунке 2. В демонстрируемом варианте принято, что  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_s = 1 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ,  $c_{p1} = c_{p2} = c_{ps} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ,  $h_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $h_2 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $h_s = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $x_1 = 0,01 \text{ м}$ ,  $x_2 = 0,05 \text{ м}$ ,  $\varepsilon_f = 0,8$ ,  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_s = 0,2$ ,  $\varepsilon_w = 0,9$ ,  $T_f = 1000 + 273 \text{ К}$ ,  $T_w = 40 + 273 \text{ К}$ ,  $\lambda_a = 0,8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ,  $Pr_a = 0,69$ .

Сравнение температурных кривых  $t_2(\tau)$  и  $t_s(\tau)$  рис. 2 показывает, что двухслойный экран может в разы увеличивать время защитного действия. В тоже время кривая  $t_1(\tau)$  показывает, что для этого материал внешнего слоя экрана должен выдерживать температуру в несколько сотен градусов Цельсия. Отсюда следует, что при определении времени защитного действия двухслойного экрана необходимо кроме условия (1) отслеживать выполнение условия

$$t_1 \leq t_{cr.1}, \quad (9)$$

где  $t_{cr,1}$  - максимальная температура, до достижения которой материал внешнего слоя экрана сохраняет защитные свойства.



**Рис. 2.** Графики зависимости температур ( $t_1$  и  $t_2$ ) слоев двухслойного экрана от времени теплового воздействия  $\tau$ . Точками изображен график временной зависимости температуры ( $t_s$ ) однослойного экрана, имеющего толщину  $h_s = h_1 + h_2$

Изменение соотношения толщин слоев экрана (при неизменности величины  $(h_1 + h_2)$ ) противоположным образом влияет на изменение защитных времен, определяемых соотношениями (1) и (9). Данное обстоятельство указывает на необходимость решать задачу по оптимизации толщин слоев экрана, что может являться темой дальнейших исследований.

**Выводы.** Построена математическая модель для расчета защитного действия двухслойного теплоизоляционного экрана, предназначенного для защиты от теплового излучения пожара. Рассмотрение показало, что двухслойный экран более эффективен, чем однослойный экран, имеющий толщину слоя, равную сумме толщин слоёв двухслойного экрана.

Выяснилось, что решение задачи об определении максимального времени защитного действия двухслойного экрана требует отслеживания ограничения на температуру обоих слоев. Это обстоятельство указывает на существование оптимального соотношения толщин слоев экрана, определение которого можно провести в дальнейших работах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шаршанов А.Я. Создание условий для защиты пострадавшего от опасных факторов пожара / А.Я. Шаршанов, Р.В. Пономаренко, И.А. Поляков // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. - Вып. 36. – Харьков: НУГЗУ, 2014. – С. 192-199.

2. Исаченко В.П. Теплопередача: Учебник для вузов – 4-е изд., перераб. и доп. / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел / – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

А.Я. Шаршанов

### **Моделювання дії двошарового вогнезахисного екрану**

Побудована математична модель для розрахунку захисної дії двошарового вогнезахисного екрану. Показана більша ефективність двошарового захисного екрану у порівнянні з одношаровим.

**Ключові слова:** двошаровий вогнезахисний екран, променистий та конвекційний потоки тепла, критична температура, математична модель.

A.Ya. Sharshanov

### **Simulation of two-layer flame retardant screen**

A mathematical model for the calculation of the protective effect of the two-layer fire-retardant screen was created. Shows their increased efficiency dual-layer shielding compared with a single layer.

**Keywords:** two-layer fire protective screen, radiant and convective heat fluxes, the critical temperature, the mathematical model.