

*В. К. Костенко, д-р техн. наук, професор, А. А. Нестеренко, канд. пед. наук, Нуянзін О. М., канд. техн. наук, Покалюк В. М., канд. пед. наук, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України*

## **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМІНУ В ІЗОЛЯЦІЙНОМУ ОДЯЗІ З СИСТЕМОЮ ОХОЛОДЖЕННЯ ТА БЕЗ НЕЇ**

*У даній роботі розроблений аналітичний метод, що допомагає досліджувати процеси тепломасопереносу в підкостюмному просторі захисного огляду в залежності від впливу зовнішнього середовища, теплового стану організму людини за різного поєднання та кількості шарів із повітряними прошарками в оболонці костюма. Проаналізовано динаміку температури в підкостюмному просторі за наявності теплоносія через часовий період, а також без його застосування. Даний аналіз підтвердив, що використання систем теплоізоляції значно знижує температуру у підкостюмному просторі рятувальника.*

*Розроблена математична модель може бути використана під час проектування засобів індивідуального протитеплового захисту рятувальників, які виконують пожежно-рятувальні, аварійно-рятувальні та інші невідкладні роботи.*

***Ключові слова:** математична модель, індивідуальний протитепловий захист, енерговитрати організму, динаміка зміни температури.*

**Постановка проблеми.** Робота рятувальників в екстремальних мікрокліматичних умовах особливо важка, вона пов'язана з небезпекою виникнення теплового перенапруження організму, що може спричинити тепловий удар [1]. Тому дослідження по визначенню реальних параметрів засобів індивідуального протитеплового захисту працівників оперативно-рятувальної служби цивільного захисту Державної служби України з надзвичайних ситуацій є актуальним і важливим.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** показав, що проведено дослідження щодо питань ефективного захисту рятувальників наявними термостійкими протитепловими засобами, що знаходяться на їхньому оснащенні, з огляду на екстремальні мікрокліматичні умови, які впливають на них, і тяжкість виконуваних робіт [2].

У попередніх дослідженнях [3] було побудовано математичну модель переносу тепла в перспективному теплозахисному засобі для рятувальників, який має двошарову тканину оболонку з повітряним прошарком, водо-льодяну або водну систему охолодження, враховує вплив температури довкілля, теплофізичні характеристики шарів

і геометричні параметри оболонки, фазове перетворення холодоагенту (льоду на воду) і подальший теплообмін, енерговитрати людини і співвідношення площі, яку охоплюють акумулятори холоду, та площі підкостюмного простору. Отримані математичні залежності дозволяють оцінити динаміку температури в підкостюмному просторі при різних рівнях зовнішнього теплового навантаження та інтенсивності роботи.

**Формулювання цілей статті** Розробити аналітичний метод для досліджень процесів тепломасоперенесення в підкостюмному просторі з огляду на вплив зовнішнього середовища, теплового стану організму людини й фазового переходу в системі охолодження за різного поєднання та кількості шарів із повітряними прошарками в оболонці костюма.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Характеризуючи загальну методичку досліджень, необхідно проаналізувати найбільш загальну систему «навколишнє середовище – захисний одяг – організм рятувальника – фізичне навантаження». Дві складові системи: навколишнє середовище й фізичне навантаження – являють собою ерготермічні

навантаження, що впливають на тепловий стан організму. Для першої складової характерні такі параметри, як температура, вологість і швидкість повітря, тепловий променевий потік, непридатність для дихання, що не залежать від рятувальника. Друга складова залежить від виду й умов проведення робіт, тобто від швидкості пересування, маси спорядження та додаткового вантажу, довжини подоланої ділянки, напрямку й кута нахилу руху. Ця складова може бути легкою, середньої важкості, важкою та дуже важкою.

На відміну від класифікації фізичного навантаження, для рятувальників характерна категорія «дуже важке навантаження», яку раніше брали до уваги лише під час руху нагору по вертикальних сходах, що буде обґрунтовано внаслідок дослідження енерговитрат залежно від виду й умов виконання робіт. При цьому допускаємо, що ступінь важкості роботи рятувальників визначають за такою зміною діапазону енерговитрат: 160 *Вт* (відпочинок у ЗІЗОД) – легкий, понад 160 до 320 *Вт* – середній, понад 320 до 480 *Вт* – важкий, понад 480 *Вт* – дуже важкий. Третя складова системи – захисний одяг, його поділяють на ізоляційний (теповідбивний і теплозахисний), ізоляційний від зовнішнього середовища (захисний одяг) із пасивним зніманням тепла, що перебуває на оснащенні підрозділів ОРС ЦЗ ДСНС України, та ізоляційний з активним зніманням тепла (охолодженням), який повинен бути розроблений і перебувати на оснащенні. Термін «ізоляційний» одяг (костюм) означає, що такий одяг захищає від теплового впливу всю поверхню тіла й перешкоджає впливу на нього вологості та швидкості руху навколишнього повітря. Для ізоляційного одягу використання активного знімання тепла (охолодження організму) є загальним випадком. Необхідно обирати найбільш прості, надійні, дешеві способи знімання тепла, систему охолодження й холодоагент, зважаючи на пропорційне знімання тепла з різних ділянок тіла, конструкції теплоізоляційної оболонки одягу: кількість, розташування, теплофізичні характеристики шарів і повітряні прошарки, а також нестационарні процеси теплообміну організму в одязі за ерготермічних навантажень.

У цьому випадку необхідно обґрунтувати критерій теплового стану організму рятувальника – температуру простору під одягом, яку потрібно порівняти з санітарними нормами, визначивши в такий спосіб безпечну тривалість його роботи. Це дає змогу суттєво зменшити витрати на проведення експериментальних досліджень, не визначаючи при цьому трьох фізіологічних параметрів: температури тіла (ректальної) і шкіри, частоти серцевих скорочень. Досліджуючи тепловий стан організму рятувальника в неізоляційному одязі, необхідно визначати тепловий баланс з урахуванням усіх параметрів навколишнього середовища, конструкцій теплоізоляційної оболонки, термічних її опорів і фізіологічних параметрів: температури тіла, шкіри, частоти серцевих скорочень і потовиділення (четвертий складник системи).

Зовнішній шар костюма – водонепроникний, тильний бік виконаний із тепловідбивного, термостійкого, а лицьовий – із термостійкого матеріалу. Під зовнішнім тепловідбивним шаром розміщений об'ємний теплоізоляційний шар ватину, а під ним – сатинова підкладка. Робочий бік захищений тонким шаром повсті.

Охарактеризуємо найбільш загальну розрахункову схему системи «навколишнє середовище – захисний одяг – людина» із мінімально можливою кількістю шарів теплоізоляційної оболонки одягу рятувальників, що представлена на рис. 1.

Захисний ізоляційний одяг, зазвичай, повинен складатися із зовнішнього і внутрішнього (легкого) костюмів. Зовнішній костюм має зовнішній шар 1 (термостійкий матеріал); внутрішній шар 2 (теплоізоляційний легкий матеріал – синтепон); шар 3 (підкладка – сатин, бязь), а внутрішній – шар 5 (комбінована тканина). На внутрішній поверхні шару 5 у обшивці 7 розташований холодоагент 6 (охолоджувальні елементи, які використовують для протитеплового одягу рятувальників). Між шарами 3 і 5, а також кишнями 7 та тілом людини 9 розміщені повітряні прошарки 4 і 8. Стрілками показані напрямки теплових потоків із навколишнього середовища й від тіла.

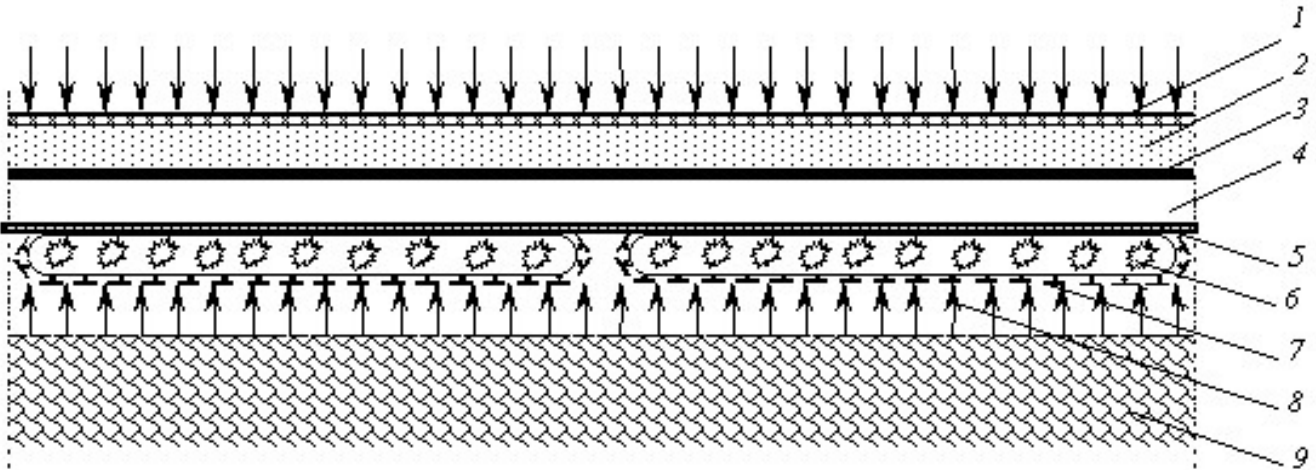


Рисунок 1 – Розрахункова схема системи «довкілля – захисний одяг – людина»: 1 – зовнішній шар; 2 – внутрішній шар; 3 – підкладка; 4, 8 – повітряний прошарок; 5 – внутрішній костюм; 6 – охолоджувальний елемент; 9 – тіло людини.

Оскільки ми аналізуємо ізоляційну термостійку зовнішню оболонку, то в цьому випадку не взято до уваги вплив на теплообмін у внутрішньокостюмному просторі вологості і швидкості повітря навколишнього середовища. Нестационарні процеси теплопередачі через багат шарову оболонку від навколишнього середовища в підкостюмний простір моделюють за допомогою диференціального рівняння:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x_i^2}, \quad (1)$$

де  $\rho_i$  – густина  $i$ -го шару середовища (повітря, води, матеріалу костюма),  $кг/м^3$ ;  
 $c_i$  – теплоємність  $i$ -го шару середовища (повітря, води, матеріалу костюма),  $Дж/(кг \cdot K)$ ;  
 $\lambda_i$  – теплопровідність  $i$ -го шару середовища (повітря, води, матеріалу костюма),  $Вт/(м \cdot K)$ ;  
 $T_i$  – температура в межах  $i$ -го шару розрахункової схеми,  $T_i = T_i(x), K$ ;  
 $\tau$  – час із моменту теплового впливу,  $с$ ;  
 $x_i$  – просторова координата в межах  $i$ -го шару або прошарку, який розраховують від зовнішньої поверхні шару (прошарку),  $м$ .

Як початкову умову для рівняння (1) використовуємо:

$$T_i(x, 0) = T_0, \quad (2)$$

де  $T_0$  – початкова температура,  $T_0 = 293 K$ .

Теплообмін на межі костюма (зовнішня поверхня шару 1) представимо граничною умовою третього роду:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_1 [T_1(0, \tau) - T_c], \quad (3)$$

де  $\alpha_1$  – сумарний коефіцієнт конвективно-променевого теплообміну між навколишнім середовищем і зовнішнім шаром,  $Вт/(м^2 \cdot K)$ .

$$\alpha_1 = \alpha_{1к} + \sigma(T_1 + T_c)(T_1^2 + T_c^2), \quad (4)$$

де  $\alpha_{1к}$  – коефіцієнт конвективного теплообміну між навколишнім середовищем і зовнішнім шаром,  $Вт/(м^2 \cdot K)$ ;

$T_c$  – температура навколишнього середовища (прийнята константою),  $K$ .

На межі між шарами 1-2, 2-3, 3-4 і 4-5 задають граничні умови четвертого роду:

$$\begin{aligned} T_i(\delta_i, \tau) &= T_{i+1}(0, \tau); \\ \lambda_i \frac{\partial T_i(\delta_i, \tau)}{\partial x} &= \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}(0, \tau)}{\partial x}; \quad (i = 1 \dots 4) \end{aligned} \quad (5)$$

На нижній межі останнього шару одягу 5 так само, як і на зовнішньому шарі, задають граничну умову третього роду:

$$\lambda_5 \frac{\partial T_5(\delta_5, \tau)}{\partial x} = \alpha_5 [T_8(\delta_8, \tau) - T_5(\delta_5, \tau)], \quad (6)$$

де  $\alpha_5$  – сумарний коефіцієнт конвективного і променевого теплообміну між нижнім шаром внутрішнього костюма й підкостюмного простору 8,  $Вт/(м^2 \cdot К)$  визначають аналогічно за формулою (4) за значень змінних, які входять до неї для 5 шару.

Температура  $T_n$ ,  $K$  у внутрішньо-костюмному просторі формується внаслідок взаємодії двох теплових потоків, які змішуються, а саме ті, які надходять від зовнішнього середовища й від тіла людини,  $Вт$ . Тому тепловий потік, що поглинається охолоджувальним елементом, дорівнює сумі зазначених теплових потоків:

$$\tilde{Q}_л = \tilde{Q}_c + \tilde{Q}_т. \quad (7)$$

У цих дослідженнях залежність вважаємо пропорційною до коефіцієнта конвективного теплообміну між речовинаом і підкостюмним простором та до різниці між температурою речовини й температурою в підкостюмному просторі:

$$\tilde{Q}_л = \alpha_л S_л (T_8 - T_л), \quad (8)$$

де  $S$  – площа поверхні речовини,  $м^2$ .

З урахуванням (6 – 8) рівняння теплового балансу в підкостюмному просторі набуде вигляду:

$$\alpha_л \frac{S_л}{S_к} (T_8 - T_л) = \alpha_5 [T_5(\delta_5, \tau) - T_8] + \frac{\tilde{Q}_т}{S_к}, \quad (9)$$

де  $S$  – площа поверхні костюма,  $м^2$ .

Отже, теплопередача від навколишнього середовища й тіла людини в підкостюмний простір може бути змодельована диференціальним рівнянням (1) із початковою умовою (2) і граничними умовами (3, 5, 9). Спочатку потрібно схарактеризувати граничний (постійний) розподіл температури, що виникає в шарах костюма й підкостюмному просторі після закінчення тривалого проміжку часу. У цьому випадку вихідне рівняння (1) перетвориться на стаціонарний вид (із нульовою правою частиною), і температура залежить тільки від просторової координати,

а потужність теплового потоку, що проникає з навколишнього середовища, – постійна в усіх шарах костюма:  $Q_c = \text{const}$ . Унаслідок інтегрування (1) по просторовій змінній, з урахуванням граничних умов отримаємо рішення:

$$\begin{aligned} T_1(0) &= T_c - \frac{Q_c}{\alpha_1 S_к}; \\ T_{i+1}(0) &= T_i(0) - \frac{Q_c \delta_i}{\lambda_i S_к}, (i=1..4); \\ T_5(\delta_5) &= T_8 + \frac{Q_c}{\alpha_5 S_к} \end{aligned} \quad (10)$$

Після підсумовування обох частин рівняння (9) тепловий потік, який проникає з навколишнього середовища в підкостюмний простір, визначають так:

$$Q_c = S_к (T_c - T_8) \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_к}{\lambda_к} + \frac{1}{\alpha_5} \right). \quad (11)$$

Для зручності подальшого викладу

введено значення:  $\frac{\delta_к}{\lambda_к} = \sum_{i=1}^5 \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ ; індекс «1»

зовнішньої поверхні оболонки костюма замінений на індекс «н»; індекс «5» внутрішньої поверхні оболонки костюма (внутрішнього костюма) – на індекс «в»; індекс «8» повітряного прошарку між тілом людини й оболонкою костюма (підкостюмний простір) – на індекс «п».

Для отримання рішення нестационарної задачі теплопередачі, праву частину вихідного рівняння (1) представимо в кінцевих різницях, у результаті рівняння перетвориться до такого:

$$\frac{dT}{d\tau} = a_к \frac{T_n - 2T + T_к}{\delta_к^2}, \quad (12)$$

де  $a_к$  – температуропровідність оболонки костюма,  $м^2/с$ ;  $T=T(\tau)$  – середня температура всередині оболонки костюма (із першого до п'ятого шару),  $K$ ;

$$a_k = \frac{\lambda_k}{\rho c}; \quad \lambda_k = \frac{\sum_{i=1}^5 \delta_i}{\sum_{i=1}^5 \delta_i / \lambda_i};$$

– константи;

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^5 \rho_i \delta_i}{\sum_{i=1}^5 \delta_i}; \quad c = \sum_{i=1}^5 c_i / 5$$

$$T_1 = T_1(0, \tau) \quad \text{і} \quad T_k = T_5(\delta_5, \tau) -$$

температура зовнішньої і внутрішньої поверхонь оболонки костюма відповідно.

Після представлення лівих частин граничних умов (3) і (6) у кінцевих різницях, з урахуванням (9), отримаємо:

$$T_n = A_1 + B_1 T; \quad T_k = A_2 + B_2 T, \quad (13)$$

$$A_1 = \frac{1}{1 + \bar{\lambda}_n} T_c; \quad B_1 = \frac{\bar{\lambda}_n}{1 + \bar{\lambda}_n};$$

де

$$\bar{\lambda}_n = \frac{2\lambda_k}{\delta_k \alpha_1};$$

$$A_2 = \frac{\bar{\alpha}_n T_n + \bar{Q}_\tau}{(1 + \bar{\alpha}_n) \bar{\lambda}_k + \bar{\alpha}_n}; \quad B_2 = \frac{(1 + \bar{\alpha}_n) \bar{\lambda}_k}{(1 + \bar{\alpha}_n) \bar{\lambda}_k + \bar{\alpha}_n};$$

$$\bar{\alpha}_n = \frac{\alpha_n S_n}{\alpha_5 S_k}; \quad \bar{\lambda}_k = \frac{2\lambda_k}{\delta_k \alpha_5};$$

$$\bar{Q}_\tau = \frac{\tilde{Q}_\tau}{\alpha_5 S_k}, \quad \text{при цьому залежність}$$

температури у внутрішньокостюмному просторі має вигляд:

$$T_n = T_8 = \frac{T_k + \bar{\alpha}_n T_n + \bar{Q}_\tau}{1 + \bar{\alpha}_n} = A_3 + B_3 T, \quad (14)$$

$$A_3 = \frac{(\bar{\alpha}_n + \bar{Q}_\tau)(1 + \bar{\lambda}_k)}{(1 + \bar{\alpha}_n) \bar{\lambda}_k + \bar{\alpha}_n}; \quad B_3 = \frac{\bar{\lambda}_k}{(1 + \bar{\alpha}_n) \bar{\lambda}_k + \bar{\alpha}_n}$$

Після підстановки (13) у (12) нестационарне рівняння набуде вигляду:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{a_k}{\delta_k^2} [A_1 + A_2 - (2 - B_1 - B_2)T], \quad (15)$$

а початкова умова:

$$T(0) = T_0. \quad (16)$$

Розв'язання рівняння (15) з урахуванням (16) має вигляд:

$$T = T_\infty - (T_\infty - T_0) e^{-k_2 \cdot \tau}, \quad (17)$$

де  $T_\infty$  – температура всередині оболонки костюма за постійного режиму,  $K$ ;  $k_2$  – параметр швидкості зміни температури між верхнім шаром оболонки костюма 1 і внутрішнім шаром 5.

Відповідно до (8) і (16) потужність охолодження системи:

$$\tilde{Q}_n = \alpha_n S_n (A_3 + B_3 T - T_n). \quad (18)$$

На підставі отриманих формул (13, 14, 17) моделюють динаміку температури на межі оболонки костюма й у підкостюмному просторі залежно від теплофізичних властивостей матеріалу оболонки, температури навколишнього середовища й потужності теплових потоків, обчислюють її максимальні значення після закінчення тривалого проміжку часу, коли настає стаціонарний тепловий режим. Один із варіантів розрахунку представлений у табл. 1. Розрахунки виконано з огляду на такі вихідні дані:

$$T_c = 373 K; \quad S_k = 4 m^2; \quad \delta_k = 0,01 m; \\ \lambda_k = 0,035 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \quad \alpha_n = 4 \text{ Вт/(м}^2 \text{К)}.$$

Допустимо температуру внутрішньокостюмного простору обрано рівною  $T_n(\infty) = 302 K (29^\circ C)$ , а температуру речовини  $T_n = 273 K (0^\circ C)$ . При цьому тепловий потік із навколишнього середовища  $Q_c = 274 \text{ Вт}$ , а теплопродукція організму людини  $Q_\tau = 256 \text{ Вт}$  – під час проведення робіт середньої важкості. У підсумку очікувана постійна температура всередині шарів одягу в разі застосування теплоносія  $T_\infty = 345,8 K (72,8^\circ C)$ , а після його використання –  $T_\infty = 364,6 K (91,6^\circ C)$ . Відповідно до (3.76) можна визначити необхідний запас речовини мЛ, кг на заданий період часу за формулою:

$$M_{\pi} = [Q_{\infty} \tau - (Q_{\infty} - Q_0) / (k_2 \cdot e^{k_2 \tau})] / q_{\pi}, (19)$$

$$\tau_{\pi} = 4/k_2 = 4 (2/(2-B_1 - B_2)). (20)$$

де  $q_{\pi}$  – питомий запас холоду речовини, Дж/кг.

Якщо запас речовини відомий, то, вирішуючи (19) щодо  $\tau$  за допомогою будь-якого ітераційного методу розв'язання нелінійних рівнянь, можна визначити час захисної дії системи охолодження  $\tau_p$ , а час перехідного періоду  $\tau$

Динаміка температури в підкостюмному просторі за наявності теплоносія через часовий період (штрихова лінія), а також без його застосування представлена на рис. 2. Графіки побудовано з використанням поданих вище вихідних даних.

Таблиця 1 – Результати розрахунку постійних температур усередині оболонки костюма, К/(°C)

$T_{\infty}$ ,	$T(\infty)$	$T_{\pi}$	$T_{\kappa}$	Примітка
355,5 (82,5)	345,8 (72,8)	336,0 (63,0)	302,0 (29,0)	Із застосуванням теплоносія ( $Q_x = 530 \text{ Вт}$ )
367,5 (94,5)	364,6 (91,6)	361,7 (88,7)	351,7 (78,7)	Без застосування теплоносія ( $Q_x = 0 \text{ Вт}$ )



Рисунок 2 – Динаміка температури в підкостюмному просторі: 1 – із використанням теплоносія; 2 – без теплоносія

Згідно з рис. 2, динаміка температури в підкостюмному просторі помітна за зміни  $k_2\tau$ , зазвичай, від 0 до 4, при цьому, як і очікувалося, швидкість її наростання значно

вища в одязі без застосування теплоносія, а постійна температура в цьому випадку (див. табл. 1) перевищує приблизно в 2,8 раза температуру в костюмі з використанням теплоносія.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Отже, розроблений аналітичний метод допомагає досліджувати процеси тепломасоперенесення в підкостюмному просторі огляду в залежності від впливу зовнішнього середовища, теплового стану організму людини за різного поєднання та кількості шарів із повітряними

прошарками в оболонці костюма. Це дає змогу визначити розподіл температури всередині оболонки костюма. Тому такий метод може бути використаний під час проектування засобів індивідуального протитеплового захисту рятувальників, які виконують пожежно-рятувальні, аварійно-рятувальні та інші невідкладні роботи.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Костенко В. К. Дослідження теплофізичних властивостей протитеплового жилету / В. К. Костенко, В. В. Колеснікова, А. І. Морозов // Пожежна безпека : зб. наук. пр. – Львів : ЛДУ БЖД. – № 18. – С. 81–85.

2. Покалюк В. М., Костенко Т. В., Нуянзін О. М., Нестеренко А. А. Екстремальні мікрокліматичні умови професійної діяльності рятувальників / В. М. Покалюк, Т. В. Костенко, О. М. Нуянзін,

А. А. Нестеренко // Міжнародний науковий журнал «Інтернаука», випуск № 3(25): том 1. – Київ: 2017 – с. – 159-165.

3. Костенко В. К., Костенко Т. В., Майборода А. О. Моделювання процесів переносу в протитепловому костюмі з відбором тепла / В. К. Костенко, Т. В. Костенко, А. О. Майборода // Науковий вісник ДонНТУ. – 2017. – № 1. – С. 26-32

## REFERENCES

1. Kostenko V. K. Research thermal properties against thermal vest / V. K. Kostenko, V. V. Kolesnikov, A. I. Morozov // Fire safety: Coll. Science. pr. - Lviv: LSU LF. - № 18. - P. 81-85.

2. Pokalyuk V. M., Kostenko T. V., Nuyanzin O. M. Nesterenko A. A. Extreme microclimate conditions of professional activity of rescuers / V. M. Pokalyuk, T. V. Kostenko,

O. M. Nuyanzin A. A. Nesterenko // International journal "Internauka" issue number 3 (25): Volume 1. - Kyiv, 2017 - p. - 159-165.

3. Kostenko V. K., Kostenko T.V., Majboroda A. O. Modeling of heat transfer in a suit against the selection of heat / VK Kostenko, T., A. Majboroda // Scientific herald of DonNTU. - 2017. - No. 1. - P. 26-32.

*В. К. Костенко, д-р техн. наук, проф., А. А. Нестеренко, канд. пед. наук,  
А. М. Нуянзін, канд. техн. наук, В. Н. Покалюк, канд. пед. наук,  
Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобыля НУГЗ України*

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА В ИЗОЛЯЦИОННОЙ ОДЕЖДЕ С СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ И БЕЗ НЕЕ

*В данной работе разработан аналитический метод, помогающий исследовать процессы тепломасопереноса в подкостюмном пространстве защитного обзора в зависимости от влияния внешней среды, теплового состояния организма человека с различного сочетания и количества слоев с воздушными прослойками в оболочке костюма. Проанализирована динамика температуры*

*в подкостюмное пространство при наличии теплоносителя через временной период, а также без его применения. Данный анализ подтвердил, что использование систем теплоизоляции значительно снижает температуру в под костюмном пространстве спасателя.*

*Разработанная математическая модель может быть использована при проектировании средств индивидуальной*

протитеплого защиты спасателей, которые выполняют пожарно-спасательные, аварийно-спасательные и другие неотложные работы.

**Ключевые слова:**  
математическая модель, индивидуальная протитепловая защита, энергозатраты организма, динамика изменения температуры.

*V. Kostenko, Doctor of technical science, professor,*

*A. Nesterenko, Candidate of pedagogical science,*

*O. Nuianzin, Candidate of technical science,*

*V. Pokaliuk, Candidate of pedagogical science,*

*Cherkassy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chornobyl of National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

## HEAT EXCHANGE MATHEMATICAL MODEL IN ISOLATION WARE WITH AND WITHOUT COOLING SYSTEM

The work of rescuers in extreme microclimatic conditions is particularly difficult, it is associated with the danger of the occurrence of thermal strain of the organism, which can cause a heat stroke. Therefore, the study to determine the actual parameters of the means of individual antimicrobial protection of the workers of the operational and rescue service of civil protection of the State Service of Ukraine for Emergency Situations is relevant and important.

Describing the general methodology of research, it is necessary to analyze the most common system "the environment - protective clothing - the body of the rescuer - physical activity." Two components of the system: the environment and physical activity - are ergothermic stresses that affect the body's thermal state. The first component is characterized by parameters such as temperature, humidity and air velocity, thermal radiation, and unsuitable for breathing that are not dependent on the rescuer. The second component depends on the type and conditions of the work, that is, the speed of travel, the mass of equipment and additional load, the length of the overrun area, direction and angle of

inclination. This component may be mild, moderate, heavy and very heavy.

In this paper an analytical method is developed which helps to study the processes of heat and mass transfer in the periosteum of the protective examination depending on the influence of the external environment, the thermal state of the human body for the different combination and number of layers with air layers in the cover of the costume. The dynamics of temperature in the subcutaneous space in the presence of heat carrier during the time period, as well as without its application, is analyzed. This analysis confirmed that the use of thermal insulation systems significantly reduces the temperature under the costume space of a rescuer.

The developed mathematical model can be used during the design of means of individual antimicrobial protection of rescuers who perform fire and rescue, rescue and other urgent work.

**Keywords:** Mathematical model, individual antimicrobial protection, energy consumption of the organism, temperature change dynamics