

УДК 677.017.56:536.495

А. М. ГУСАРОВ¹, А. А. КУЗНЕЦОВ¹, Н. М. ДМИТРАКОВИЧ², С. М. ДАНИЛОВА-ТРЕТЬЯК³

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В МНОГОСЛОЙНОМ ПАКЕТЕ МАТЕРИАЛОВ БОЕВОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ ПРИ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

¹Витебский государственный технологический университет,

²Научно-исследовательский центр Витебского областного управления МЧС Республики Беларусь,

³Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 12.08.2014)

При проектировании боевой одежды пожарных (БОП) большое значение имеет формирование пакетов материалов, отвечающих нормативным требованиям. Основными критериями для оценки показателей теплозащитных свойств БОП при тепловом воздействии является температура подкостюмного пространства, или температура на внутренней поверхности пакета материалов, которая и определяет время потенциально безопасной эксплуатации защитной одежды при тепловом воздействии.

Исследование теплофизических свойств отдельных материалов, входящих в состав БОП, не позволяет определить уровень защитных свойств всего пакета, установить распределение температурных полей внутри него и соответственно осуществить прогноз времени безопасной эксплуатации защитной одежды при тепловом воздействии различного уровня.

Экспериментальный подбор материалов для формирования пакета БОП, используемый в настоящее время, связан со значительными временными и материальными затратами при проведении испытаний по определению его соответствия нормативным требованиям.

Возникает необходимость в разработке аналитических методов расчета температурного поля в пакете материалов БОП при тепловом воздействии в ходе нормативных испытаний. Однако сложность и громоздкость решений задач теплопереноса, связанные с многослойностью пакета, несимметричностью граничных условий, нестационарностью процесса теплообмена, непостоянством показателей теплофизических свойств материалов, приводят к невозможности практического использования полученных решений. Вследствие этого требуется разработка простого в физическом понимании и приемлемого в практическом использовании аналитического метода, который бы позволял адекватно рассчитать распределение температуры в многослойном пакете материалов БОП при тепловом воздействии и на основании полученных данных проектировать его состав.

Устойчивость пакета материалов БОП к воздействию теплового потока определяют согласно СТБ 1971–2009 «Одежда пожарных боевая. Общие технические условия». При анализе структуры и разработке модели процесса были приняты следующие допущения:

материалы пакета рассматриваются как твердое непрозрачное, однородное тело;

на границе раздела слоев происходит контактный теплообмен – передача теплоты между соприкасающимися твердыми поверхностями. Контакт этих поверхностей идеальный и термическое сопротивление в зоне контакта равно нулю.

Указанные допущения вносят определенную погрешность в количественные результаты расчета, однако качественная картина процесса теплопереноса сохраняется.

Поскольку ширина и длина материалов пакета несоизмеримо велики по сравнению с толщиной, то их можно рассматривать как неограниченные пластины, а процесс определения устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока можно представить как нестационарный процесс теплопроводности в многослойной пластине при воздействии теплового потока с постоянной плотностью.

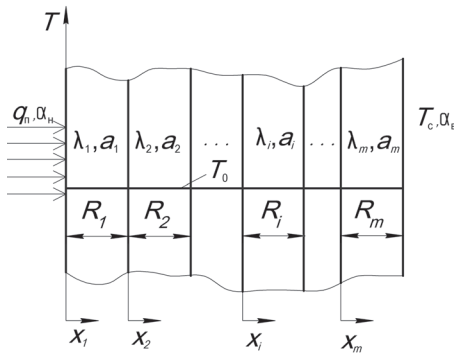


Рис. 1. Схематическое представление объекта исследования

Схематическое представление объекта исследования приведено на рис. 1. На наружную поверхность многослойной пластины воздействует тепловой поток q_n . Ее внутренняя поверхность взаимодействует с окружающей средой T_c . Требуется найти распределение температуры по толщине многослойной пластины в любой момент времени. Для каждого слоя известны численные значения коэффициентов теплопроводности λ_i и удельной теплоемкости c_{pi} , а также его толщина R_i .

Дифференциальное уравнение теплопроводности для многослойной пластины с показателями теплофизических свойств, зависящими от температуры, имеет вид [1, 2]

$$(\rho c_p)_i \frac{\partial T_i(x_i, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i(x_i, \tau)}{\partial x_i} \right) \quad (0 < x_i < R_i; i = 1, \dots, m), \quad (1)$$

где ρ_i – плотность i -го слоя, кг/м³; T_i – температура слоя, К; x_i – пространственная координата в декартовой системе, м; τ – время, с; i – номер слоя; R_i – толщина i -го слоя, м.

На границе сопряжения слоев заданы граничные условия четвертого рода исходя из равенства тепловых потоков и температур

$$\begin{cases} \lambda_{i-1}(T_{i-1}) \frac{\partial T_{i-1}(R_{i-1}, \tau)}{\partial x_{i-1}} = \lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i(0, \tau)}{\partial x_i} \quad (i = 2, \dots, m), \\ T_{i-1}(R_{i-1}, \tau) = T_i(0, \tau) \quad (i = 2, \dots, m), \end{cases} \quad (2)$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя, Вт/(м·К).

Запишем граничные условия на внутренней и наружной поверхностях исследуемой системы. Оценка показателей теплозащитных свойств пакета материалов БОП производится при воздействии на его наружную поверхность теплового излучения с постоянной поверхностной плотностью [3]. Одна часть падающего теплового излучения поглощается материалом верха БОП, а другая часть отражается от его наружной поверхности. При этом вследствие нагрева происходит теплоотдача с наружной поверхности материала верха тепловой энергии в виде конвекции. Таким образом, баланс тепла на наружной поверхности многослойной пластины сведен к следующему граничному условию [4]:

$$-\lambda_1(T_1) \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x_1} = A q_n - \alpha_n T_1(0, \tau), \quad (3)$$

где q_n – плотность потока теплового воздействия, Вт/м²; A – интегральная поглощательная способность наружного слоя; α_n – «наружный» коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

На внутренней поверхности происходит теплообмен с окружающей средой, который определяется граничными условиями третьего рода:

$$-\lambda_m(T_m) \frac{\partial T_m(R_m, \tau)}{\partial x_m} = \alpha_b (T_m(R_m, \tau) - T_c), \quad (4)$$

где α_b – «внутренний» коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), T_c – температура окружающей среды, К.

Начальные условия задаются в виде

$$T_i(x_i, 0) = T_0 \quad (i = 1, \dots, m). \quad (5)$$

Система дифференциальных уравнений теплопроводности (1) вместе с граничными (2)–(4) и начальными (5) условиями является математической моделью реального процесса испытаний пакета материалов БОП на соответствие нормативным требованиям. Решение данной системы

позволит получить картину распределения тепла в многослойном пакете материалов БОП и проанализировать кинетику и динамику процесса теплопереноса в нем.

Так как система уравнений, описывающая процесс теплопереноса в многослойной пластине, является нелинейной (в силу того, что коэффициенты теплопереноса зависят от температуры), то получение единого аналитического решения задачи теплопереноса практически невозможно. Вследствие этого для решения поставленной задачи целесообразно использовать комбинированный метод решения краевых задач теплопереноса. Данный метод базируется на основе сочетания элементов аналитического и численного решений [5–7].

Суть метода состоит в том, что весь процесс теплопередачи разбивается на множество малых временных интервалов, в пределах каждого из которых коэффициенты теплопереноса в слоях и плотности теплового потока через соприкасающиеся поверхности слоев имеют постоянное значение, а также одинаковую температуру на стыках слоев. Следовательно, на стыках слоев наблюдается идеальный тепловой контакт, но граничные условия четвертого рода на стыке слоев заменяются условиями первого и второго рода, что облегчает решение задачи.

Таким образом, общая задача для многослойной пластины разбивается на три автономные задачи:

для наружного слоя ($i = 1$): теплопередача в неограниченной пластине с граничными условиями (3) на левой границе, граничными условиями первого рода на правой границе, неравномерными начальными условиями и постоянными теплофизическими свойствами (рис. 2, а);

для промежуточных слоев ($i = 2, \dots, m-1$): теплопередача в неограниченной пластине с граничными условиями второго рода на левой границе, граничными условиями первого рода на правой границе, неравномерными начальными условиями и постоянными теплофизическими свойствами (рис. 2, б);

для внутреннего слоя ($i = m$): теплопередача в неограниченной пластине с граничными условиями второго рода на левой границе, с условиями (4) на правой границе, неравномерными начальными условиями и постоянными теплофизическими свойствами (рис. 2, в).

На основании теоремы подобия Кирпичева–Гухмана [8, 9] для уменьшения числа аргументов и облегчения решения представленных выше задач уравнения представлялись в безразмерных переменных. Аналитические решения задач для отдельных слоев пакета получены методом интегрального преобразования Лапласа и представлены в виде бесконечных сходящихся рядов [2, 10].

Аналитическое решение задачи для первого слоя имеет следующий вид:

$$\Theta_1(\eta_1, Fo_1) = \Theta_{1,R} \frac{(Bi_1 \eta_1 + 1)}{(Bi_1 + 1)} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Bi_1 \sin[\mu_{n,1}(\eta_1 - 1)]}{(Bi_1 + \cos^2 \mu_{n,1})} \exp(-\mu_{n,1}^2 Fo_1) \times \left(\int_0^1 \Theta_{1,0}(\xi) \sin[\mu_{n,1}(1 - \xi)] d\xi - \frac{\Theta_{1,R}}{\mu_{n,1}} \right), \quad (6)$$

где $\Theta_1(\eta_1, Fo_1) = \left(\frac{Aq_n}{\alpha_n} - T_1(x_1, \tau) \right) / T_1(R_1, 0)$ – безразмерная температура первого слоя пакета;

$\Theta_{1,0} = \left(\frac{Aq_n}{\alpha_n} - T_1(x_1, 0) \right) / T_1(R_1, 0)$ – безразмерная температура первого слоя пакета в начальный

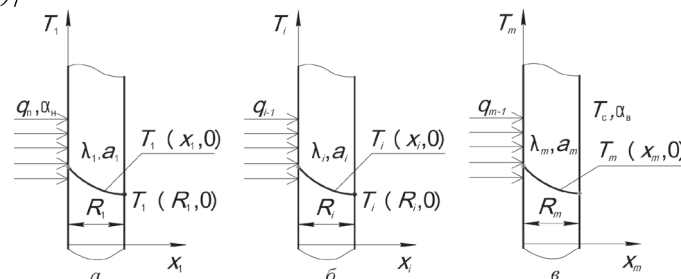


Рис. 2. Расчетные схемы нестационарной теплопроводности для отдельных слоев m -слойной пластины при несимметричных граничных условиях: а – наружный слой ($i = 1$); б – промежуточный слой ($i = 2, \dots, m-1$); в – внутренний слой ($i = m$)

момент времени; $\Theta_{1,R} = \left(\frac{Aq_n}{\alpha_n} - T_1(R_1, 0) \right) / T_1(R_1, 0)$ – безразмерная температура на внутренней поверхности первого слоя пакета в начальный момент времени; $\eta_1 = x_1/R_1$ – безразмерная координата первого слоя пакета; ξ – безразмерная текущая координата первого слоя пакета; $Fo_1 = a_1\tau/R_1^2$ – число Фурье первого слоя пакета; $Bi_1 = \alpha_n R_1/\lambda_1$ – критерий Био первого слоя пакета; $\mu_{n,1}$ – корень характеристического уравнения ($\mu_{n,1} = -Bi_1 \operatorname{tg} \mu_{n,1}$).

Аналитическое решение задачи для i -го слоя имеет следующий вид:

$$\Theta_i(\eta_i, Fo_i) = Ki_i \left[(1 - \eta_i) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cos(\mu_{n,i} \eta_i)}{\mu_{n,i}^2} \exp(-\mu_{n,i}^2 Fo_i) \right] + \sum_{n=1}^{\infty} 2 \cos(\mu_{n,i} \eta_i) \exp(-\mu_{n,i}^2 Fo_i) \int_0^1 \Theta_{i,0}(\xi) \cos(\mu_{n,i} \xi) d\xi, \quad (7)$$

где $\Theta_i(\eta_i, Fo_i) = (T_i(x_i, \tau) - T_i(R_i, 0)) / T_i(R_i, 0)$ – безразмерная температура i -го слоя пакета; $\Theta_{i,0} = (T_i(x_i, 0) - T_i(R_i, 0)) / T_i(R_i, 0)$ – безразмерная температура i -го слоя пакета в начальный момент времени; $\eta_i = x_i/R_i$ – безразмерная координата i -го слоя пакета; ξ – безразмерная текущая координата i -го слоя пакета; $Fo_i = a_i\tau/R_i^2$ – число Фурье i -го слоя пакета; $Ki_i = (q_{i-1} R_i) / (\lambda_i T(R_i, 0))$ – критерий Кирпичева i -го слоя пакета; $\mu_{n,i}$ – корень характеристического уравнения ($\mu_{n,i} = (2n-1) \frac{\pi}{2}$).

Аналитическое решение задачи для m -го слоя имеет следующий вид:

$$\Theta_m(\eta_m, Fo_m) = Ki_m \left[\frac{[Bi_m(1 - \eta_m) + 1]}{Bi_m} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Bi_m \cos(\mu_{n,m} \eta_m)}{\mu_{n,m}^2 (Bi_m + \sin^2 \mu_{n,m})} \exp(-\mu_{n,m}^2 Fo_m) \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Bi_m \cos(\mu_{n,m} \eta_m)}{(Bi_m + \sin^2 \mu_{n,m})} \exp(-\mu_{n,m}^2 Fo_m) \int_0^1 \Theta_{m,0}(\xi) \cos(\mu_{n,m} \xi) d\xi, \quad (8)$$

где $\Theta_m(\eta_m, Fo_m) = (T_m(x_m, \tau) - T_c) / T_c$ – безразмерная температура m -го слоя пакета; $\Theta_{0,m}(\eta_m, 0) = (T_m(x_m, 0) - T_c) / T_c$ – безразмерная температура m -го слоя пакета в начальный момент времени; $\eta_m = x_m/R_m$ – безразмерная координата m -го слоя пакета; ξ – безразмерная текущая координата m -го слоя пакета; $Fo_m = a_m\tau/R_m^2$ – число Фурье m -го слоя пакета; $Bi_m = \alpha_b R_m/\lambda_m$ – критерий Био m -го слоя пакета; $\mu_{n,m} = Bi_m \operatorname{ctg} \mu_{n,m}$ – корень характеристического уравнения.

Полученные аналитические решения (6)–(8) можно использовать для расчета температурного поля однослойных материалов с различными несимметричными граничными условиями. Общее решение для многослойного пакета материалов БОП реализовано с помощью методики численного сопряжения на каждом малом временном интервале аналитических решений (6)–(8) по всем слоям.

Алгоритм комбинированного метода расчета процесса теплопередачи в многослойном пакете материалов БОП реализован в виде программы для ПЭВМ. Последняя позволяет в течение небольшого интервала времени получить распределение температуры по слоям пакета материалов БОП в процессе практически любого теплового воздействия и провести всесторонний анализ процесса теплопередачи.

Адекватность получаемых результатов расчета температурного поля зависит от величины шага по времени и по толщине слоя, а также от достоверности оценки показателей теплофизических свойств слоев пакета. Для оценки адекватности полученных моделей расчета теплопереноса в многослойных пакетах материалов на базе научно-исследовательского центра Витебского областного управления МЧС проведен ряд экспериментальных исследований. В качестве объекта исследования использовался пакет материалов, применяемый при изготовлении БОП в Республике Беларусь и состоящий из материала верха (материал типа «Арселон-С», арт. 09с-368/1 саржевого переплетения), водонепроницаемого слоя (мембранный материал ТУ ВУ 300620644.017–2008), теплоизоляционной подстежки (ватин полушерстяной холстопошивной) и подкладочной ткани

(100 %-ная хлопчатобумажная ткань). Образец материала размером 210×70 мм подвергался воздействию теплового потока плотностью в диапазоне от 1 до 5 кВт/м², действие которого не приводит к возникновению видимых признаков деструкции пакета: разрушение наружной поверхности материала верха и внутренних слоев пакета (оплавление, обугливание, прогар); отслоение полимерного покрытия от тканевой основы водонепроницаемого слоя; воспламенение. Тепловое воздействие продолжалось до наступления стационарного режима. В процессе исследования регистрировались значения температуры на наружной и внутренней поверхностях всех слоев пакета материалов, а также плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов БОП.

Для комбинированного расчета распределения температуры по толщине многослойного пакета материалов при тепловом воздействии в исследуемом диапазоне использовалась разработанная программа со следующими параметрами: шаг по времени $\Delta t = 1$ с; шаг по толщине слоя $\Delta \eta_i = 0,01$ ($i = 1, \dots, m$), количество членов сходящегося ряда аналитического решения $n = 6$.

Коэффициенты теплопроводности и удельной теплоемкости, объемная плотность, толщина материалов пакета БОП, степень черноты поверхности материала верха измерены в Институте тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. Коэффициенты теплоотдачи определены экспериментально в испытательной лаборатории учреждения «Научно-исследовательский центр Витебского областного управления МЧС Республики Беларусь». Численные значения представлены в табл. 1–4.

Т а б л и ц а 1. Объемная плотность и толщина материалов пакета

Слой	Объемная плотность, ρ_i , кг/м ³	Толщина, R_i , м
Материал верха	448	0,0017
Водонепроницаемый слой	753	0,0009
Теплоизоляционная подкладка	306	0,0044
Подкладочная ткань	816	0,0002

Т а б л и ц а 2. Коэффициенты теплопроводности материалов пакета

Температура t , °С	Коэффициент теплопроводности λ_i , Вт/(м·К)			
	материал верха	водонепроницаемый слой	теплоизоляционная подкладка	подкладочная ткань
25	0,104	0,126	0,087	0,059
50	0,103	0,131	0,082	0,060
75	0,106	0,134	0,091	0,060
100	0,111	0,146	0,093	0,064
125	0,121	0,152	0,107	0,067
150	0,125	0,154	0,109	0,068

Т а б л и ц а 3. Коэффициенты удельной теплоемкости материалов пакета

Температура t , °С	Коэффициент удельной теплоемкости c_i , Дж/(К·кг)			
	материал верха	водонепроницаемый слой	теплоизоляционная подкладка	подкладочная ткань
25	1126	655	1243	649
50	1275	1135	1238	983
75	1290	1273	1397	1286
100	1275	1277	1468	1394
125	1328	1203	1630	1474
150	1585	1334	1755	1345

Т а б л и ц а 4. Коэффициенты теплоотдачи при различном уровне теплового воздействия

Плотность теплового потока, падающего на наружную поверхность пакета, q_n , Вт/м ²	Коэффициент теплоотдачи «внутренний», α_v , Вт/(м ² ·К)	Коэффициент теплоотдачи «наружный», α_n , Вт/(м ² ·К)
1000	23,02	1,07
2000	23,68	2,72
3000	24,26	3,78
4000	24,95	4,79
5000	25,54	5,86

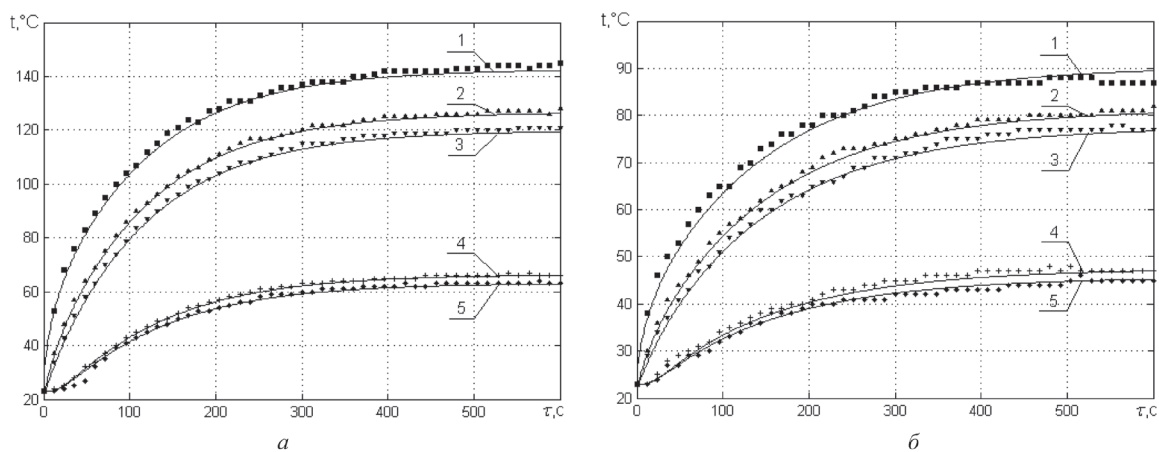


Рис. 3. Зависимость температуры t от времени τ по слоям пакета материалов при плотности теплового воздействия $q_n = 2 \text{ кВт/м}^2$ (а), $q_n = 4 \text{ кВт/м}^2$ (б): 1 – на наружной поверхности пакета; 2 – между материалом верха и водонепроницаемым слоем; 3 – между водонепроницаемым слоем и теплоизоляционной подстежкой; 4 – между теплоизоляционной подстежкой и подкладочной тканью; 5 – на внутренней поверхности пакета

Так как по закону Кирхгофа поглощательная способность серых тел совпадает с их степенью черноты и не зависит от длины волны [4, 11], то поглощательная способность материала верха численно равна степени его черноты: $\epsilon_{\text{пов}} = 0,75$ [12].

В результате проведенных исследований получены экспериментальные и расчетные зависимости изменения температур на внутренней и внешней поверхностях для всех слоев пакета материалов. Некоторые результаты экспериментальных и расчетных исследований процессов нестационарной теплопроводности в многослойном пакете материалов БОП представлены на рис. 3, а, б.

Разность экспериментальной и расчетной температур для всех слоев пакета при различной плотности падающего теплового потока на протяжении всего процесса нагревания составляет не более 3 °С.

По результатам проведенного комплекса исследований возможно проектирование состава многослойного пакета материалов БОП, что приводит к существенному сокращению временных и материальных затрат при проведении нормативных испытаний по определению устойчивости боевой одежды пожарных к воздействию теплового потока.

Литература

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., 1967.
2. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л., 1968.
3. Система стандартов безопасности труда. Одежда пожарных боевая. Общие технические условия: СТБ 1971–2009. Введ. 01.01.2010.
4. Корнюхин И. П. Тепломассообмен в теплотехнике текстильных материалов: Учеб. пособие для вузов. М., 2004.
5. Федосов С. В., Ибрагимов А. М. // Строительные материалы. 2006. № 4. С. 86–87.
6. Ибрагимов А. М. // Строительные материалы. 2006. № 7. С. 72–73.
7. Ибрагимов А. М. // Строительные материалы. 2006. № 8. С. 88–89.
8. Гухман А. А. Введение в теорию подобия: Учеб. пособие для вузов: 2-е изд., доп. и перераб. М., 1973.
9. Кирпичев М. В. Теория подобия. М., 1953.
10. Беляев Н. М. Методы нестационарной теплопроводности. М., 1978.
11. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. 5-е изд. перераб. и доп. М., 1979.
12. Дмитрикович Н. М. Огнестермостойкий материал на тканой основе ракельного способа формирования для защитной одежды пожарных-спасателей: Дис. ... канд. техн. наук: 05.19.02, 05.26.02. Витебск, 2009.

A. M. GUSAROV, A. A. KUZNETSOV, N. M. DMITRAKOVICH, S. M. DANILOVA-TRETIK

RESEARCH OF TEMPERATURE DISTRIBUTION OF A MULTILAYERED PACKAGE OF MATERIALS OF A PROTECTIVE CLOTHES OF FIREMAN DURING THERMAL IMPACT

Summary

A combined method of calculation of a temperature field of a package of materials of a protective clothes of fireman during thermal impact is offered. The method is based on a basis of a combination of elements of the analytical and numerical decisions. Reliability of the developed method is confirmed with pilot studies. The carried-out complex of researches gives a chance to design optimum structure of a package of fighting clothes of firefighters that leads to essential reduction of time and material inputs when carrying out standard tests.