

УДК 614.8.086

**В. К. КОСТЕНКО** (д-р. техн. наук, проф.)**Т. В. КОСТЕНКО** (канд. техн. наук)**А. О. МАЙБОРОДА** (канд. пед. наук)

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, м. Черкаси

**І. С. ЛАКТИОНОВ** (канд. техн. наук)

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» МОН України, м. Покровськ

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ В ПРОТИТЕПЛОВОМУ КОСТЮМІ З ВІДБОРОМ ТЕПЛА

Розглянуто математичну модель переносу тепла в перспективному теплозахисному засобі для рятувальників який має двошарову тканину оболонку з повітряним прошарком, водо-льодяну або водну систему охолодження, ураховує 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.

**Ключові слова:** перенос тепла, математичне моделювання, протитепловий костюм, система охолодження.

**Постановка проблеми.** Подальше удосконалення засобів захисту рятувальників від дії негативних факторів пожежі можливе на основі забору тепла з підкостюмного простору шляхом поглинання або виносу його за межі системи «людина – теплозахисний одяг». Існуючі типи теплозахисного одягу мають, як правило, багатошарову конструкцію, яка частково перешкоджає доступу теплової енергії від джерела пожежі до тіла рятувальника, але сприяє накопиченню фізіологічної теплоти. Для обмеження температури в підкостюмному просторі запропоновано схеми проточного охолодження [1] або поглиначі тепла, наприклад водо-льодяні [2]. На даний час не відомі математичні моделі, в яких враховано перенос тепла крізь багатошарові оболонки при одночасному відборі теплової енергії.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Конструкції в яких передбачено поглинання тепла за допомогою водо-льодяних елементів застосовують в гірничорятувальній практиці [2]. В них охолоджуючі елементи розміщені всередині оболонки у спеціальних карманах. Недоліком даного способу охолодження є обмеженість ресурсу холоду який витрачається на нейтралізацію фізіологічної та зовнішньої теплоти. Поступово запаси льоду тануть перетворюючись на воду, яка, в свою чергу, нагрівається та перестає поглинати теплоту. Для оцінки терміну захисно дії протитеплогового костюму в різних умовах теплового навантаження існує необхідність мати розрахункову модель, яка враховує більшість факторів що впливають.

Відносно новою є пропозиція використовувати проточну схему руху холодоносія, коли вода або піноутворюючий розчин подається в систему трубок, що проходять в підкостюмному просторі. В цьому випадку ресурси холодоносія є практично необмеженими, але для раціонального розташування трубок та мінімізації витрати рідини, потрібно мати можливість розрахунку тепломасопереносу.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття.** Сучасні засоби захисту пожежних від впливу тепла побудовані по автономній схемі тобто в них відбувається накопичення тепла що поступає до костюму ззовні крізь багатошарову оболонку внаслідок випромінювання, конвекції та кондукції. В таких костюмах також відбувається накопичення фізіологічної теплоти. Відомі кілька розрахункових моделей для такої схеми теплообміну, але в них не передбачено поглинання або відбору тепла з системи «людина – теплозахисний одяг».

**Постановка задачі та її розв'язання.** Розглянуто математичну модель нестационарного перенесення тепла з навколишнього середовища крізь захисний костюм до людини, яка має різні рівні фізичного навантаження, при цьому вперше розрахункова схема костюму репрезентована у вигляді багатошарової оболонки, що складається з різної товщини матеріалів і повітря-

них прошарків, має водо-льодяну систему охолодження, ураховує 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.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів.** Проаналізовано процеси перенесення тепла в тришаровій оболонці, схемний вигляд якої (рис. 1) включає: 1 – зовнішній шар; 2 – повітряний прошарок; 3 – внутрішній шар; 6 – охолоджуючі елементи. Оболонка схильна до теплового впливу  $Q_c$  з боку довкілля (ззовні), тіла людини – 4 (зсередини)  $Q_q$ . У повітряному прошарку підкостюмного простору розташовані джерела поглинання теплоти  $Q_n$  - 5:

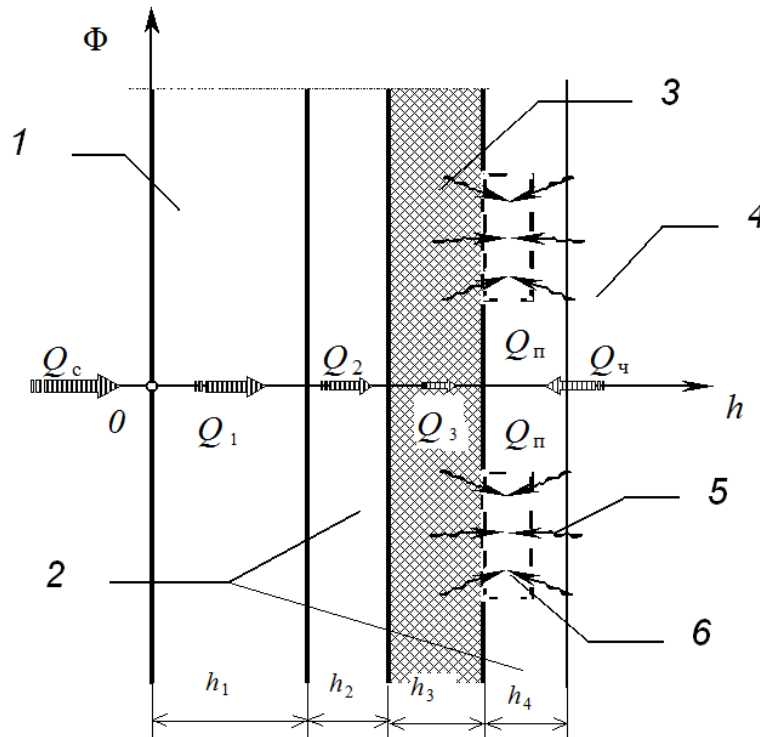


Рис. 1. Розрахункова схема оболонки костюма

Для побудови математичної моделі процесів перенесення тепла в оболонці костюма взято просторову координату  $h$ ,  $m$ , яка відлічується від зовнішньої поверхні костюма по нормалі всередину оболонки. Формулюємо припущення, що вздовж поверхні будь-якого шару оболонки (у напрямках, перпендикулярних до  $Oh$ ) субстанція розподілена рівномірно, тобто градієнт субстанції за площею шарів оболонки у межах досліджуваного фрагменту костюма мізерно малий порівняно з градієнтом всередину оболонки. Завдання розглядається в одновимірній постановці. Поточний час рахуємо з моменту потрапляння людини в захисному костюмі в середовище з підвищеною температурою. Динаміку розподілу теплоти по товщині захисної оболонки описано диференціальним рівнянням

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} = \varphi^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial h^2} \quad (1)$$

де  $\Phi = \Phi(h, \tau)$  – фізична змінна, що характеризує температуру,  $T$ ,  $K$ , спричинену тепловим потоком  $Q_c$ ,  $Вт$ ,

$\varphi^2 = \varphi^2(h)$  – коефіцієнт дифузійної провідності матеріалу оболонки або температуропровідності  $\alpha^2$ .

Передбачено, що в початковий момент часу температура в оболонці  $\Phi_0$  – мінімальна й однакова у всіх шарах, а саме:

$$\Phi|_{\tau=0} = \Phi_0 = \text{const} \quad (2)$$

Проникнення теплоти із зовнішнього середовища в оболонку і з оболонки в підкостюмний простір (ПП) змодельований, відповідно до закону Ньютона, граничними умовами третього роду:

$$\sigma_c (\Phi_c - \Phi_1|_{h=0}) = -\varphi_1^2 \frac{\partial \Phi_1}{\partial h} \Big|_{h=0}; \quad -\varphi_3^2 \frac{\partial \Phi_3}{\partial h} \Big|_{h=\Delta} = \sigma_n (\Phi_3|_{h=\Delta} - \Phi_n) \quad (3)$$

де нижній індекс  $i = 1, 3$  указує на значення змінної в межах  $i$ -го шару;

$$\Delta = \sum_{i=1}^3 h_i$$

– сумарна товщина шарів оболонки, м;

$h_i$  – товщина  $i$ -го шару або прошарку, м;

$\sigma_c$  і  $\sigma_n$  – коефіцієнти обміну субстанцією між середовищем та оболонкою і між оболонкою і ПП, м/с.

Припускаємо, що обмін субстанцією на межі повітряного прошарку відбувається за законом Фур'є, що відповідає граничним умовам четвертого роду:

$$\Phi_i|_{h=\delta_i} = \Phi_{i+1}|_{h=\delta_i}; \quad \varphi_i^2 \frac{\partial \Phi_i}{\partial h} \Big|_{h=\delta_i} = \varphi_{i+1}^2 \frac{\partial \Phi_{i+1}}{\partial h} \Big|_{h=\delta_i} \quad (4)$$

де нижній індекс  $i = 1, 2$  указує на значення змінної в межах  $i$ -го шару або прошарку  $\delta_1 = h_1$ ;  $\delta_2 = h_1 + h_2$ .

Кількість субстанції, що проникла в ПП, може бути визначена на основі рівняння її балансу:

$$Q_n = Q_c + Q_{ш} + Q_{ч} + Q_{и}, \quad (5)$$

де  $Q$  – потік субстанції: тепловий потік, Вт, або масова витрата шкідливої речовини, кг/с; індекси вказують відповідно на потік субстанції в ПП: «п» – акумульованої в поточний момент; «с» – проникла із зовнішнього середовища через оболонку; «ш» – проникла із зовнішнього середовища через шви та інші негерметичні вузли костюма; «ч» – від тіла людини; «и» – поглинається або виділяється. Надалі передбачено, що величини  $Q_{ш}$  і  $Q_{ч}$  – відомі константи.

**Результати обчислювального експерименту.** Результати проведених розрахунків дають змогу спрогнозувати температурні умови в ПП теплозахисного костюму, урахувавши задані теплофізичні властивості їхніх оболонок і площі (маси) поглиначів тепла протягом заданого допустимого часу роботи рятувальників. В якості прикладу наведено динаміку температури в різних шарах костюму для конкретної конструкції (рис.2.).

Застосування представлених розрахункових формул також уможливило дослідження впливу зміни конструкції оболонки (числа, геометричних і теплофізичних параметрів шарів і прошарків) на динаміку температури біля поверхні тіла людини (рис.3).

Виходячи з отриманих даних, можемо зробити висновки.

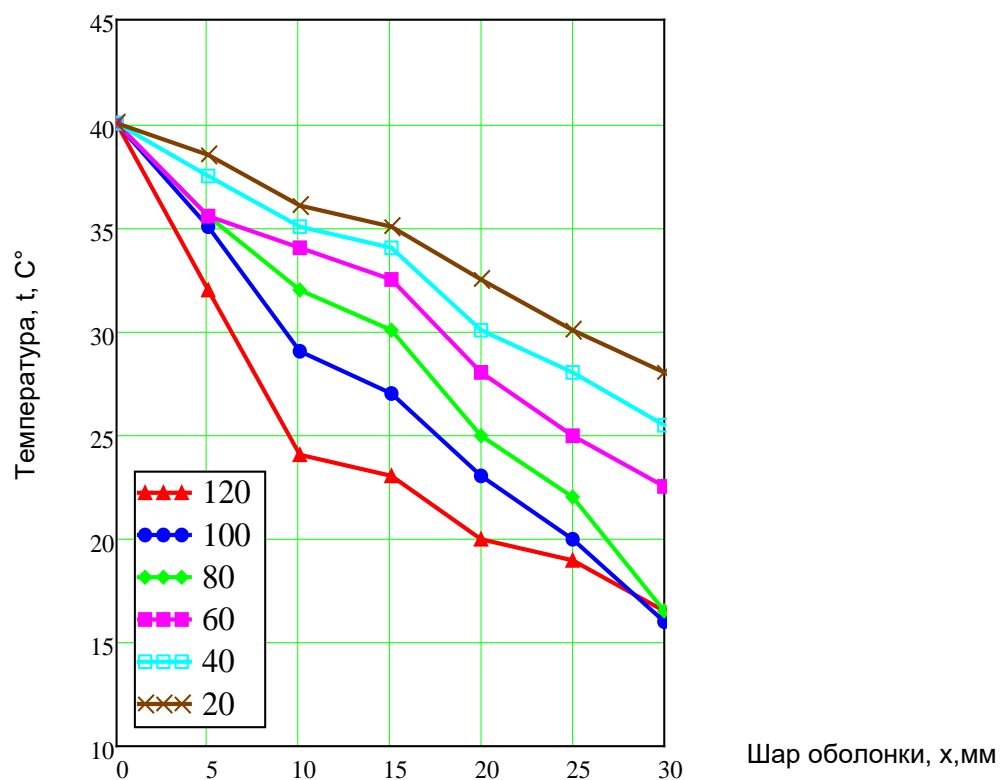


Рис. 2. Динаміка температури в шарах оболонки костюма до і після танення льоду

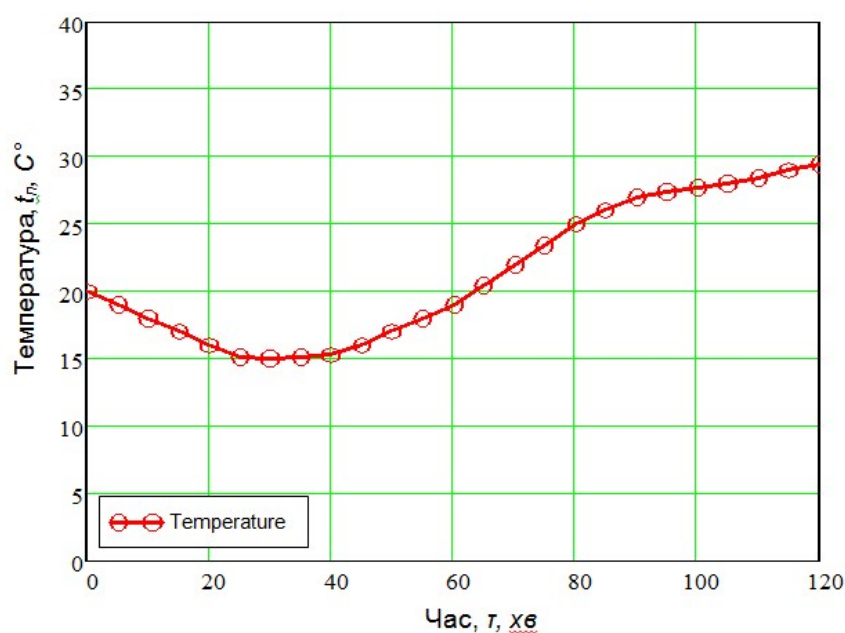


Рис. 3. Динаміка температури у підкостюмному просторі

**Висновки.** Представлені математичні залежності вможливають оцінювати динаміку температури в підкостюмному просторі при різних рівнях зовнішнього теплового навантаження та інтенсивності роботи. Ця інформація потрібна для проведення необхідних розрахунків під час складання планів ліквідації аварій, прогнозування швидкості пересування рятувальників по заданому маршруту, часу проходження заданим маршрутом, витрат кисню й енерговитрат організму. Це забезпечить ефективне й безпечне ведення аварійно-рятувальних робіт в екстремальних мікрокліматичних умовах.

**Бибблиографический список**

1. Патент України № 109668 «Теплозахисний костюм» від 25.08.2016. Автори: Костенко В. К., Костенко Т. В., Покалюк В. М.
2. Онасенко А. А. Теоретические основы тепломассопереноса в газозащитном костюме с водоледающей системой охлаждения // Проблемы экологии : сб. науч. тр. – Донецк : ДонНТУ, 2005. – № 6. – С. 67–77.

*Надійшла до редакції 03.14.2017*

**V. Kostenko, T. Kostenko, A. Maiboroda**

Cherkasy institute of fire safety named after Chernobyl Heroes of National university of civil defense of Ukraine, Cherkasy

**I. Laktionov**

State higher educational establishment “Donetsk national technical university”, Ukraine, Pokrovsk

**MODELING OF TRANSPORTATION PROCESSES IN THERMAL SUITS WITH HEAT EXTRACTION**

The mathematical model of heat transfer in the perspective heat shielding means for rescuers that has a two-layer woven shell with air layer, water and ice or water cooling system takes into account the effect of temperature of environment, thermal properties of layers and geometric parameters of the shell phase transformation of refrigerant (ice into water) and further heat exchange, energy consumption of a person and the ratio of area, which is covered by cold accumulators and the area under suit space was examined.

**Keywords:** heat transfer, mathematical modeling, protective clothing against heat, cooling system.

**В. К. Костенко, Т. В. Костенко, А. О. Майборода**

Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля НУГЗ Украины, г. Черкассы

**И. С. Лактионов**

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» МОН Украины, г. Покровск

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В ПРОТИТЕПЛОВОМ КОСТЮМЕ С ОТБОРОМ ТЕПЛА**

Рассмотрена математическая модель переноса тепла в перспективном теплозащитном средстве для спасателей которое имеет двухслойную тканую оболочку с воздушной прослойкой, водо-ледяную или водную систему охлаждения, учитывает влияние температуры окружающей среды, теплофизические характеристики слоев и геометрические параметры оболочки, фазовое превращение хладагента (льда на воду) и дальнейший теплообмен, энергозатраты человека и соотношение площади, которую охватывают аккумуляторы холода, и площадь подкостюмного пространства.

**Ключевые слова:** перенос тепла, математическое моделирование, протитепловой костюм, система охлаждения.