

9. МИ 2083-90 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. Рекомендация.

10. РМГ 43-2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Применение "Руководства по выражению неопределенности измерений".

11. Казаков М.В., Петров И.И., Реутт В.Ч. Средства и способы тушения пламени горючих жидкостей. – М.: Стройиздат, 1977. – 112 с.

12. Шароварников А.Ф. Противопожарные пены. Состав, свойства, применение. – М.: Знак, 2000. – 464 с.

13. Методика визначення тривалості гасіння і критичної інтенсивності подавання робочого розчину піноутворювача для піни середньої кратності при гасінні горючих рідин №2000/2-ПУ-10 УкрНДІПБ МНС України.

14. Методика визначення тривалості гасіння і критичної інтенсивності подавання робочих розчинів плівкоутворювальних піноутворювачів спеціального призначення у разі гасіння горючих рідин піною низької кратності №64 УкрНДІПБ МНС України.

УДК 614.8

А.А. Мичко, д.т.н., професор, М.М. Клим'юк (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ ТОВЩИНУ МАТЕРІАЛУ ДЛЯ СПЕЦВЗУТТЯ ПОЖЕЖНИКІВ

На основі аналізу існуючих підходів до побудови математичних моделей процесу теплопередачі, запропоновано математичну модель процесу передачі тепла через товщину матеріалу з врахуванням одного виду теплообміну, а саме теплопровідності. Введено поняття „критична температура”, яка дає можливість розрахувати коефіцієнт термозахисту для захисних матеріалів спецвзуття пожежників.

Під час ліквідації пожеж та аварій рятувальникам доводиться працювати у екстремальних умовах: під дією високих температур, агресивного середовища, проникаючої радіації, значних фізичних і механічних навантажень тощо.

Це вимагає використання відповідних захисних засобів, зокрема одягу і взуття здатних довготривало протистояти переліченим факторам. Досвід роботи в умовах руйнівних середовищ показує, що неможливо підібрати універсальний захисний матеріал, тому при підборі орієнтуються лише на здатність витримувати дію найсуттєвіших факторів, а саме високих температур та агресивного середовища. Виходячи з цієї умови і орієнтуючись на результати експериментів, можна зробити висновок, що найоптимальніше в даному випадку брати двошаровий матеріал. Але моделювання всіх процесів, які одночасно відбуваються у матеріалі під дією високих температур і агресивного середовища є дуже складною задачею, тому доцільно сформулювати лише модель процесу теплопередачі через товщину даного матеріалу, оскільки фактор температури є переважаючий.

Мета даної роботи – розробити математичну модель теплопередачі через товщину матеріалу спецвзуття пожежного.

Згідно задач, які необхідно вирішити для досягнення мети, в роботі, передбачені дослідження, пов'язані з теплофізичними характеристиками матеріалів, що використовуються при виготовленні верхньої частини спецвзуття.

Відомо, що передача тепла від його джерела до об'єкта, наприклад, проби спеціального матеріалу здійснюється теплопровідністю, конвекцією і тепловим випромінюванням [1]. Слід зазначити, що перенос тепла теплопровідністю може виконуватися при безпосередньому контакті об'єктів, які мають різну температуру. Процес теплопровідності оцінюється коефіцієнтом теплопровідності λ . Вказаний коефіцієнт характеризує здатність матеріалу проводити тепло і визначається за формулою:

$$\lambda = \frac{Qb}{S(T_1 - T_2)} [Bm / m \cdot grad], \quad (1)$$

де Q – потужність теплового потоку, Bm ; b – товщина проби матеріалу, m ; S – площа проби матеріалу, m^2 ; T_1 і T_2 – температура лицьової та виворітної сторони проби матеріалу відповідно, $^{\circ}C$.

Згідно з законом Фур'є, кількість переданої теплоти пропорційна градієнту температури, часу і площі перетину яка перпендикулярна до напрямку розповсюдження теплоти, тобто

$$\vec{q} = -\lambda \cdot grad T. \quad (2)$$

Рівняння (2) є математичним виразом закону Фур'є, який використовується для всіх теоретичних і експериментальних досліджень процесів теплопровідності.

Розподіл загального процесу переносу теплоти на такі окремі явища, як теплопровідність, конвекція і теплове випромінювання проводиться з точки зору методологічних уявлень. В дійсності ці явища протікають одночасно, впливаючи одне на одного. Якщо розглядати, наприклад, конвекцію, то вона супроводжується тепловим випромінюванням, теплопровідність в пористих системах – конвекцією і випромінюванням в порах, а теплове випромінювання – теплопровідністю і конвекцією [2,3]. Таким чином, процес теплопередачі є складним і тому в практичних розрахунках їх розподіл на елементарні явища є не завжди доцільним та можливим. В зв'язку з цим результат сукупної дії окремих елементарних явищ приписують одному з них, яке вважають головним, а вплив інших – другорядними. Тому поки теплота розповсюджується в пористому тілі, то в якості головного фактора тут приймається теплопровідність, а дія конвективного тепла та теплового випромінювання враховується певними значеннями коефіцієнтів. Оскільки при розповсюдженні тепла температура в різних частинах тіла різна, то важливо знати залежність коефіцієнта теплопровідності від температури. Для більшості матеріалів вказана залежність прямолінійна, тобто

$$\lambda = \lambda_0 [1 + k (T - T_0)], \quad (3)$$

де λ_0 – коефіцієнт теплопровідності при температурі T_0 ; k – постійна величина, яка визначається експериментально.

Так, якщо ми маємо однорідний плоский об'єкт товщиною b (рис.1), то коефіцієнт теплопровідності λ буде величиною постійною. При цьому допускається, що температури T_1 і T_2 різні за абсолютною величиною, але постійні в часі. Температура змінюється в напрямку осі x . В даному випадку температурне поле буде одновимірним, а ізотермічні поверхні будуть плоскими і розміщуватимуться перпендикулярно осі x .

Для отримання виразу теплопровідності на відстані x всередині об'єкта виділяємо його елемент товщиною dx , обмежений двома ізотермічними поверхнями і використовуючи закон Фур'є запишемо:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, \text{ звідки } dT = -\frac{q}{\lambda} dx. \quad (4)$$

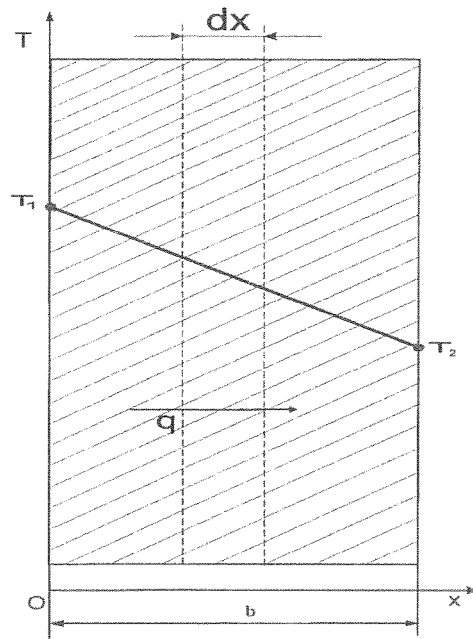


Рис. 1. Схема уявного об'єкта з плоскими поверхнями для отримання розрахункових формул

Приймаємо густину теплового потоку q при стаціонарному тепловому режимі постійною в кожному елементарному перетині. Тому розв'язок рівняння (4) запишемо у вигляді:

$$T = -\frac{q}{\lambda} x + C. \quad (5)$$

Стала інтегрування C визначається з умови на поверхні $x=0$, тобто

$$T=T_1 \text{ при } x=0. \quad (6)$$

З виразу (5) і умови (6) знаходимо, що $C=T_1$.

Якщо відоме значення T при $x=b$ з виразу (5) знаходимо:

$$T_2 = -\frac{q}{\lambda} b + T_1. \quad (7)$$

З рівняння (7) визначимо невідоме значення густини теплового потоку q :

$$q = \frac{\lambda}{b} (T_1 - T_2) = \frac{\lambda}{b} \Delta T. \quad (8)$$

Таким чином, кількість теплоти, що передається через одиницю поверхні матеріалу за одиницю часу, прямо пропорційна коефіцієнту теплопровідності λ і різниці температур ΔT його поверхонь і обернено пропорційна товщині b .

Слід зазначити, що рівняння (8) дозволяє визначити теплове значення теплопровідності матеріалів з плоскими поверхнями і пов'язує між собою 4 величини: q , λ , b і ΔT .

Для розробки математичної моделі вказаного процесу нами були проаналізовані умови праці пожежників та захисні властивості засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) для ніг. Результати аналізу ми показали, що шкіряне взуття, яке використовується в даний час, не відповідає умовам праці, оскільки, згідно зі стандартом [5] воно одночасно повинне захищати від впливу мінеральних кислот (сірчана, соляна, азотна), лугу (гідроксид натрію) і поверхнево активних речовин (ПАР). Тому очевидно, що таким матеріалом може бути штучна або синтетична шкіра на тканий основі, тобто двошарова, яка була б здатна захищати не тільки від указаних агресивних середовищ, але й від високотемпературних факторів, які зазначені в нормативному документі [5].

Вирішення задачі можливе шляхом математичного моделювання, якщо відома товщина кожного шару b_1 і b_2 , коефіцієнти теплопровідності λ_1 і λ_2 , температура T і T_4 , а також значення коефіцієнта тепловіддачі α_1 і α_2 з поверхонь матеріалу (рис. 2).

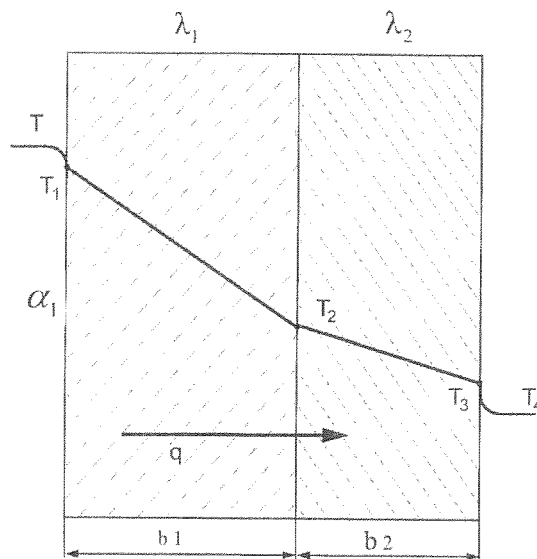


Рис.2 Схема для розрахунку теплопередачі через товщину двошарової проби матеріалу верху спецвзуття.

Згідно з представленою схемою (рис.2), в якій густина теплового потоку постійна, запишемо [1,2,6-8]:

$$\left. \begin{aligned} q &= \alpha_1 (T - T_1); \\ q &= \frac{\lambda_1}{b_1} (T_1 - T_2); \\ q &= \frac{\lambda_2}{b_2} (T_2 - T_3); \\ q &= \alpha_2 (T_3 - T_4). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

З рівнянь (9) визначають температурні напори:

$$\left. \begin{aligned} T - T_1 &= \frac{q}{\alpha_1}; \\ T_1 - T_2 &= q \frac{b_1}{\lambda_1}; \\ T_2 - T_3 &= q \frac{b_2}{\lambda_2}; \\ T_3 - T_4 &= \frac{q}{\alpha_2}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Додавши ліві і праві частини виразів (10), отримаємо:

$$T - T_4 = q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{b_1}{\lambda_1} + \frac{b_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2} \right). \quad (11)$$

Ввівши позначення $\Delta T = T - T_4$, вираз (11) перепишемо у вигляді

$$\Delta T = q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{b_1}{\lambda_1} + \frac{b_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2} \right). \quad (12)$$

З рівності (12) визначасмо густину теплового потоку q

$$q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{b_1}{\lambda_1} + \frac{b_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (13)$$

Значення коефіцієнта теплопередачі для двошарової плоскої пластини з врахуванням (13) буде дорівнювати:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{b_1}{\lambda_1} + \frac{b_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (14)$$

Якщо проаналізувати рівняння (10) і рис.2 то температуру T_1 на лицьовій поверхні матеріалу, температуру T_2 в його внутрішніх шарах і температуру T_3 , яка характеризує зворотню сторону багатошарового об'єкта, можна визначити наступним чином:

$$T_1 = T - q \frac{1}{\alpha_1}, \quad (15)$$

$$T_2 = T_1 - q \frac{b_1}{\lambda_1}, \quad (16)$$

$$T_3 = T_4 + q \frac{1}{\alpha_2}. \quad (17)$$

Отже, щоб розрахувати коефіцієнт теплопередачі K для розглядуваної схеми, необхідно знати товщину b_1 і b_2 , коефіцієнти теплопровідності λ_1 і λ_2 , а також величину коефіцієнтів тепловіддачі α_1 і α_2 при відомих значеннях T і T_4 (рис. 2).

Відомо [9], що термозахисні властивості матеріалів, окрім уже згаданих, характеризуються і тепловим опором R теплопередачі, який є зворотною величиною до K , а саме:

$$R = \frac{1}{K}. \quad (18)$$

Тому з урахуванням формул (18) і (14), значення теплового опору R приведемо до вигляду:

$$R = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{b_1}{\lambda_1} + \frac{b_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (19)$$

На основі розробленої математичної моделі нами були проведені експериментальні дослідження, мета яких полягає в практичній перевірці її можливостей в процесі вибору спеціального матеріалу для верху взуття. Для цього було прийнято, що на лицьову сторону матеріалу діє температура 200°C , а його зворотня сторона повинна при цьому прогріватися тільки до 40°C , тобто згідно зі схемою (рис. 2) і приведеними формулами, $T=200^{\circ}\text{C}$, $T_4=40^{\circ}\text{C}$, а $\Delta T=160^{\circ}\text{C}$.

Експерименти проводились з пробами матеріалу, що різні як за структурно-морфологічними, так і за теплофізичними характеристиками, показники та одиниці вимірювання яких приведені (табл.1). Указаний перелік обґрунтований тим, що взуття пожежного одночасно повинно бути ефективним як в умовах високих температур, так і агресивних середовищ. Слід зазначити також, що, маючи на увазі високотемпературні фактори, допустиме прогрівання виворітної сторони матеріалу для верхньої конструкції взуття до 50°C , вважається обґрунтованим з точки зору біології. Адже, коли шкіра живого організму має безпосередній контакт з будь-яким середовищем (поверхнею, об'ємом), нагрітим вище зазначеної температури, то спостерігається руйнування клітин, опіки і дискомфорт. Тому для збільшення надійності захисту верху спеціального взуття в екстремальних ситуаціях, величина критичної температури матеріалу повинна дорівнювати 40°C .

Аналіз проведених експериментів свідчить про те, що розробка математичної моделі процесу є доцільною, оскільки дає змогу оцінити термозахисні властивості спеціальних матеріалів, які використовуються в теперішній час. Так, проби натуральної шкіри (одношаровий взірець) товщиною $1,8 \times 10^{-3}\text{ м}$ і коефіцієнт теплопровідності $(\lambda)=0,105 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ має температуру на виворітній стороні $91,4^{\circ}\text{C}$, що не відповідає раніше зазначеним умовам надійності.

Матеріали на основі полівінілхлориду (вінілштучшкіра-Т для взуття) при загальній товщині $1,65 \times 10^{-3}\text{ м}$ (полімерне покриття $1 \times 10^{-3}\text{ м}$ і віскозна тканина $0,65 \times 10^{-3}\text{ м}$) теж можна вважати нетермозахисними, оскільки температура на виворітній стороні проби дорівнювала 94°C .

Аналогічні результати були отримані і внаслідок дослідження матеріалів, виготовлених на основі поліуретанового покриття та нетканого полотна (зразок №1), а також на основі покриття СКН-26 і бавовняної тканини (зразок №2). В першому випадку температура $T_3=79^{\circ}\text{C}$, а в другому - $86,6^{\circ}\text{C}$ (табл.1)

Подальші результати моделювання показали, що зразок №3 виготовлений з використанням синтетичного каучуку СКЕПТ і лляної тканини загальною товщиною $4,5 \times 10^{-3}\text{ м}$ може бути використаний для верху спеціального взуття пожежних. Така

рекомендація базується на тому, що температура виворітної сторони дорівнює 54°C , тобто є найменшою в порівнянні з температурами для інших зразків матеріалів (табл. 1).

Окрім цього слід зазначити, що розроблена математична модель процесу при наявності таких даних про матеріал, як коефіцієнт теплопровідності λ ($\text{Вт/м}\cdot\text{град}$), коефіцієнт тепловіддачі поверхневого шару α ($\text{Вт/м}^2\cdot\text{град}$) і товщина b (м), дозволяє оцінити значення густини теплового потоку q (Вт/м^2), коефіцієнта теплопередачі K ($\text{Вт/м}^2\cdot\text{град}$), теплового опору R ($\text{м}^2\cdot\text{град/Вт}$), а найголовніше – температуру T_3 зворотної сторони матеріалу взірця, який в нашому випадку двошаровий (рис. 2).

Якщо температура T_3 задається чи розраховується (а її значення з біологічної точки зору не повинно перевищувати 50°C , про що було сказано раніше), то, на нашу думку, її слід характеризувати таким поняттям, як „критична температура” – $T_{кр}$. Тому, аналізуючи отримані результати (табл. 1), можна стверджувати, що

$$T_3 = T_{кр} = f(T, \lambda, b, \alpha, q). \quad (20)$$

Необхідно зазначити, що T і $T_{кр}$ можуть бути використані для оцінки термозахисних властивостей матеріалів верху спецвзуття, тому що їх значення відомі, тобто за їх допомогою можливо розрахувати коефіцієнт термозахисту, використовуючи співвідношення:

$$K_{тз} = \frac{T - T_{кр}}{T} \cdot 100 [\%], \quad (21)$$

де T – вихідне значення температури, яка впливає на лицьову поверхню матеріалу, $^{\circ}\text{C}$;
 $T_{кр}$ – температура виворітної поверхні проби матеріалу, $^{\circ}\text{C}$.

Розрахунок термозахисних властивостей матеріалів різного асортименту в залежності від їх теплофізичних характеристик

Назва матеріалу, номер зразків	Перелік теплофізичних і геометричних характеристик								
	λ_1 Вт/м·град	λ_2 Вт/м·град	b_1 , м	b_2 , м	α_1 α_2 Вт/м ² ·град	q , Вт/м ²	K , Вт/м ² ·град	R , м ² ·град/Вт	T_3 ($T_{кр}$)
Шкіра натуральна хромована дублена	0,105	-	0,0018	-	65,3	3354,3	21,0	0,0476	91,4
Вінілштуч- шкіра-Г для взуття	0,102	0,038	0,001	0,00065	62,0 45,7	2465,0	15,4	0,0649	94,0
Зразок 1 (ПУ+НП)	0,07	0,043	0,00055	0,0007	83,0 83,0	3306,0	20,7	0,0483	79,0
Зразок 2 (СКН-26 + тканина)	0,085	0,097	0,0005	0,001	88,0 88,0	4103,0	25,6	0,0391	86,6
Зразок 3 на основі СКЕПТ + тканина	0,046	0,044	0,0023	0,0022	96,0 96,0	1344,0	8,4	0,119	54,0

Для прикладу можна співставити $K_{м.з}$ зразків з натуральної шкіри ($T_{кр} = T_3 = 91,4^{\circ}\text{C}$) і зразка №3 ($T_{кр} = T_3 = 54^{\circ}\text{C}$) при вихідному значенні температурного джерела, яке дорівнює $T = 200^{\circ}\text{C}$. Використовуючи вираз (21), отримаємо для першого випадку $K_{мз}=54,3\%$, а для другого $K_{мз}=73\%$, тобто проби зразка №3 більш придатні для виготовлення верхньої частини спеціального взуття, ніж взірці з натуральної шкіри. Що стосується коефіцієнтів

теплопередачі і теплового опору R , то їх використання для розрахунку коефіцієнта термозахисту матеріалів $K_{тз}$ утруднюється відсутністю вихідних значень. Це можна віднести також до таких теплофізичних характеристик матеріалів, як коефіцієнт теплопровідності λ та коефіцієнт тепловіддачі α . Що стосується густини теплового потоку q , то її значення (теоретичне і розрахункове) є важливою характеристикою проб матеріалів під час дослідження їх стійкості до теплового випромінювання, числове значення теплового потоку якого відоме, а також при визначенні коефіцієнта теплопередачі K .

Таким чином, представлена математична модель, розроблена на основі класичних законів теплопровідності, і дозволяє моделювати теплові процеси через товщину матеріалу спецвзуття пожежників і дає змогу проводити розрахунки термозахисних властивостей матеріалів різної структури і асортименту. Окрім цього, використовуючи вказану модель, можна теоретично передбачати рівень впливу високотемпературного джерела залежно від теплофізичних характеристик проб матеріалів, що необхідно для науково обґрунтованого їх вибору при розробці спеціального взуття пожежників.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Краткий курс теплопередачи. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 208 с.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 343 с.
4. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1975. – 496 с.
5. Взуття пожежника захисне. Загальні технічні вимоги та методи випробувань : ДСТУ 4446 – 2005 – [Чинний від 2006 - -]. – К., 2006. - С. (Держспоживстандарт).
6. Юзевич В.М., Болібрux Б.В., Гук О.В. Моделирование теплових процесів у адгезійних покриттях // Температура 2003 : Тези доповідей 8 Міжнародної конференції (17 – 19 вересня 2003 р.). – Київ., 2003. – С.137.
7. Асеева Р.М., Заиков Г.Е. Горение полимерных материалов. – М.: Наука, 1981. – 280 с.
8. Болібрux Б.В. Розробка та вдосконалення методів оцінки спеціальних матеріалів для захисного одягу пожежників : Дис. канд. техн. наук : 21.06.02. – К., 2004. – 175 с.
9. Бузов Б.А., Модестова Т.А., Алыменкова Н.Д. Материаловедение швейного производства / 4 – е изд. Перераб. и доп. – М.: Легпромбизнесиздат, 1986. – 424 с.
10. Болібрux Б.В., Мичко А.А. Моделирование теплових процесів у елементах одягу пожежників // Пожежна безпека. – 2004. № 4. – С. 12 – 20.