

Б.В. Штайн, Б.В. Болібрux, канд. техн. наук, доцент, Р.Я. Лозинський, канд. техн. наук, доцент (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

## УЗАГАЛЬНЕНІ КОНТАКТНІ СПІВВІДНОШЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ, ЩО ОПИСУЄ ПРОЦЕСИ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ В ПАКЕТІ ТЕПЛОЗАХИСНОГО ОДЯГУ ПОЖЕЖНИКІВ

У роботі здійснено постановку задач теплопровідності в окремих елементах пакета спеціального матеріалу теплозахисного одягу пожежника загального призначення з визначення теплозахисних показників якості та рівня захисту при дії екстремальних температур і густини теплового потоку до  $7 \text{ кВт/м}^2$ . В постановці враховувалися теплофізичні характеристики кожного спеціального матеріалу пакета. Принцип полягає у визначенні досягнення граничної температури  $50^\circ\text{C}$  на виворотній стороні чотиришарового пакета спеціального матеріалу теплозахисного одягу пожежника з урахуванням повітропроникності та пористості матеріалу.

**Ключові слова:** конвективне тепло, теплозахисний одяг пожежника, теплофізичні характеристики комплексу пакета.

Під час гасіння пожеж та проведенні інших невідкладних робіт, теплозахисний одяг пожежника (ТЗОП) зазнає впливу різних високотемпературних факторів, а саме: ІЧ випромінювання, дії контактного та конвективного тепла. Визначення рівня захисту під час їхньої роботи та оцінка ступеня безпеки є дуже актуальним питанням і потребують комплексного та глибокого вивчення.

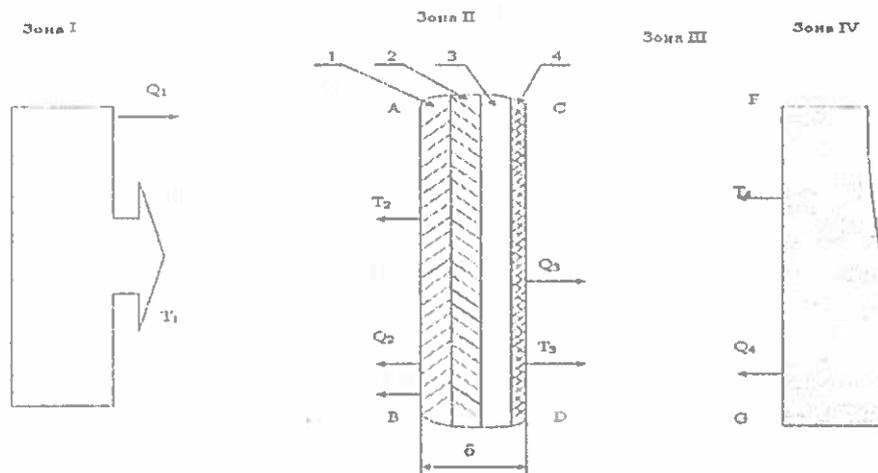


Рис. 1. Схема, на якій подано пакет теплозахисного одягу (зона II), товщиною  $\delta$ , і повітряний прошарок (зона III) між пакетом і тілом пожежника:

(Зона I – моделювання тепла (ІЧ - випромінювання, конвекційне тепло); Зона II – пакет теплозахисного одягу товщиною  $\delta$ ; Зона III – повітряний прошарок підодягового простору; Зона IV – тіло людини; А-В зовнішня поверхня пакета спецодягу; С-Д внутрішня поверхня пакета; F-G поверхня тіла людини; В-Д товщина пакета; Q – щільність теплового потоку з поверхні теплового блоку, з зовнішньої поверхні пакета, з внутрішньої поверхні пакета, з поверхні тіла,  $\text{Вт/м}^2$ ;  $T_1, T_2, T_3, T_4$  – температура поверхні теплового блоку, зовнішньої поверхні пакета, внутрішньої поверхні пакета, поверхні тіла)

Існуючі та діючі методики та прилади оцінки цих властивостей мають неточності, які можуть впливати на результати випробувань і, як наслідок, давати похибку в отриманих результатах вимірювань [1].

На рис. 1 подана схема проходження теплоти через пакет захисного одягу пожежника. Пакет містить 4 шари, тобто на один шар більше порівняно з аналогічною конструкцією в праці [1].

Вважаємо, що в умовах пожежі початкове теплове навантаження потужністю  $q_{sc} = 7$  кВт/м<sup>2</sup> сприймає верхній металізований (3) шар пакета (зона II) матеріалів спецодягу. Металізація практично не знижує температуру, що діє на пакет спецодягу, але відбиває значну кількість теплового потоку. Другий шар (2) забезпечує зниження температури. Третій шар (3) пакета використовують, в основному, як підкладку і він несе порівняно незначне теплове навантаження. Четвертий шар (4) демпфує залишкове теплове навантаження.

Вважаємо, що вісь  $x$  перпендикулярна до поверхонь пакета і розглядаємо одновимірну задачу теплопровідності, яка характеризує проходження теплоти через 4 шари загальною товщиною  $\delta$ . Особливістю задачі буде те, що проходження тепла через пакет супроводжується проходженням речовини (маси частинок газу із зовнішнього середовища). Тому середовище повітря (проміжок) між пакетом і тілом людини виступає як пастка для атомів деяких газів. Загальновідомо, що з тіла людини виділяється піт, випари якого створюють додатковий тиск який ускладнює проникнення газу. Таким чином тепло, акумульоване тілом ( $\Delta T = 34^\circ\text{C}$ ) та зовнішнім середовищем, накопичується у повітряному прошарку міжкостюмного простору. Це означає, що частинки речовини (атоми, молекули) в цей проміжок із зовнішнього середовища через пакет входять, але не виходять з нього. Ця ситуація призводить до зростання тиску в повітряному проміжку між тілом людини і комбінезоном. Проходження молекул речовини (газу) через пакет можна описати дифузійними співвідношеннями.

Дію високотемпературного зовнішнього середовища на шари спецодягу (пакета) охарактеризуємо чотирма стадіями:

- поглинання теплоти зовнішнім приповерхневим чи міжфазовим шаром і наступна передача енергії всередину матеріалу кожного з чотирьох шарів;
- нагрівання матеріалу кожного з чотирьох шарів без руйнування;
- режим стаціонарної теплопровідності або зміна агрегатного стану (плавлення, випаровування, сублимація або термодеструкція і кожен з цих процесів може призводити до появи повного чи часткового руйнування шару);
- охолодження (релаксація) матеріалу після зняття зовнішнього теплового (високотемпературного) навантаження.

Кожна із стадій має свої фізичні особливості, характерні тільки для неї. Перша стадія характеризується істотною залежністю температурного поля від початкових та граничних умов, тобто від інтенсивності зовнішнього теплового потоку і від фізичних характеристик матеріалу шарів пакета, які входять в крайові та граничні умови.

Друга стадія має режим упорядкованого нагрівання і, зокрема, може характеризуватися регулярним режимом, для якого характерна монотонна залежність зміни температури від часу. На цій стадії (як встановлено експериментально) температура  $T$  в будь-якій точці шару змінюється за законом [2]:

$$T = C_x \cdot \exp(-\theta_x t) + T_c \text{ (охолодження)}, \quad (1)$$

де  $T_c$  – температура навколишнього середовища, К;

$t$  – час, с;

$\theta_x$  – додатне число, яке не є залежним від координати та часу (у праці [2]  $\theta_x$  називають темпом нагрівання, але в даній праці  $\frac{\partial T}{\partial t} = -C_x \theta_x$ , тому темпом охолодження вважаємо

вираз  $-C_x \theta_x$ );

$C_x$  – константа, яку можна обчислити з використанням початкових умов.

Аналогічно співвідношенню (1), запишемо для нагрівання:

$$T = C_n \cdot \exp(\theta_n t) + T_c \text{ (нагрівання)}, \quad (2)$$

Тут  $C_n$  – константа, яку можна знайти з використанням початкових умов. Оскільки  $\frac{\partial T}{\partial t} = C_n \theta_n$ , то темпом нагрівання вважаємо вираз  $C_n \theta_n$ .

Третьою стадією, у випадку цілісності матеріалу пакета, є режим стаціонарної теплопровідності, а у випадку його руйнування в кінці другої стадії може проходити зміна агрегатного стану матеріалу [1].

Останню (четверту) стадію характеризує нерівномірною зміною температури шару за законом, який аналогічний до відповідного ходу подій в другій стадії.

Всі типи теплових дій на матеріали спецодягу (шари пакета) можна поділити на такі [1]:

– дії, при яких матеріали шарів пакета без руйнування послідовно проходять всі чотири стадії (одноциклова дія);

– дії, при яких відбувається часткове або повне руйнування матеріалів (напівциклова дія);

– багаторазові дії, які не приводять до руйнування матеріалу (багатоциклова дія). В результаті теплових дій температурне поле пакета і середовища між тілом людини і пакетом може нелінійно змінюватись в часі.

Математичну модель фізичних процесів подамо у вигляді двох диференціальних одновимірних рівнянь теплопровідності і дифузії з початковими (при  $\tau=0$ ,  $x=x_1$ ,  $x=x_2$ ,  $x=x_3$ ,  $x=x_4$ ,  $x=x_5$ ) та граничними умовами (при досягненні  $x_4=50^\circ\text{C}$ ) в декартовій системі координат [2,3] де :

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial m_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial m_c}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (4)$$

де  $c$  – масова питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·К);  $t$  – час, с;

$\rho$  – об'ємна густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $T$  – температура матеріалу, К;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

$a_T = \lambda/(c\rho)$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;

$m_c$  – масова концентрація (маса компоненти в розрахунку на одиницю маси суміші, безрозмірна величина);

$D$  – коефіцієнт дифузії, м<sup>2</sup>/с;

$D_T$  – коефіцієнт дифузії, який характеризує зміну дифузійного потоку між дифузиею та теплопровідністю.

При формулюванні співвідношення (3) вважаємо, що потік дифундуючої речовини на перерозподіл поля температур в пакеті практично не впливає [1,3].

Процеси мають нелінійний характер із змінними значеннями коефіцієнта теплопровідності, які залежать від температури ( $\lambda = \lambda(T)$ ). Обчислювальний експеримент і експериментальні дослідження дозволяють стверджувати [8], що для аналізу термодифузійного процесу в пакеті достатньо обмежитись нелінійним виразом параметра  $\lambda$  тільки в першій області (1) ( $0 \leq x \leq x_1$ ) і записати:

$$\lambda_1 = \lambda_{10}(1 + \beta_T T). \quad (5)$$

Величини  $\lambda_{10}$ ,  $\beta_T$  вважаємо постійними характеристиками матеріалу першого (зовнішнього) шару ( $0 \leq x \leq x_1$ ), незалежними від часу і координат.

Прийнятним для розв'язання цієї задачі є числовий метод кінцевих різниць, який на першому етапі застосуємо до області  $\Omega_x \times \Omega_t$  (поверхні)

( $0 \leq x \leq \delta_s$ ;  $0 \leq t \leq \Theta_z$ ) [4,5]. Контур по часу – об'єднання прямих  $t = 0$  і  $t = \Theta_z$ .

Введемо в області  $\Omega_x \times \Omega_t$  прямокутну рівномірну сітку з кроками  $h$  і  $\tau$ :

$$x_k = kh; k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, h > 0; t_i = i\tau, i = 0, 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

Позначимо  $T(x_k, t_i)$  – точне значення температури  $T(x, t)$  у вузлі  $(x_k, t_i)$ ,  $T_k^i$  – відповідне наближене значення функції  $T(x_k, t_i)$ . Вибираємо явну схему і двошаровий шаблон (рис. 2) [4,5].

Для функції  $T_k^i$  уведемо операції, які є аналогом диференціювання та інтегрування. Аналогом перших похідних по часу  $t$  і координаті  $x$  є різниці:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x_k, t_i)}{\partial t} &= \frac{T(x_k, t_{i+1}) - T(x_k, t_i)}{\tau} - r_{ki}(\tau), \quad r_{ki}(\tau) = \frac{\tau}{2} \frac{\partial^2 T(x_k, t_i^{(a)})}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial T(x_k, t_i)}{\partial x} &= \frac{T(x_{k+1}, t_i) - T(x_k, t_i)}{h} - r_{ki}(h), \quad r_{ki}(h) = \frac{h}{2} \frac{\partial^2 T(x_k^{(a)}, t_i)}{\partial x^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

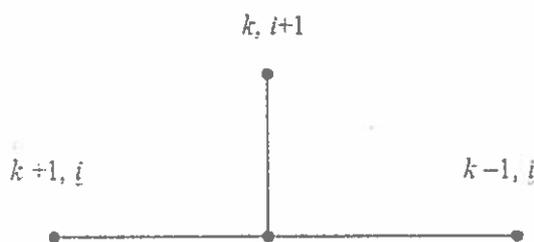


Рис. 2. Двошаровий шаблон для обчислень значень  $T_k^i$

У співвідношеннях (7)  $t_k^{(a)}$ ,  $x_k^{(a)}$  – середні точки на відповідних відрізках;  $t_k \leq t_k^{(a)} \leq t_{k+1}$ ,  $x_k \leq x_k^{(a)} \leq x_{k+1}$ ;  $r_{ki}(\tau)$ ,  $r_{ki}(h)$  – вирази, з допомогою яких оцінюємо похибки апроксимації.

Для зменшення громіздкості виразів у (7) введемо позначення  $T_k^i = T(x_k, t_i)$ ,  $T(x_k, t_{i+1}) - T(x_k, t_i) = T_k^{i+1} - T_k^i$ ,  $T(x_{k+1}, t_i) - T(x_k, t_i) = T_{k+1}^i - T_k^i$ .

Похідні другого порядку з урахуванням залежності коефіцієнта теплопровідності (5) від температури подамо у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T(x_k, t_i)}{\partial x} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T_k^i}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{10} (1 + \beta_T \cdot T_k^i) \frac{\partial T_k^i}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T_k^i}{\partial x} \right) &= \lambda_{10} \frac{\partial^2 T_k^i}{\partial x^2} + \lambda_{10} \beta_T \frac{\partial}{\partial x} \left( T_k^i \frac{\partial T_k^i}{\partial x} \right) \\ \lambda_{10} \beta_T \frac{\partial}{\partial x} \left( T_k^i \frac{\partial T_k^i}{\partial x} \right) &= \lambda_{10} \beta_T \left( \frac{\partial T_k^i}{\partial x} \right)^2 + \lambda_{10} \beta_T T_k^i \frac{\partial^2 T_k^i}{\partial x^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Запишемо різницевий аналог другої похідної від температури по координаті  $x$  [4,5]:

$$\frac{\partial^2 T_k^i}{\partial x^2} = \frac{T(x_{k+1}, t_i) - 2T(x_k, t_i) + T(x_{k-1}, t_i)}{h^2} - r_{ki}^*(h), \quad r_{ki}^*(h) = \frac{h^2}{12} \frac{\partial^4 T(x_k^{(b)}, t_i)}{\partial x^4}, \quad (9)$$

Підставляючи (6)–(9) в рівняння теплопровідності (3), отримуємо вираз (з нелінійними складовими типу  $\left( \frac{\partial T_k^i}{\partial x} \right)^2$ ,  $T_k^i \frac{\partial^2 T_k^i}{\partial x^2}$ ), з допомогою якого знаходимо значення температури у

першій області пакета –  $0 \leq x \leq x_1$ . Аналогічно для масопереносу (4) з урахуванням, що коефіцієнти дифузії  $D$  і  $D_T$  вважаємо постійними величинами.

В інших областях пакета та для проміжку між пакетом і тілом пожежника застосовуємо методика знаходження розв'язку задач тепломасопереносу аналогічно з використанням співвідношень (3), (4), (6)–(9) за умови, що фізичні характеристики матеріалів шарів пакета  $\lambda$ ,  $D$  і  $D_T$  – постійні величини. Тобто задачу дифузії (4) вважаємо лінійною і розв'язуємо для всіх областей пакета за єдиною методикою обчислювального експерименту.

Для рівняння теплопровідності на зовнішній стороні пакета використано граничну умову другого роду (при  $x=0$ , рис. 3).

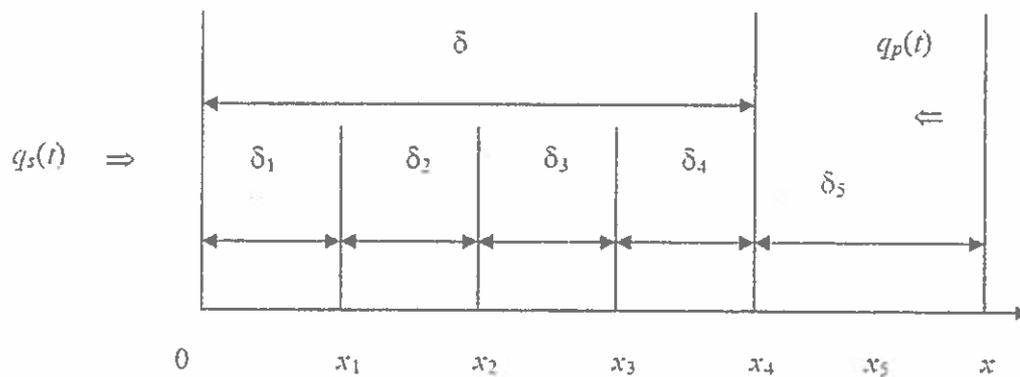


Рис. 3. Схема шарів пакета теплозахисного одягу (зона II), товщиною  $\delta$

Ця умова полягає в заданні густини теплового потоку для кожної точки зовнішньої поверхні тіла (пакета) як функції часу  $t$ , тобто [2]:

$$q_s(t) = f(t), \quad (x=0). \quad (10)$$

Умова 2-го роду (10) означає, що криволінійній залежності температури може відповідати будь-яка ордината на зовнішній поверхні пакета (при  $x=0$ ), але обов'язково заданий градієнт параметра  $T$  ( $q_s(t) \sim gradT$ ). Простий (частковий) варіант граничної умови другого роду полягає в постійності (незалежності від часу) густини теплового потоку [2]:

$$q_s(t) = q_{sc} = \text{const.} \quad (11)$$

Введемо позначення температур  $T_i$  та концентрацій дифундуючої речовини  $m_{ci}$  ( $i=1,2,3,4,5$ ) в областях пакета ( $0 \leq x \leq x_4$ ,  $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4$ ) і поза ним:

$$\begin{aligned} &\text{Область (1): } 0 \leq x \leq x_1, \delta_1 = x_1 - 0, T_{10} \leq T_1 \leq T_{11}, T_{10} - \text{при } x = 0, T_{11} - \text{при } x = x_1; \\ &\text{область (2): } x_1 \leq x \leq x_2, \delta_2 = x_2 - x_1, T_{21} \leq T_2 \leq T_{22}, T_{21} = T_{11} - \text{при } x = x_1; \\ &\text{область (3): } x_2 \leq x \leq x_3, \delta_3 = x_3 - x_2, T_{32} \leq T_3 \leq T_{33}, T_{32} = T_{22} - \text{при } x = x_2; \\ &\text{область (4): } x_3 \leq x \leq x_4, \delta_4 = x_4 - x_3, T_{43} \leq T_4 \leq T_{44}, T_{43} = T_{33} - \text{при } x = x_3; \\ &\text{область (5): } x_4 \leq x \leq x_5, \delta_5 = x_5 - x_4, T_{45} = T_5 = T_5(t) - \text{при } x > x_4; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} &\text{область (1): } 0 \leq x \leq x_1, m_{c10} \leq m_{c1} \leq m_{c11}; \\ &\text{область (2): } x_1 \leq x \leq x_2, m_{c21} \leq m_{c2} \leq m_{c22}, m_{c21} = m_{c11} \text{ при } x = x_1; \\ &\text{область (3): } x_2 \leq x \leq x_3, m_{c32} \leq m_{c3} \leq m_{c33}, m_{c32} = m_{c22} \text{ при } x = x_2; \\ &\text{область (4): } x_3 \leq x \leq x_4, m_{c43} \leq m_{c4} \leq m_{c44}, m_{c43} = m_{c33} - \text{при } x = x_3; \\ &\text{область (5): } x_4 \leq x \leq x_5, m_{c45} = m_{c5} = m_{c5}(t) - \text{при } x > x_4. \end{aligned} \quad (13)$$

У співвідношеннях (12), (13)  $T_i(x,t)$ ,  $m_{ci}(x,t)$  – температури та концентрації дифундуючих речовин (газів), які відповідають областям з індексами  $i = 1, 2, \dots, 5$  відповідно,  $T_{ij}(t)$ ,  $m_{cij}(t)$  – граничні температури та концентрації газів, в яких перший індекс відповідає номеру області, другий – індексу границі ( $x_i$ ); віддалі  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$  – в загальному випадку не рівні між собою ( $\delta_1 \neq \delta_2 \neq \delta_3 \neq \delta_4$ ).

Область (5) ( $x_4 \leq x \leq x_5$ ) чітко не визначена ( $\delta_5$  – змінна величина), оскільки це область (повітряний прошарок з білизною чи без неї) між тілом людини і захисним одягом (пакетом).

На зовнішніх ( $x=0, x=x_4$ ) та внутрішніх границях пакета (при  $x_1, x_2, x_3$ ) запишемо граничні та контактні умови – рівності температур  $T_{ij} = T_j$  (2.12), концентрацій дифундуючих речовин  $m_{cij} = m_{cj}$  (13) і потоків, які, згідно із співвідношеннями у працях [3,4,8,], подамо у вигляді:

$$q_s(t) = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}, \quad \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x}, \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} = q_{s5}(t),$$

де  $i=1,2,3$  а  $x=x_i$  (14)

$$q_m(t) = D_1 \frac{\partial m_{c1}}{\partial x}, \quad D_i \frac{\partial m_{ci}}{\partial x} = D_{i+1} \frac{\partial m_{ci+1}}{\partial x}, \quad D_4 \frac{\partial m_{c4}}{\partial x} = q_m(t),$$

де  $i=1,2,3$  а  $x=x_i$  (15)

Моделюємо геометричні розміри пожежника у вигляді, зручному для розрахунків (рис. 4). Для цього використовуємо середні статистичні дані, отримані експертним методом. Принципи експертного методу описано у праці [6]. Нехай  $L_a = A_1A_2 = 40$  см – ширина пожежника спереду (моделюємо фронтальною площиною);  $L_b = 102$  см – середній периметр тіла пожежника в районі грудей і живота (без врахування рук);  $L_c = 112$  см – периметр одягу пожежника (комбінезона) в районі грудей і живота, якщо середня товщина проміжку між тілом і одягом (пакетом) становить  $\Delta R = 1,5$  см;  $q_{pc} = \text{const} = 260$  Вт/м<sup>2</sup> – потік випромінювання тіла пожежника;  $q_s(t) \Rightarrow q_{sc} = 7$  кВт/м<sup>2</sup> – приклад інтенсивності (за порядком величини) випромінювання від розжареного об'єкта в стані пожежі;  $L_s = A_1B = A_2B = (L_c - L_a)/2 = 36$  см.

На рис.4 подано схематичне зображення зовнішніх контурів пожежника в районі грудей і живота (в перерізі, вигляд зверху,  $L_a = A_1A_2 = 40$  см).

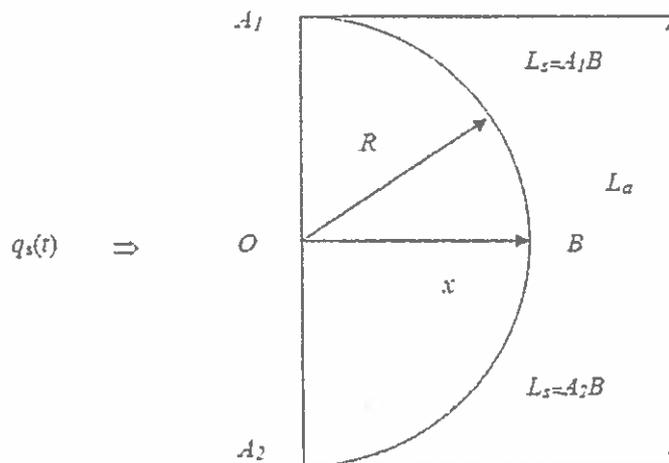


Рис. 4. Схематичне зображення зовнішніх контурів пожежника в районі грудей і живота (в перерізі, вигляд зверху,  $L_a = A_1A_2 = 40$  см)

Нехай тепловий потік  $q_s(t)$  із зовнішнього середовища проникає на першому етапі через чотиришаровий пакет в прошарок, ширина якого  $\delta_5$ . На другому етапі вважаємо, що в цьому

проміжку ( $\delta_5$ ) між тілом людини і пакетом створюється певне нагріте середовище (з тиском, більшим від атмосферного через молекули газів, які змогли проникнути крізь пакет), на температуру якого впливає сумарний потік  $q_{ss}(t) = q_{s5}(t) + q_{pc}$ .

Вважаємо (з урахуванням постановки задачі), що в повітряному прошарку (області ( $\delta_5$ )) формується зона підвищеного тиску  $p_{ss}(t)$ , викликана дифузійними процесами частинок газу, які просочуються із зовнішнього розжареного середовища і характеризуються концентрацією  $m_{c5}(t)$  з урахуванням теплового потоку з тіла людини, вихори які створюють вологу і тиск у повітряному прошарку міжкостюмного простору.

На другому етапі потік гарячого повітря із проміжку  $A_1A_2$  (області  $\delta_5$ ) поширюється із крайових точок  $A_1$  і  $A_2$  точку  $B$  на відстань  $L_5 = A_1B = A_2B = 36$  см (рис.5). Температура, а також тиск повітря в проміжку ( $\delta_5$ ) в точці  $B$  (в області спини пожежника) в початкові моменти часу значно менші, ніж в точках  $A_1$  і  $A_2$ . Стрілкою  $\Rightarrow$  показано напрям поширення теплового та дифузійного потоків від  $A_1$  до  $B$ . Аналогічну відстань проходять потоки тепла та частинок газів з  $A_2$  до  $B$ . Поширення тепла та частинок газів по дузі  $A_1B$  замінюємо (моделюємо) прямолінійними потоками по одній осі ( $x$ ) як показано на (рис.5), оскільки товщина проміжку  $\Delta R$  (рис.5) значно менша від радіуса  $R$  заокруглення (рис.4). Наближена оцінка для захисного одягу пожежника середніх розмірів дає такі значення:  $\delta_5 = 2$  см;  $\Delta R = 1,5$  см;  $R = 46$  см;  $\Delta R/R = 0,0326$ .

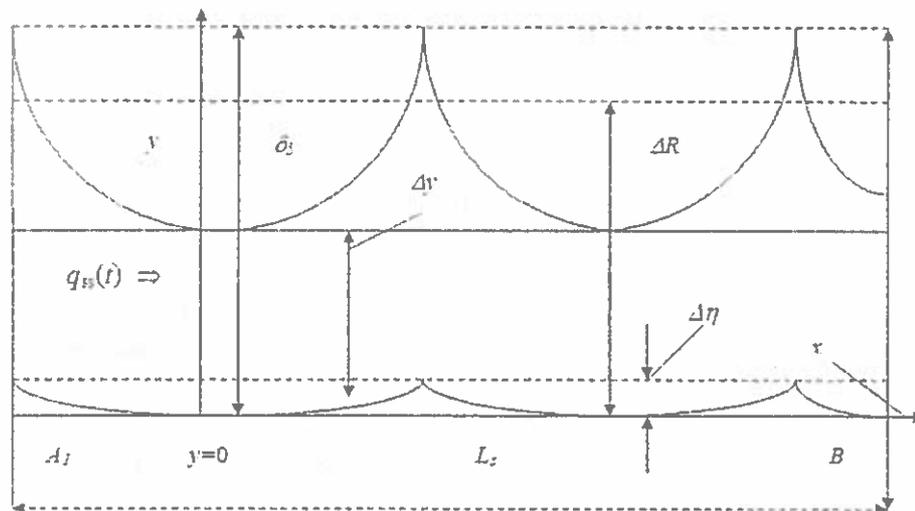


Рис. 5. Схематичне зображення нерівностей між точками  $A_1$  і  $B$

Оскільки одяг не прилягає щільно до тіла пожежника, то на рис. 5 зображено схему (модель) проміжку  $\delta_5$  в координатах  $x, y : 0 \leq x \leq L_5, 0 \leq y \leq \delta_5$ .

Поширення тепла та частинок газів по дузі  $A_1B$  в газовому середовищі описуємо лінійними співвідношеннями (аналогічними (3), (4)):

$$c_5 \rho_5 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_5 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial m_{c5}}{\partial t} = D_5 \frac{\partial^2 m_{c5}}{\partial x^2} + D_{T5} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (17)$$

Характеристики  $c_5, \rho_5, \lambda_5, D_5, D_{T5}$  у рівняннях (16), (17) для повітряного проміжку " $\delta_5$ " вважаємо постійними; впливом білизни (товщина якої  $\Delta y$ ) на поширення теплоти між точками  $A_1$  і  $B$  нехтуємо тому, що білизна не призначена для захисту пожежника від тепла і її товщина не впливає на теплопровідність пакета матеріалів [8].

**Висновки.** Проведено моделювання процесів поширення теплоти та дифузійних частинок у системі „пакет одягу” – „прошарок між пакетом і тілом пожежника” з

урахуванням його теплоти. З цією метою використано нелінійні балансові співвідношення термодифузії (підхід нерівноважної термодинаміки).

Для аналізу процесу поширення теплоти в системі „спецодяг – пожежник” використано граничну умову другого роду, яка полягає в заданні густини теплового потоку для кожної точки зовнішньої поверхні тіла (пакета) як функції часу  $t$ .

Моделювання поширення теплоти в системі „спецодяг – пожежник” розділено на два етапи: на першому описано поширення теплоти через чотиришаровий пакет, на другому – поширення теплоти в композиційному середовищі між пакетом і тілом пожежника, яке розділено на дві області (область повітря, в якій зростає тиск протифундованого газу, і пористе середовище між тілом пожежника та пакетом), що дасть нам можливість більш детально з урахуванням біологічних аспектів людини дослідити поведінку матеріалу під час впливу екстремальних температур.

#### Список літератури:

1. Засорнов О. С. Розробка методу і оцінка теплозахисних властивостей матеріалів для спецодягу / Автореф. дис. канд. технічних наук. – Київський національний університет технологій та дизайну. – Київ. – 2004. – 24 с.
2. Лыков А. В. Тепломассообмен. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
3. Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. Пер. с англ. – М.: Мир, 1964. – 456 с.
4. Кваско М. З., Кубрак А. І., Жученко А. І. Числові методи комп'ютерного моделювання автоматичних систем. Алгоритми і програми: Навч. посібник. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2003. – 360 с.
5. Ясинський В.К. Курс методів обчислень. – Чернівці: Вид-во “Прут”, 2003. – 308 с.
6. Орлов А. И. Экспертные оценки. Учебное пособие. – Москва, 2002. – 31 с. <http://www.aup.ru/books/m154/>.
7. Юзевич В.Н. Термодинамическое описание механоэлектротермодиффузионных процессов в деформируемых диэлектриках с точечными дефектами и соотношение Антонова // Термодинамика необратимых процессов / Под. ред. А. И. Лопушанской. – М.: Наука, 1992. – С. 163–168.
8. Barker, R.L., Guerth-Schacher, C., Hamouda, H., and Grimes, R., "Heat Transfer in Moist Thermal Protective Fabric Systems," Proceeding of 2nd International Conference on Advanced Fiber and Textile Materials, Ueda, Japan, November 11-12, 2002.

*Б.В. Штайн, Б.В. Болибрух, к.т.н. доцент, Р.Я. Лозинский к.т.н., доцент, (Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности)*

#### ОБОБЩЕННЫЕ КОНТАКТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, ОПИСЫВАЮЩЕЙ ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСА В ПАКЕТЕ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ

В работе осуществлена постановка задач теплопроводимости в отдельных элементах пакета специального материала теплозащитной одежды пожарных общего назначения из определения теплозащитных показателей качества и уровня защиты при воздействии экстремальных температур и плотности теплового потока до  $7 \text{ кВт/м}^2$ . В постановке учитывались теплофизические характеристики каждого специального материала пакета. Принцип заключается в определении достижения предельной температуры  $50^\circ\text{C}$  на выворотной стороне четырехслойного пакета специального материала теплозащитной одежды пожарных с учетом воздухопроницаемости и пористости материала.

**Ключевые слова:** конвективное тепло, теплозащитная одежда пожарных, теплофизические характеристики комплекта пакета.

*B.V. Shtayn, B.V. Bolibrukh, Candidate of Science (Engineering), associate professor,  
R.Ya. Lozinskiy, Candidate of Science (Engineering), associate professor (Lviv State University  
of Life Safety)*

### **THE CONTACT CORRELATIONS MATHEMATICAL MODEL WHICH DESCRIBES PROCESSES OF TEPLOMASOPERENOSU IN PACKAGE HEATCOVER CLOTHES OF FIREMEN**

Raising tasks of heat-conducting is in-process conducted in the separate elements package of the special material heat cover clothes firemen of the general setting from determination of heat cover indexes quality and level of defense at the action of extreme temperatures and closeness of thermal stream to  $7 \text{ kW/m}^2$ . Thermo physical descriptions of every special material of package were taken into account in raising. Principle consists in determination of achievement of maximum temperature of  $50^\circ\text{C}$  on the reverse side of package of the special material of heat cover clothes of firemen taking into account ventilates and porosity of material.

*Key words:* convection heat, heat cover clothes of firemen, thermo physical descriptions of complete set of package