

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

## **ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО СООТНОШЕНИЯ ТОЛЩИН СЛОЕВ ДВУХСЛОЙНОГО ОГНЕЗАЩИТНОГО ЭКРАНА**

(представлено д-ром наук Мизерски А.)

Решена задача нахождения оптимального соотношения толщин слоев двухслойного огнезащитного экрана. Выбор обеспечивает максимальное время огнезащиты при фиксированной суммарной толщине слоев и ограничениях на температуры внутреннего и внешнего слоя.

**Ключевые слова:** двухслойный огнезащитный экран, критическая температура, максимальное время огнезащиты.

**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.** На начальной стадии исследования проблемы в работе [1] было рассмотрено защитное действие однослойного защитного покрытия, действующего как термически тонкий оптически непрозрачный экран. Время защитного действия такого экрана, определяемое как время его нагрева до опасной температуры, пропорционально толщине. Увеличение времени нагрева за счет увеличения его толщины ограничено соответствующим ростом веса экрана. В качестве решения проблемы увеличения времени огнезащиты в работе [2] было обосновано применение двухслойного экрана. Было показано, что двухслойный экран, суммарная толщина которого не превышает толщины аналогичного однослойного экрана, может в разы увеличить время огнезащитного действия.

**Постановка задачи и ее решение.** В связи с тем, что во время теплозащиты внешний слой экрана нагревается значительно сильнее внутреннего слоя, существует две критические температуры - температура потери защитных свойств внешним слоем и температура внутреннего слоя, при котором он опасен для защищаемого объекта. Именно подбор оптимального соотношения толщин слоев двухслойного экрана, обеспечивающий максимальное время огнезащиты при фиксированной суммарной толщине слоев и ограничениях на температуры внутреннего и внешнего слоя, является задачей данной работы.

В работе используется математическая модель [2] нагревания защитного покрытия, представляющего собой экран, состоящий из двух оптически непрозрачных термически тонких слоев, разделенных газовой (воздушной) прослойкой. Схема расположения экрана изображена на рисунке 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; « $x$ » - расстояние от слоя экрана до ближайшей экранируемой поверхности, м; « $\rho$ » - плотность материала экрана,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ; « $c_p$ » - удельная массовая изобарная теплоемкость экранного слоя,  $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ; « $\epsilon$ » - степень черноты (относительная излучательная способность) поверхностей. Предполагается, что суммарная толщина слоев  $h_s$  является постоянной величиной, то есть  $h_1 + h_2 = h_s = \text{const}$ .

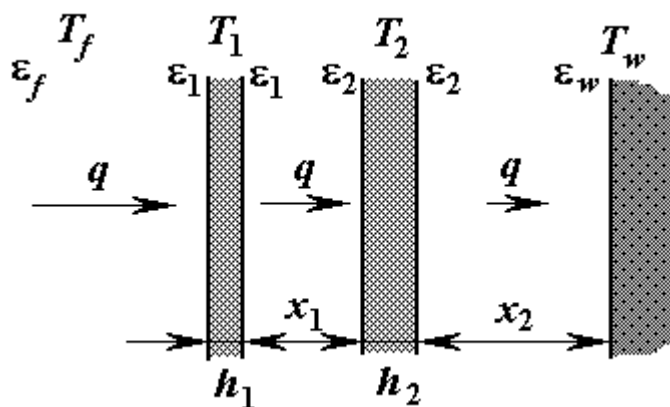


Рис. 1. Схема задачи термической защиты тела при помощи двухслойного экрана

Как и в работе [2] предполагается, что безопасность сохраняется, если удельный результирующий поток тепла от нагревшегося 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  $t_2$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) внутреннего слоя экрана: иначе говоря, критерий безопасности имеет вид:

$$t_2 \leq t_{cr,2} \tag{1}$$

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 $^{\circ}\text{C}$ .

Для обеспечения безопасности кроме условия (1) необходимо выполнять условие

$$t_1 \leq t_{cr,1}, \tag{2}$$

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

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 ( $q_c$ ):

$$q = q_r + q_c, \quad (3)$$

Вклад радиационной составляющей в поток можно оценить соотношением [3]

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

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 накладкой и телом потерпевшего. Адекватную оценку величины соответствующего удельного теплового потока дает выражение (смотри [3]):

$$q_c(T', T'', x) = \varepsilon_{con} \cdot \frac{\lambda_a}{x} \cdot (T' - T''), \quad (5)$$

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

$$\varepsilon_{con} = 0.18 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})_a^{0.25}, \quad (6)$$

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 (6) подразумевает выполнение ограничения

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

Удельный тепловой поток от пламени на поверхность экрана можно оценить выражением (4) с соответствующими параметрами.

Для определения времен нагрева слоев экрана исследуется система уравнений теплового баланса, являющаяся системой обыкновенных дифференциальных уравнений относительно времени  $\tau$ :

$$\rho_1 \cdot c_{p1} \cdot h_1 \cdot \frac{dT_1}{d\tau} = q_r(T_f, T_1, \varepsilon_f, \varepsilon_1) - q_r(T_1, T_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2) - q_c(T_1, T_2, x_1), \quad (7)$$

$$\rho_2 \cdot c_{p2} \cdot h_2 \cdot \frac{dT_2}{d\tau} = q_r(T_1, T_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2) + q_c(T_1, T_2, x_1) - q_r(T_2, T_w, \varepsilon_2, \varepsilon_w) - q_c(T_2, T_w, x_2), \quad (8)$$

все параметры которой описаны выше.

Система уравнений (7), (8) 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 решалась численно с использованием среды Matlab. Результаты одного из типичных вариантов представлены на рис. 2. В демонстрируемом варианте принято, что  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_s = 1 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ,  $c_{p1} = c_{p2} = c_{ps} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ,  $h_2 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $h_s = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $x_1 = 0.01 \text{ м}$ ,  $x_2 = 0.05 \text{ м}$ ,  $\varepsilon_f = 0,8$ ,  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_s = 0.2$ ,  $\varepsilon_w = 0.9$ ,  $T_f = 1000 + 273 \text{ К}$ ,  $T_w = 40 + 273 \text{ К}$ ,  $\lambda_a = 0,8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ,  $Pr_a = 0.69$ .

Временем защитного действия является время в течении которого одновременно выполняются оба условия (1) и (2). В связи с этим длительность интервала огнезащиты равна

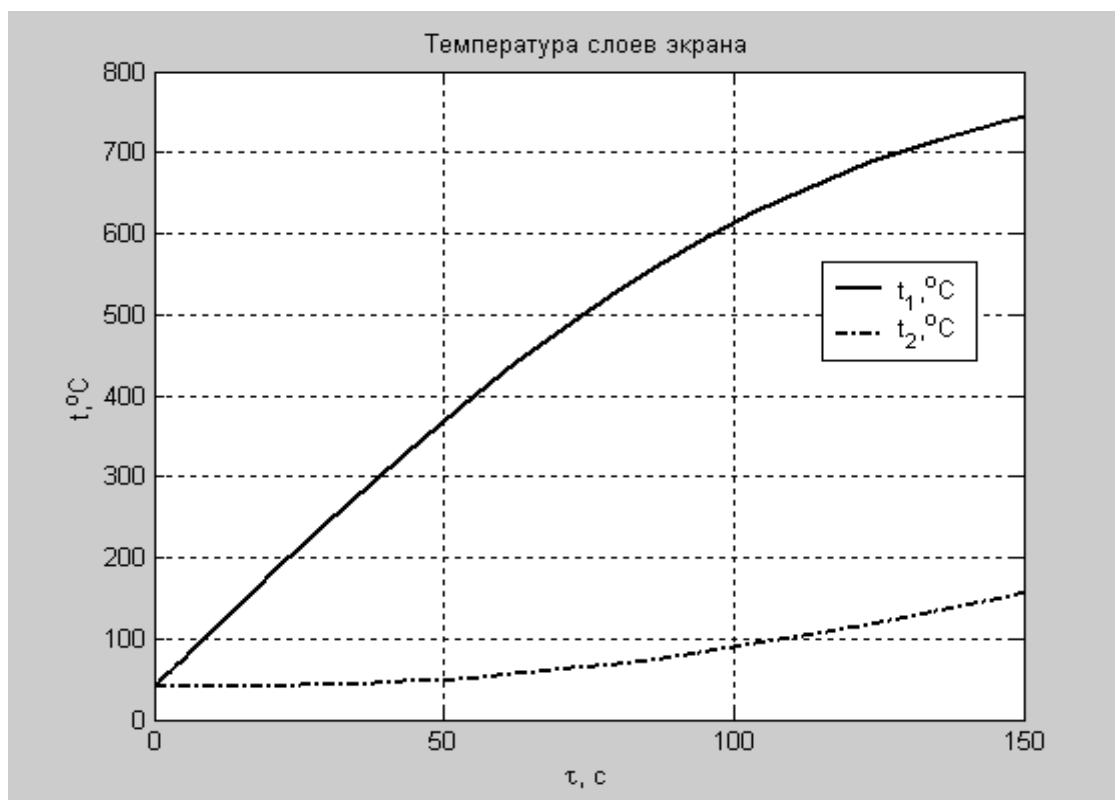
$$\tau_{cr.tot} = \min[\tau_{cr.1}(h_1), \tau_{cr.2}(h_2)] - \quad (9)$$

минимальному из времен нагрева слоёв экрана до соответствующих критических температур. В соответствии с условиями (1) и (2) времена  $\tau_{cr.1}$  и  $\tau_{cr.2}$  являются решениями уравнений

$$t_1(\tau_{cr.1}) = t_{cr.1} \quad (10)$$

и

$$t_2(\tau_{cr.2}) = t_{cr.2}. \quad (11)$$



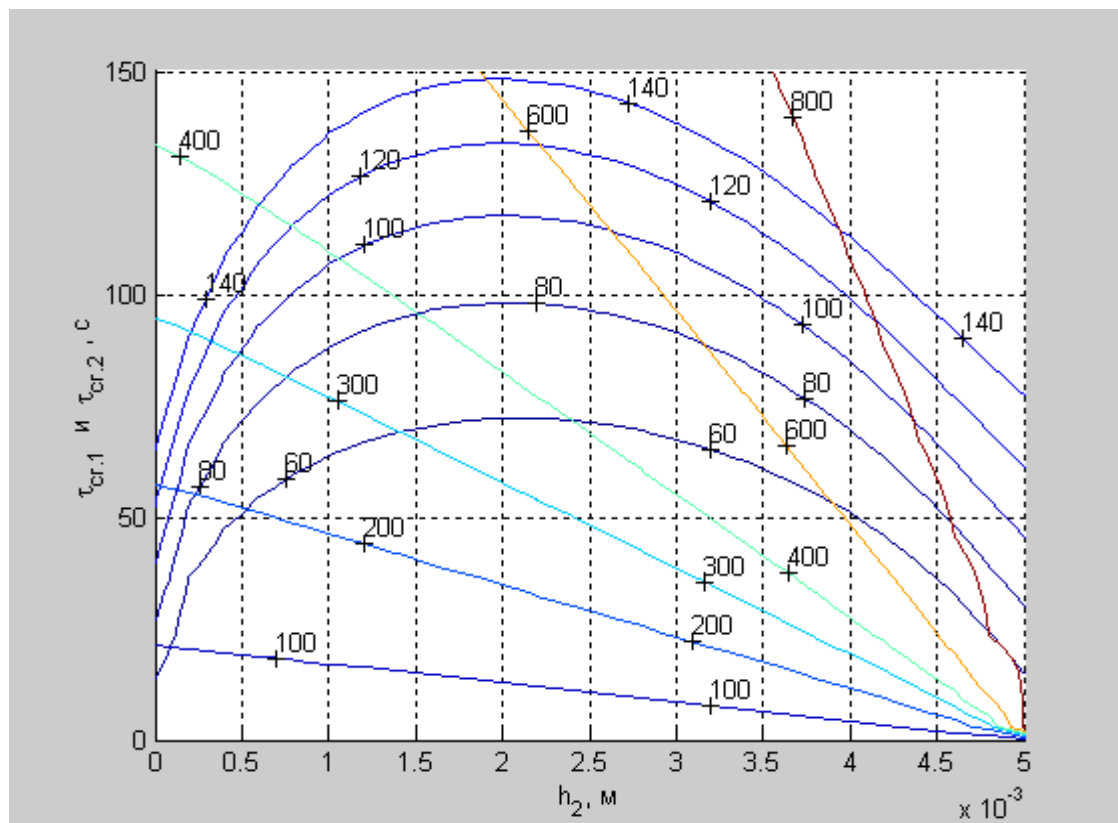
**Рис. 2.** Графики зависимости температур ( $t_1$  и  $t_2$ ) слоев двухслойного экрана от времени теплового воздействия  $\tau$

При фиксации суммарной толщины слоев ( $h_1 + h_2 = h_s = \text{const}$ ) времена  $\tau_{cr.1}$  и  $\tau_{cr.2}$ , а вместе с ними и время (9) становятся функциями толщины одного (например, внутреннего) слоя. Характерный вид таких зависимостей при разных значениях температур и значениях параметров, взятых из примера рис. 2, представлен на рис. 3.

При поиске  $h_2^*$ , толщины внутреннего слоя экрана, реализующего максимальное время огнезащиты (9) при заданных критических температурах  $t_{cr.1}$  и  $t_{cr.2}$ , существенными оказываются два значения толщины внутреннего слоя экрана. Первой является толщина  $h_2^{(2)}$ , реализующая максимальное значение времени  $\tau_{cr.2}$ . (к примеру, при  $t_{cr.2}=100^\circ\text{C}$  (согласно рисунку 3)  $h_2^{(2)} \approx 2.0$  мм и  $\tau_{cr.2} \approx 120$  с). Второй важной толщиной является  $h_2^{(1-2)}$ , при которой совпадают времена защитного времени внешнего и внутреннего слоев экрана. Эта величина является корнем уравнения

$$\tau_{cr.1}(h_s - h_2^{(1-2)}) = \tau_{cr.2}(h_2^{(1-2)}). \quad (12)$$

На рис. 3 этой точке соответствует пересечение линий  $\tau_{cr.1}(h_s - h_2)$  и  $\tau_{cr.2}(h_2)$  (к примеру, при  $t_{cr.2}=100^\circ\text{C}$  и  $t_{cr.1}=600^\circ\text{C}$  (согласно рис. 3)  $h_2^{(1-2)} \approx 2.6$  мм и  $\tau_{cr.1} = \tau_{cr.2} \approx 115$  с, а при  $t_{cr.2}=100^\circ\text{C}$  и  $t_{cr.1}=300^\circ\text{C}$   $h_2^{(1-2)} \approx 0.5$  мм и  $\tau_{cr.1} = \tau_{cr.2} \approx 85$  с).



**Рис. 3.** Графики зависимости критических времен от толщины внутреннего слоя при разных значениях критических температур. Временам  $\tau_{cr.2}$  отвечает набор дуг, временам  $\tau_{cr.1}$  соответствуют линии, веером выходящие из правого нижнего угла. Нанесенные линии являются изотермами (соответствующие значения температур по шкале Цельсия проставлены рядом с крестиками)

Как следует из структуры зависимостей  $\tau_{cr.1}$  и  $\tau_{cr.2}$  от толщины внутреннего слоя  $h_2$ , представленных на рисунке 3, при заданных величинах критических температур  $t_{cr.1}$  и  $t_{cr.2}$  максимальное время огнезащиты (9) реализуется при минимальной из толщин  $h_2^{(2)}$  и  $h_2^{(1-2)}$ :

$$h_2^* = \min(h_2^{(1-2)}, h_2^{(2)}), \tag{13}$$

а соответствующее максимально время равно  $\tau_{cr.tot}(h_2^*)$ .

К примеру, при  $t_{cr.2}=100^\circ\text{C}$  и  $t_{cr.1}=600^\circ\text{C}$  (согласно рисунку 3)  $h_2^* = h_2^{(2)} \approx 2.0$  мм и  $\tau_{cr.tot} \approx 120$  с, а при  $t_{cr.2}=100^\circ\text{C}$  и  $t_{cr.1}=300^\circ\text{C}$  получается  $h_2^* = h_2^{(1-2)} \approx 0.5$  мм и  $\tau_{cr.tot} \approx 85$  с.

Отметим, что действительным параметром, определяющим время изменения температуры слоя экрана, является не его толщина, теплоемкость единицы площади, равная  $\rho \cdot c_p \cdot h$ . Это обстоятельство необходимо учитывать, если решать задачу подбора оптимальных толщин слоев, состоящих из разных материалов.

**Выводы.** Решена задача нахождения оптимального соотношения толщин слоев двухслойного огнезащитного экрана, состоящих из одинакового материала. Выбор обеспечивает максимальное время огнезащиты при фиксированной суммарной толщине слоев и ограничениях на температуры внутреннего и внешнего слоя. Продемонстрирован способ определения толщин слоев и соответствующего максимального времени защиты.

## 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. Шаршанов А.Я. Моделирование действия двухслойного огнезащитного экрана. / А.Я. Шаршанов // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. - Вып. 37. – Харьков: НУГЗУ, 2015. – С. 235-240.
3. 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

**Вибір оптимального співвідношення товщини шарів двошарового вогнезахисного екрану**

Вирішена задача відшуку оптимального співвідношення товщини шарів двошарового вогнезахисного екрану. Вибір забезпечує максимальний час вогнезахисту за фіксованої сумарної товщини шарів та обмеженнях на температури внутрішнього і зовнішнього шарів.

**Ключові слова:** двошаровий вогнезахисний екран, критична температура, максимальний час вогнезахисту.

A.Ya. Sharshanov

**The choice of the optimal ratio of the thickness of the layers of two-layer fire resistant screen**

Solved the problem of finding the optimum ratio of the thicknesses of layers two-layer fire-resistant of the screen. Selection ensures maximum fire protection at a fixed total thickness of the layers and the restrictions on the temperature of the inner and outer layer.

**Keywords:** double-layer fireproof screen, the critical temperature, the maximum time of fire protection.