

*А.Я. Шаршанов, к.ф.-м.н., доцент, НУГЗУ,  
Р.В. Пономаренко, к.т.н., зам. нач. каф., НУГЗУ,  
И.А. Поляков, к.психол.н., с.н.с., доцент каф., НУГЗУ*

## **СОЗДАНИЕ УСЛОВИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОСТРАДАВШЕГО ОТ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА**

(представлено д-ром техн. наук Тарасенко А.А.)

Построена математическая модель для расчета защитного действия теплоизоляционной накидки, предназначенной для защиты тела пострадавшего в комплексе со средствами спасения при эвакуации пострадавшего из очага пожара.

**Ключевые слова:** пожар, системы эвакуации, теплоизоляционная накидка, температурный режим, математическая модель, защита пострадавшего.

**Постановка проблемы.** Чрезвычайные ситуации, произошедшие вследствие пожаров, как правило, сопровождаются наличием пострадавших, которые не могут самостоятельно эвакуироваться из очага возгорания. Для эвакуации таких пострадавших пожарно-спасательных подразделения оснащены соответствующими средствами спасения. Главным недостатком имеющихся средств спасения является отсутствие огнезащитного покрытия, которое способно снизить уровень влияния опасных факторов пожара, таких как открытое пламя или тепловой поток, на тело пострадавшего. Целью работы является построение математической модели для расчета защитного действия теплоизоляционной накидки, предназначенной для защиты пострадавшего от влияния высокотемпературных источников энергии.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Большой вклад в развитие теории огнезащищенных волокон и текстильных полотен внесен многими отечественными и зарубежными учеными [1-3]. Однако анализ использования эффективных средств защиты пострадавших в условиях пожара от опасных тепловых факторов, особенно в комбинации с существующими средствами эвакуации отсутствует. В связи с этим, работа посвящена разработке математической модели расчета защитного действия теплоизоляционной накидки, предназначенной для защиты пострадавших в условиях пожара. Накидку планируется использовать в комплексе с средствами эвакуации пострадавших.

**Постановка задачи и ее решение.** В работе предполагается, что накидка, представляющая собой специальную ткань, ведет себя подобно тепловому экрану, то есть является оптически непрозрачным термически тонким телом. Находясь на пути распространения теплового

излучения, накидка экранирует прямой лучистый тепловой поток от пламени в направлении тела пострадавшего (рис. 1).

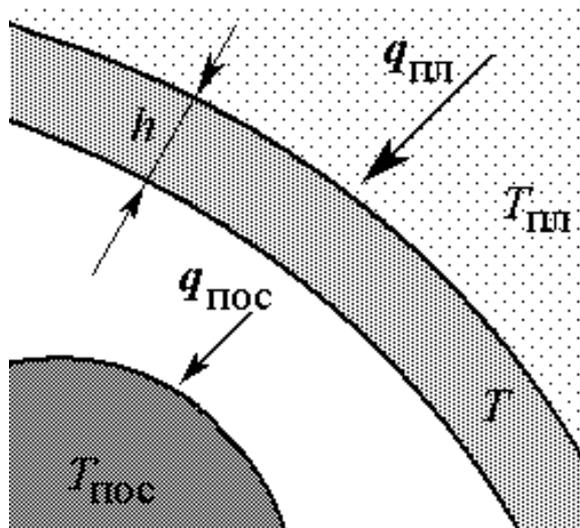


Рис. 1. Схема задачи термической защиты тела пострадавшего от пламени

Под воздействием этого потока, накидка нагревается, становясь источником тепла для пострадавшего. Безопасность сохраняется, если удельный результирующий поток тепла от нагретой накидки на тело пострадавшего  $q_{\text{пос}}$  не превышает соответствующего критического значения  $q_{\text{кр}}$  ( $q_{\text{кр}} \approx 1200 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ ), иначе говоря, критерий безопасности имеет вид

$$q_{\text{пос}} \leq q_{\text{кр}}. \quad (1)$$

Для определения максимально допустимого значения температуры накидки (превращающего выражение (1) в равенство) необходимо определиться с зависимостью удельного потока  $q_{\text{пос}}$  от температур. Вследствие непрозрачности накидки отсутствует прямая зависимость величины  $q_{\text{пос}}$  от температуры пламени  $T_{\text{пл}}$ . Величина  $q_{\text{пос}}$  определяется температурами накидки  $T$  и тела пострадавшего  $T_{\text{пос}}$ . Сразу отметим, что вплоть до наступления неприемлемой ситуации изменение температуры поверхности тела пострадавшего является незначительным. В связи с этим будем считать эту температуру постоянной (приблизительно равной  $T_{\text{пос}} \approx 40+273$ , К).

Тепловой поток от накидки к пострадавшему имеет две составляющие: радиационную и конвекционную, поэтому

$$q_{\text{пос}} = q_{\text{пос.рад}} + q_{\text{пос.кон}}. \quad (2)$$

Вклад радиационной составляющей в поток можно оценить соотношением [4]

$$q_{\text{нос.рад}} = (\varepsilon_{\text{нос}}^{-1} + \varepsilon''^{-1} - 1)^{-1} \cdot \sigma \cdot [T^4 - T_{\text{нос}}^4], \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{\text{нос}}$  и  $\varepsilon''$  – степени черноты (относительные излучательные способности) поверхности тела пострадавшего и внутренней поверхности накидки, соответственно;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$  – 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 [4])

$$q_{\text{нос.кон}} = \varepsilon_{\text{кон}} \cdot \frac{\lambda_{\text{в}}}{l} \cdot (T - T_{\text{нос}}), \quad (4)$$

где  $l$  – характерное расстояние (толщина зазора) между накидкой и телом пострадавшего, м;  $\lambda_{\text{в}}$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ; индекс «в» здесь и далее указывает на то, что соответствующая характеристика воздуха определяется при его средней температуре  $T_{\text{в}} = \frac{T + T_{\text{нос}}}{2}$ .

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

$$\varepsilon_{\text{кон}} = 0.18 \cdot (Gr \cdot Pr)_{\text{в}}^{0.25}, \quad (5)$$

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

$$(Gr \cdot Pr)_{\text{в}} = \frac{g \cdot (T - T_{\text{нос}}) \cdot l^3}{T_{\text{в}} \cdot \nu_{\text{в}}^2} \cdot Pr_{\text{в}},$$

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

Отметим, что приведенные значения множителя и степени в критериальном уравнении (4) подразумевает выполнение ограничения

$$10^3 < (Gr \cdot Pr)_{\text{в}} < 10^{10}. \quad (6)$$

Зависимости удельного потока  $q_{\text{пос}}$  от температуры накладки  $t_{\text{н}}$  при различных значениях степени черноты её внутренней поверхности  $\varepsilon''$  и различных значениях расстояния  $l$  между накладкой и телом пострадавшего представлены на рис. 2. Анализ этих графиков, с учетом того, что радиационная составляющая теплового потока  $q_{\text{пос.рад}}$  (см. формулу (3)) не зависит от  $l$ , а конвективная составляющая  $q_{\text{пос.кон}}$  (см. формулу (4)) не зависит от  $\varepsilon''$ , показывает, что в рассматриваемом интервале температур основной вклад в теплоперенос от накладки к телу потерпевшего при значениях  $\varepsilon'' \sim 1$  вносит лучистый механизм теплопередачи. При  $\varepsilon'' \ll 1$  доминирует конвективный механизм.

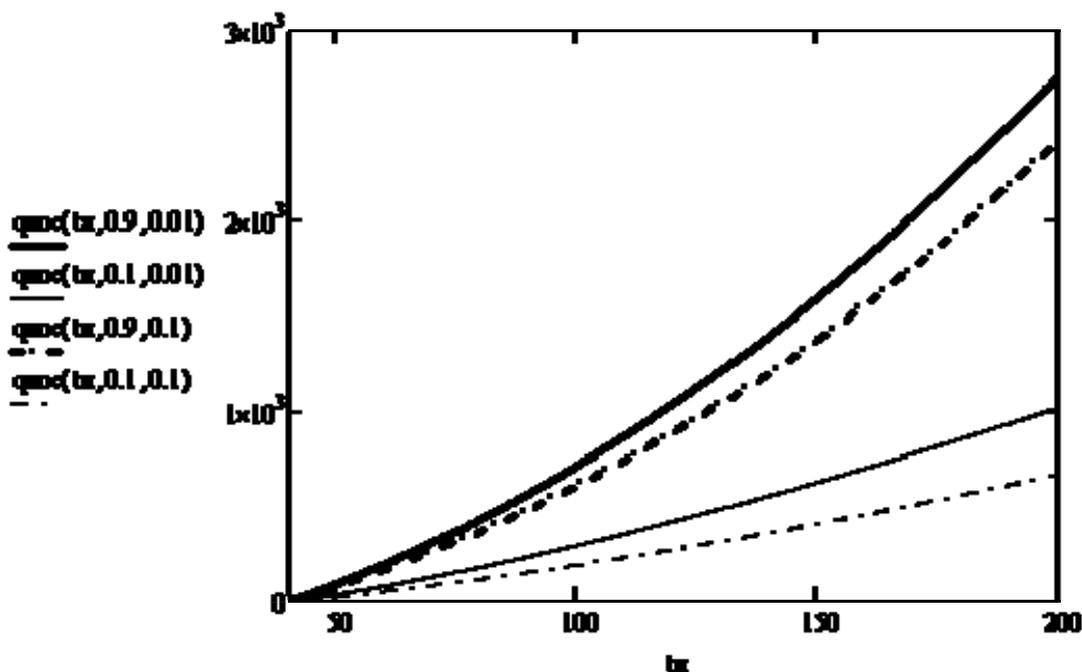


Рис. 2. Графики зависимости полного удельного потока между накладкой и телом пострадавшего  $q_{\text{пос}}(t_{\text{н}}, \varepsilon'', l)$ ,  $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ , от температуры накладки  $t_{\text{н}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , при соответствующих значениях степени черноты накладки  $\varepsilon''$  и расстояния от неё до тела пострадавшего  $l$ , м

Для определения предельной безопасной температуры накладки  $t_{\text{кр}}$  необходимо решить предельный вариант уравнения (1)

$$q_{\text{пос}}(t_{\text{кр}}, \varepsilon'', l) = q_{\text{кр}}. \tag{7}$$

Из уравнения (7) следует, что (при уровне критического удельного потока  $q_{\text{кр}} \approx 1200 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ )  $t_{\text{кр}} = 130^{\circ}\text{C}$  (при  $\varepsilon''=0,9$  и  $l=0,01$  м),  $t_{\text{кр}} = 140^{\circ}\text{C}$  (при  $\varepsilon''=0,9$  и  $l=0,1$  м),  $t_{\text{кр}} = 220^{\circ}\text{C}$  (при  $\varepsilon''=0,1$  и  $l=0,01$  м),  $t_{\text{кр}} = 280^{\circ}\text{C}$  (при  $\varepsilon''=0,1$  и  $l=0,1$  м). Полученные значения величины  $t_{\text{кр}}$  указывают на необходимость учитывать не только теплозащитное действие накладки, но и способность её материала переносить достаточно высокую собственную температуру. При низких допустимых значениях темпе-

ратур материала накидки  $t_{\text{доп}}$  в качестве  $t_{\text{кр}}$  необходимо принимать  $t_{\text{доп}}$ .

Для определения времени защитного действия накидки (времени её нагрева до температуры  $T_{\text{кр}} = t_{\text{кр}} + 273$ , К) рассмотрим уравнение теплового баланса

$$\rho \cdot c_p \cdot h \cdot \frac{dT}{d\tau} = q_{\text{нл}} - q_{\text{нос}}, \quad (8)$$

где  $\rho$ ,  $c_p$  и  $h$  – соответственно, плотность материала,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ , удельная массовая теплоемкость,  $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ , и толщина накидки, м.

Величина  $q_{\text{нл}}$  представляет собой результирующий тепловой поток от пламени к накидке. Его можно оценить соотношением

$$q_{\text{нл}} = \varepsilon_{\text{нл}} \cdot \varepsilon' \cdot \sigma \cdot [T_{\text{нл}}^4 - T^4], \quad (9)$$

где  $\varepsilon_{\text{нл}}$  и  $\varepsilon'$  – степени черноты (относительные излучательные способности) пламени и внешней поверхности накидки, соответственно;  $T_{\text{нл}}$  – абсолютная температура пламени, К.

В связи с тем, что максимально возможная безопасная абсолютная температура накидки  $T_{\text{кр}}$  в разы меньше температуры пламени  $T_{\text{пл}}$ , зависимостью потока  $q_{\text{нл}}$  от температуры накидки можно пренебречь, то есть

$$q_{\text{нл}} = \varepsilon_{\text{нл}} \cdot \varepsilon' \cdot \sigma \cdot T_{\text{нл}}^4, \quad (10)$$

С такой же точностью в уравнении (8) можно пренебречь тепловым потоком от накидки к пострадавшему по сравнению с потоком от пламени к накидке. В результате соотношение (8) упростится и с учетом формулы (10) примет вид

$$\rho \cdot c_p \cdot h \cdot \frac{dT}{d\tau} = \varepsilon_{\text{нл}} \cdot \varepsilon' \cdot \sigma \cdot T_{\text{нл}}^4. \quad (11)$$

Интегрируя уравнение (11), можно найти связь между временем нагревания накидки  $\Delta\tau$  и соответствующим изменением ее температуры  $\Delta T = T_{\text{кр}} - T_0$ , где  $T_0$  – начальная абсолютная температура накидки, К:

$$\Delta\tau = \beta \cdot \Delta T. \quad (12)$$

где

$$\beta = \frac{\rho \cdot c_p \cdot h}{\varepsilon_{\text{нл}} \cdot \varepsilon' \cdot \sigma \cdot T_{\text{нл}}^4}, \text{ с} \cdot \text{К}^{-1}. \quad (13)$$

Соотношения (12), (13) совместно с решением уравнения (7) решают поставленную задачу.

Отметим, что в ходе приведенного анализа предполагалась, что изменение температуры накидки в пределах её толщины пренебрежимо мало. Данная ситуация реализуется при малости критерия Био задачи теплообмена между накидкой и пламенем

$$Bi = \frac{\alpha_{рад} \cdot h}{\lambda} \ll 1,$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала накидки,  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ;  $\alpha_{рад}$  – коэффициент радиационного теплоотдачи от пламени к поверхности накидки,  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ , который в соответствии с зависимостью (9) равен

$$\alpha_{рад} = \left. \frac{\partial q_{нл}}{\partial T} \right|_{T=T_{нл}} = 4 \cdot \varepsilon_{нл} \cdot \varepsilon' \cdot \sigma \cdot T_{нл}^3.$$

Таким образом, приведенное описание корректно при выполнении условия

$$Bi = \frac{4 \cdot \varepsilon_{нл} \cdot \varepsilon' \cdot \sigma \cdot T_{нл}^3 \cdot h}{\lambda} \ll 1. \quad (14)$$

Напомним, что в описании также задействовано дополнительное предположение об оптической непрозрачности накидки, что не позволяет делать накидку слишком тонкой.

Приведем численную оценку. При  $\rho = 1 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ,  $c_p = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ,  $h = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $\varepsilon_{пл} = 0,8$ ,  $\varepsilon' = 0,2$ ,  $T_{пл} = 1000 + 273 \text{ К}$ ,  $\lambda = 0,8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$  из формулы (13) получаем  $\beta = 0,25 \text{ с} \cdot \text{К}^{-1}$ , что при перепаде температур  $\Delta T \approx 100 \text{ К}$  в соответствии с (12) дает безопасное время  $\Delta t = 25 \text{ с}$ . Параметр Био (см. (14)) при этом принимает допустимую величину  $Bi = 0,3$ .

Из соотношений (13) и (14) следует, что из свободных параметров в одинаковом ключе (в сторону увеличения  $\beta$  и уменьшения  $Bi$ ) действует только степень черноты внешней поверхности накидки  $\varepsilon'$ , которую необходимо сделать минимальной. Предполагаемым способом реализации данного свойства является нанесение на внешнюю поверхность накидки соответствующего металлизированного покрытия.

В дальнейших теоретических исследованиях имеет смысл рассмотреть варианты: 1) не тонкой накидки (для которой не выполняется условие (14)); 2) двух- и более слойной накидки, которая действует, как многослойный экран.

**Выводы.** Построена математическая модель для расчета защитно-

го действия однослойной теплоизоляционной накидки, предназначенной для защиты тела пострадавшего от теплового излучения из очага пожара. Рассмотрение показало, что эффективная накидка должна иметь минимальные значения степени черноты внешней поверхности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Батцер Г. Введение в химию высокомолекулярных соединений [Текст] : [переводное издание] / Г. Батцер ; пер. с нем.: Л.С. Гальбрайха, Л.З. Роговиной ; под ред. З.А. Роговина. – Москва: Изд-во иностр. лит., 1960. – 256 с.

2. Вихорева Г.А., Роговина С.З., Акопова Т.А., Зеленецкий С.Н., Гальбрайх Л.С. // Высокомоле. соед. Б. 1996. Т. 38. Л 10. – С. 1781.

3. Federal Register. 14 CFR Part 25 – Airworthiness standards. Transport category air-planes / Federal Aviation Administration. Certification Specifications for Large Aero-planes – CS-25 /ED Decision 2003/2/RM Final 17/10/2003 /In: European Aviation Safety Agency. 2003. – 473p.

4. 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. – 416с.

А.Я. Шаршанов, Р.В. Пономаренко, І.А. Поляков

### **Створення умов для захисту постраждалого від небезпечних факторів пожежі**

Побудована математична модель для розрахунку захисної дії теплоізоляційної накидки, що призначена для захисту тіла постраждалого у комплексі з засобами рятування при евакуації постраждалого з осередку пожежі.

**Ключові слова:** пожежа, системи евакуації, теплоізоляційна накидка, температурний режим, математична модель, захист постраждалого.

A.Ya. Sharshanov, R.V. Ponomarenko, I.A. Poliakov

### **Creation of conditions for the victim protection from the dangerous factors of fire**

A mathematical model for the calculation of the protective effect of heat insulation cover is designed to protect the victim's body in conjunction with the salvation means for the evacuation of the victim from the fire.

**Keywords:** fire, evacuation systems, insulating cover, temperature control, a mathematical model, the victim protection.