

*Б.В. Штайн, Б.В. Болібрux, к.т.н., доцент, Р.Я. Лозинський, к.т.н., доцент
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПОШИРЕННЯ ТЕПЛОТИ В ПАКЕТІ ЗАХИСНОГО ОДЯГУ І ПОВІТРЯНОМУ ПРОШАРКУ

У роботі подано теоретичне узагальнення і рішення актуальної науково-технічної проблеми, яка полягає у розкритті особливостей та умов визначення температурних режимів підкостюмного простору, як підґрунтя для створення методу та технічних засобів оцінювання показників якості пакета теплозахисного одягу пожежника. На основі проведеного дослідження існуючих методів та способів визначення показників якості спеціальних матеріалів встановлено, що вони не наближені до умов експлуатації захисного одягу. Одержано співвідношення для розрахунку температури як на виворотній поверхні пакета теплозахисного одягу пожежника, так і в підкостюмному просторі.

Ключові слова: теплозахисний одяг пожежника, час захисної дії, метод випробування, показник якості.

Постановка проблеми. Для забезпечення захисту під час гасіння пожеж та виконання завдань за призначенням, пожежниками використовується теплозахисний одяг, який зазнає впливу небезпечних факторів пожежі, а саме: підвищеної температури, теплового випромінювання, відкритого полум'я, води та поверхнево активних речовин.

Вибір і перевірка нових технічних рішень, що забезпечують досягнення основних споживчих властивостей протипожежної продукції, повинні здійснюватися в умовах, які, як правило, імітують умови їх експлуатації, як це вказано у ДСТУ ГОСТ 15.001:2009 «Продукція виробничо-технічного призначення».

Із впровадженням нових спеціальних матеріалів, які формують пакет захисного одягу пожежника, підвищуються і вимоги до методів випробовування та визначення їх показників якості. Отже, виникає необхідність у створенні нових методів оцінювання, які б забезпечували достатньо об'єктивну оцінку показників якості спеціальних матеріалів з визначенням їх граничних показників та часу захисної дії, оскільки жоден з існуючих методів такої інформації не надає.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Результати аналізу виконання пожежно-рятувальних робіт особовим складом підрозділів ОРС ЦЗ свідчать про те, що за період з 2001 по 2010 роки внаслідок дії екстремальних температур в 20-и випадках застосований захисний одяг виявився неефективним, що негативно вплинуло на тактичні можливості пожежників та результати гасіння пожеж [1].

Оскільки існує фактор дії небезпечних температурних режимів пожежі на захисний одяг та визначено особливості його недосконалості при експлуатації, нами проаналізовано методи та технічні засоби для оцінювання теплозахисних показників якості захисного одягу пожежників країн Європейського союзу, Росії, США, а також вітчизняні [2].

В цьому напрямку була виконана значна кількість науково-дослідних робіт. В першу

чергу необхідно виділити роботи таких науковців як: А.А.Мичка, Н.С.Гончарука, О.С.Засорнова, Т.О.Польки – Україна, В.І.Логіна – Росія, William E. Mell – Великобританія, J. Randall Lawson та Arthur Stoll – США.

Незважаючи на наявну теоретичну базу і досягнуті практичні результати, питання об'єктивного оцінювання теплозахисних показників якості спеціальних матеріалів теплозахисного одягу пожежника в умовах, які наближені до експлуатаційних, залишається актуальним.

Метою роботи є розкриття особливостей визначення часу захисної дії костюма залежно від температурних режимів підкостюмного простору.

Виклад основного матеріалу. Нами розглянуто чисельну математичну модель взаємодії процесів теплопередачі від джерела випромінювання на пакет спеціальних матеріалів теплозахисного одягу пожежника при дії НТФ (підвищеної температури, теплового потоку).

Для проведення розрахунку у визначених умовах були прийняті такі припущення для схеми теплопровідності: процес випромінювання має нестационарний характер та здійснюється між джерелом випромінювання і пакетом спеціальних матеріалів теплозахисного одягу пожежника (ТЗОП), які відокремлені між собою діаметричними прошарками повітря; багат шаровий пакет одягу як система теплопровідності – ізотропна і одновимірною площиною; структурні матеріали пакета розглядались як нескінченні пластини; дія джерела випромінювання та температури відома та постійна; пакет спеціальних матеріалів вважався умовно сухим; температура дії приймається низькою для плавлення чи руйнування спеціальних матеріалів пакета (наприклад, термічної деструкції).

З урахуванням прийнятої схеми (рис. 1) передбачається, що потік теплового випромінювання діє від зовнішнього джерела (q_e).

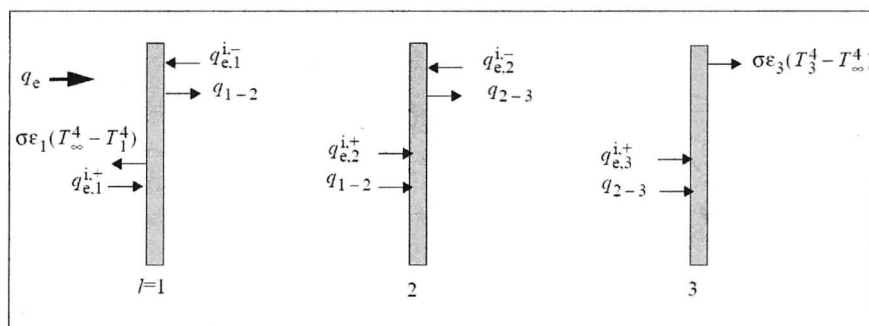


Рис. 1. Схема теплопередачі радіаційних потоків на межах поділу середовищ в тришаровому пакеті з повітряними прошарками та температурою T_{∞} :

$l=1, 2, 3$ – матеріал верху, вологотривкий та теплоізоляційний

Рівняння теплопровідності подамо у вигляді диференційного одновимірного рівняння

з початковими та граничними умовами в декартовій системі координат:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial q_{CD}}{\partial x} - \frac{\partial q_R}{\partial x} + g, \quad (1)$$

де: ρ – масова густина, кг/м³; c_p – питома теплоємність, Дж/К·кг; T – температура, К; t – час, с; x – відстань, м; g – об’ємна густина теплового потоку, Вт/м³; q_R – густина теплового потоку випромінювання, Вт/м².

Тепловий потік, що відображає перехід тепла у інший вузол (повітря) визначається з виразу:

$$q_{1-2} = \frac{\sigma(\varepsilon_1 T_1^4 + r_1 \varepsilon_2 T_2^4)}{1 - r_1 r_2} - \frac{\sigma(\varepsilon_2 T_2^4 + r_2 \varepsilon_1 T_1^4)}{1 - r_1 r_2}, \quad (2)$$

де: q – тепловий потік, Вт/м²; σ – стала Стефана-Больцмана; ε_i – випромінювальна здатність i -того матеріалу; T_i – температура i -того матеріалу; r – коефіцієнт відбиття.

Було також отримано вираз для розрахунку густини теплового потоку від джерела випромінювання в підкостюмному просторі:

$$-q(x_\Gamma) = \frac{k_s}{\delta_e^+} (T_s - T_g) = h_c (T_s - T_g) = \frac{k_G}{\delta_e^-} (T_g - T_G), \quad (3)$$

де: $-q(x_\Gamma)$ – тепловий потік в повітряному прошарку; k – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К; h_c – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²·К; T_s , T_g – температура в точках (рис.2), К.

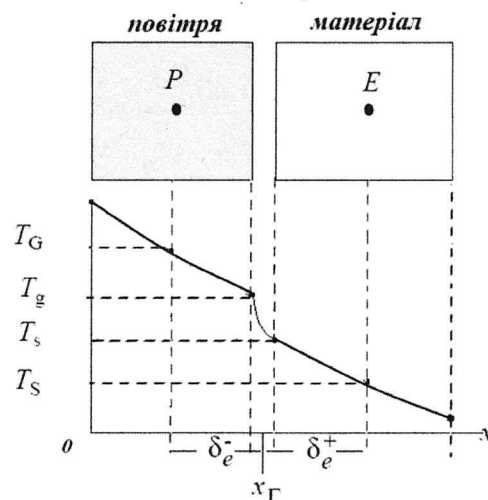


Рис. 2. Схема температурних режимів на зовнішній поверхні одягу в системі повітряний прошарок / матеріал

Постановка задачі у випадку обраних двох матеріалів з різними властивостями, описується як система диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} T_x(x, t) &= T(x, t) - T(x, 0), \\ \frac{\partial T_1}{\partial t} &= a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq x_\Gamma; \quad \frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \quad x_\Gamma \leq x; \\ -k_1 \frac{\partial T_1(0, t)}{\partial x} &= q, \quad \text{де:} \quad 0 \leq t, \end{aligned} \quad (4)$$

де: $a = k/(\rho \cdot c)$ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{м}^2/\text{с}$; t – час, с.

Використовуючи запропонований підхід, отримано математичну модель процесу теплопередачі. Рівняння (5) разом з умовами безперервності як T і його тепловий потік на межі двох різних матеріалів ($x = x_\Gamma$ рис. 2) визначає зміну температури з тепловим потоком q на межі $x = 0$. Розв'язок поставленої задачі здійснювався за допомогою перетворення Лапласа. q – потік випромінювання теплопровідності і конвекції на межі матеріалу та повітряного прошарку. Тоді розв'язком системи рівнянь (4) при $x = x_\Gamma$:

$$\begin{aligned} T_{(x_\Gamma, t)} &= \frac{q}{k_1} \sum_{n=0}^{\infty} \left(-\frac{1}{\gamma} \right)^n \left(1 - \frac{1}{\gamma} \right) \left[2 \sqrt{\frac{a_1 t}{\pi}} e^{-\left(\frac{x_\Gamma (2n+1)}{2\sqrt{a_1 t}} \right)^2} - x_\Gamma (2n+1) \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x_\Gamma (2n+1)}{2\sqrt{a_1 t}} \right) \right], \\ \gamma &= \frac{k_2 c_{p,2} \rho_2 + \sqrt{k_1 c_{p,1} k_2 c_{p,2} \rho_2}}{k_2 c_{p,2} \rho_2 - \sqrt{k_1 c_{p,1} k_2 c_{p,2} \rho_2}}, \quad \alpha = (k_2 \sqrt{a_1} - k_1 \sqrt{a_2})^{-1}, \\ z &= x + 2x_\Gamma (n+1), \quad b = x - 2x_\Gamma (n+1), \\ c &= x - x_\Gamma \left\{ 1 - \sqrt{a_2 / a_1} (2n+1) \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Чисельні значення для перевірки відповідності моделювання температурних режимів пакета ТЗОП є такими: товщина $x_\Gamma = 0,5$ мм матеріал Nomex і 5 мм – матеріал неопрен; густина теплового потоку, яка діє на матеріал верху $q_e = 2,5$ кВт/м². Визначення температурних режимів проводилось за час $t = 300$ с. Результати наведені на рис. 3.

Результати порівняння модельованих температур з експериментальними на виворотній поверхні зразка: $\Delta T = \pm 5^\circ\text{C}$, а на матеріалі верху $\Delta T = \pm 24^\circ\text{C}$.

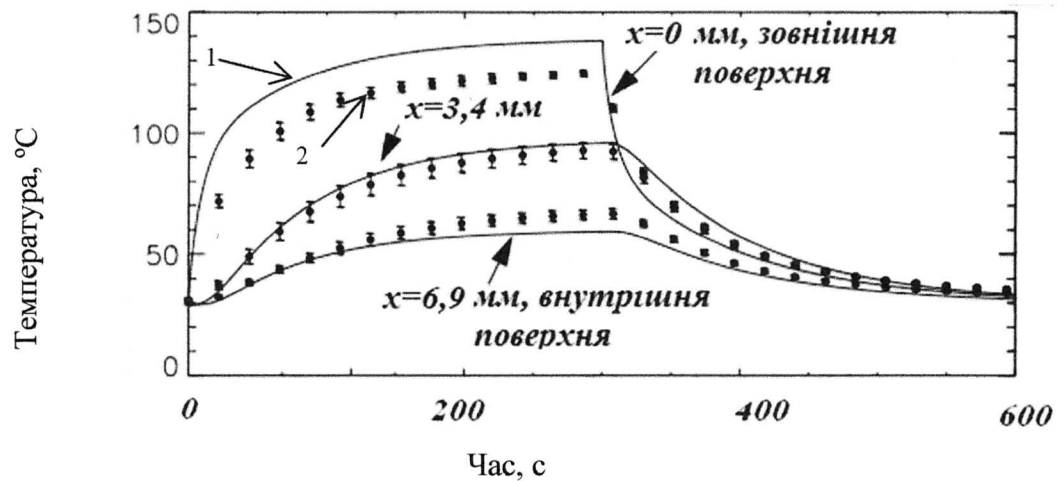


Рис. 3. Графік часу модельованої і експериментальної температури:

1 – експериментальні результати визначення температури; 2 – модельовані результати визначення температури

Для перевірки достовірності отриманих результатів нами проведено експериментальні дослідження з визначення впливу процесів тепломасопереносу пароповітряної суміші на температурні режими підкостюмного простору за допомогою розробленого методу та приладу [3,4]. Експеримент здійснювався на сухому пакеті спеціальних матеріалів ТЗОП, а також з імітацією поту на матеріалі гігієнічної підкладки. Нами встановлено, що необхідна кількість води для проведення експерименту становить 0,25, 0,5 та 1 г на 1 см² матеріалу, що відповідає кількості при легкому, середньому та важкому фізичному навантаженні та температурі підкостюмного простору в межах 24–50°C.

Експериментально встановлено, що із збільшенням в матеріалі води, яка імітує піт, до значення 1 г води на 1 см² матеріалу, його здатність блокувати тепловий потік зменшується, що призводить до зменшення часу захисної дії на 28%.

Із графіка залежності температури підкостюмного простору від кількості води в гігієнічній підкладці (рис. 4) встановлено, що із збільшенням вологості теплопровідність пакета зменшується і, як наслідок, зменшується ймовірність отримання пожежником термічних опіків.

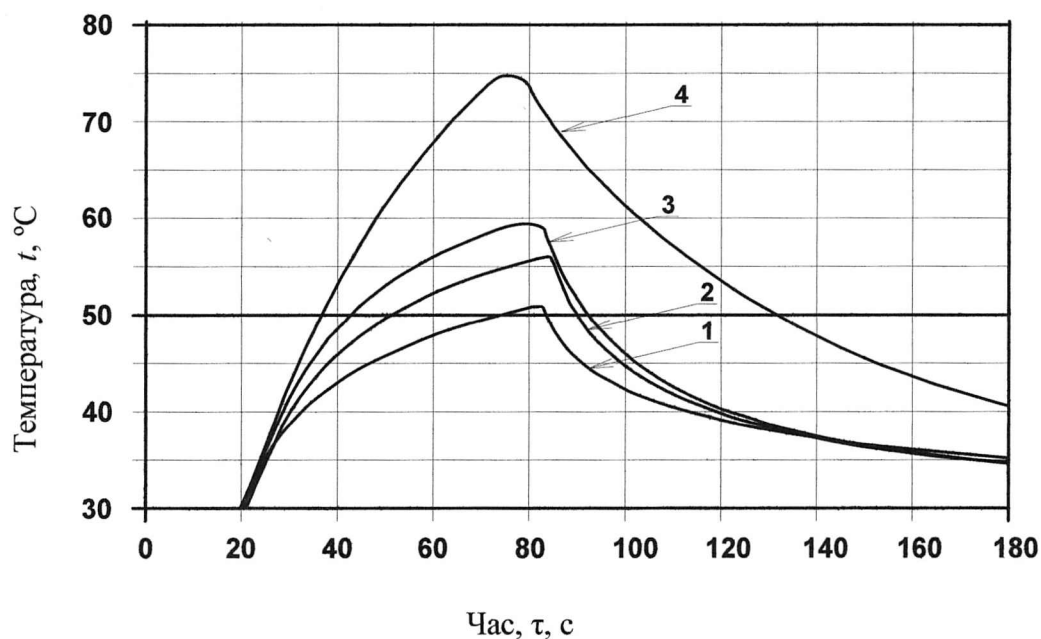


Рис. 4. Графік залежності температурних режимів пакета ТЗОП від кількості води в матеріалі: 1 – 1,0 г води на 1 см²; 2 – 0,5 г води на 1 см²; 3 – 0,25 г води на 1 см²; 4 – матеріал сухий

За результатами експериментальних досліджень визначено, що безпечний час експлуатації пакета ТЗОП становить 20,8 хв (рис. 5), при дії густини теплового потоку 0,5 кВт/м² в підкостюмному просторі з урахуванням випромінювання тепла від тіла.

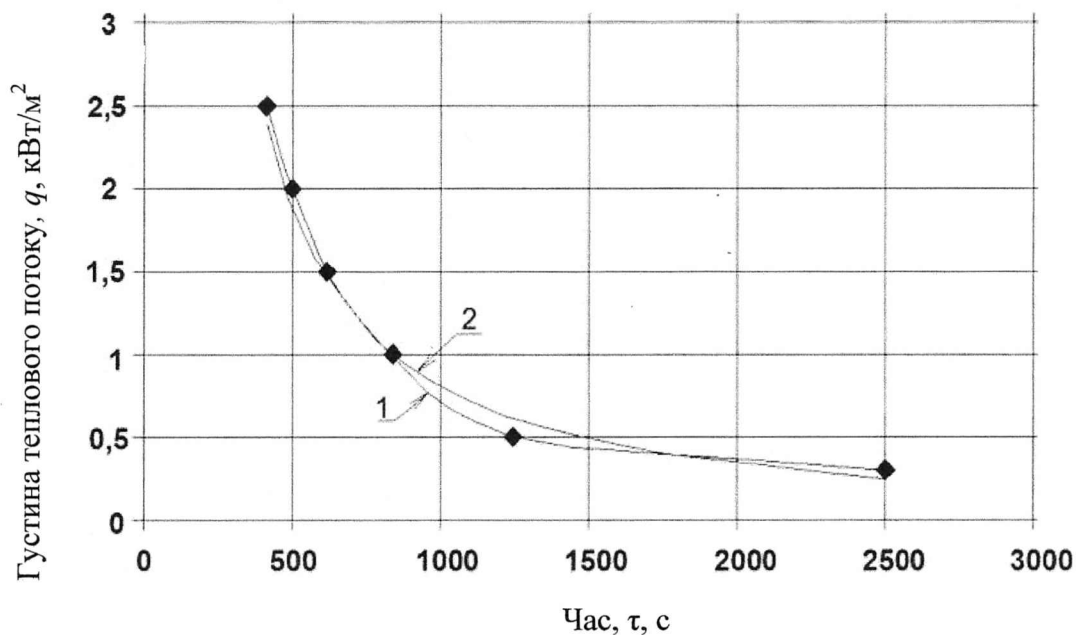


Рис. 5. Графік залежності безпечного часу експлуатації ТЗОП від дії теплового потоку: 1 – експериментальні дані; 2 – розрахункові дані

Висновки. Експериментально встановлено, що при дії теплового потоку густиною $0,5 \dots 2,5 \text{ кВт/м}^2$ на матеріал верху, час захисної дії костюма становить $20,8 \dots 6,8$ хв відповідно. Експериментально встановлено залежність температурних режимів підкостюмного простору від відповідної концентрації пароповітряної суміші, яка утворюється під дією теплових потоків в пакеті спеціальних матеріалів теплозахисного одягу пожежника. Встановлено, що збільшення кількості вологи в пакеті спеціального матеріалу до 1 г/см^2 призводить до зменшення часу захисної дії костюма на 28% і становить 20,8 хв.

Список літератури

1. Узагальнений аналіз приладів з визначення термофізичних показників та дослідження довговічності спеціальних матеріалів для виготовлення захисного одягу пожежників / Мичко А. А., Болібрух Б. В., Штайн Б. В., Андрусак З. В., Ясінський Д. А. // Пожежна безпека: Зб. наук. пр. – Львів: ЛДУ БЖД, 2006. – № 9. – С. 92-97.
2. Brushlinsky N.N., Hall J.R., Sokolov S.V., Wagner P. World Fire statistics. International Association of Fire and Rescue Services. Report №16. Moscow. 2011. – 52 s.
3. Пат. 90944 України. МПК(2009) G01N 3/18. Прилад для оцінки термозахисних властивостей матеріалів / Штайн Б. В., Болібрух Б. В. заявник та патентовласник Штайн Б. В., Болібрух Б. В. – № а 2008 11628; заявл. 29.09.08; опубл. 10.06.10, Бюл. № 11.
4. Пат. 53322 України. МПК(2009) G01N 33/36. Спосіб оцінки теплозахисних характеристик спеціальних матеріалів теплозахисного одягу пожежника / Штайн Б. В., Болібрух Б. В. заявник та патентовласник Львівський державний університет безпеки життєдіяльності. – № u 2010 00416; заявл. 18.01.10; опубл. 11.10.10, Бюл. № 19.

Б.В. Штайн, Б.В. Болібрух, к.т.н., доцент, Р.Я. Лозинський, к.т.н., доцент

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПОШИРЕННЯ ТЕПЛОТИ В ПАКЕТІ ЗАХИСНОГО ОДЯГУ І ПОВІТРЯНОМУ ПРОШАРКУ

У роботі подано теоретичне узагальнення і рішення актуальної науково-технічної проблеми, яка полягає у розкритті особливостей та умов визначення температурних режимів підкостюмного простору, як підґрунтя для створення методу та технічних засобів оцінювання показників якості пакета теплозахисного одягу пожежника. На основі проведеного дослідження існуючих методів та способів визначення показників якості спеціальних матеріалів встановлено, що вони не наближені до умов експлуатації захисного одягу. Одержано співвідношення для розрахунку температури як на виворотній поверхні пакета теплозахисного одягу пожежника, так і в підкостюмному просторі.

Ключові слова: теплозахисний одяг пожежника, час захисної дії, метод випробування, показник якості.

Б.В. Штайн, Б.В. Болібрух, к.т.н., доцент, Р.Я. Лозинський, к.т.н., доцент

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОТЫ В ПАКЕТЕ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ И ВОЗДУШНОМ СЛОЕ

В работе представлено теоретическое решение актуальной научно-технической проблемы, которая заключается в раскрытии особенностей и условий определения температурных режимов подкостюмного пространства, как основы для создания метода и технических средств оценки показателей качества пакета теплозащитного одежды пожарных. На основе проведенного исследования существующих методов и способов определения показателей качества специальных материалов установлено, что они не приближены к условиям эксплуатации защитной одежды. Получены соотношения для расчета температуры как на изнаночные поверхности пакета теплозащитного одежды пожарных, так и в подкостюмном пространстве.

Ключевые слова: теплозащитная одежда пожарных, время защитного действия, метод испытания, показатель качества.

B. Shtayn, B. Bolibrukh, Cand. of Sc. (Eng.), Sen. Lect., R. Lozynsky, Cand. of Sc. (Eng.), Sen. Lect.

THE THEORETICAL JUSTIFICATION DISTRIBUTION OF HEAT IN THE PACKAGE OF PROTECTIVE CLOTHING AND AIR LAYERS

In the thesis theoretical summary and solving of an actual scientific and technical issue are presented, which lie in disclosure of peculiarities and ways of determining temperature conditions of under suit space as a basis for creating a method and technology of quality indices evaluation of firefighter's heat protective clothing packet. Having analyzed existing methods and ways of determining quality indices of special materials it was determined that they are not close to the conditions of protective clothing use. On the basis of conducted analysis boundary criteria for evaluation of heat protective indices of firefighter's heat protective clothing were grounded. A ratio for calculating temperature both for the outer surface of firefighter's heat protective clothing packet and for the under suit space was received.

Key words: heat protective firefighter's clothing, protective action time, testing method, quality index.