

## РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ НЕВІДПОВІДНОСТЕЙ ОЦІНЮВАННЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ МАТЕРІАЛІВ ЗАХИСНОГО ОДЯГУ

В матеріалах статті описано остаточні результати теоретичних та експериментальних досліджень, якими встановлено невідповідність сучасних методів оцінювання теплозахисних показників якості пакета спеціальних матеріалів теплозахисного одягу пожежника, які описані ДСТУ 4366:2004, що суперечать вимогам ДСТУ ГОСТ 15.001:2009. В роботі запропоновано та науково обгрунтовано використання методу безконтактного вимірювання температури на виворотній поверхні спеціальних матеріалів захисного одягу пожежника до моменту досягнення граничної температури 50°C за допомогою розробленого приладу ОТВ-КД1, оскільки середньостатистичне відхилення показників при існуючому та розробленому методами оцінювання показників якості становить 7,58%, що свідчить про необхідність внесення змін в існуючу технічну документацію.

*Ключові слова:* захисний одяг пожежника, пакет спеціальних матеріалів, метод випробування, теплопровідність

Важливим фактором у забезпеченні стійкості захисного одягу (ЗО) до дії теплових потоків є фізико-хімічні властивості спеціальних матеріалів, з яких виготовляється вказана продукція, їх здатність захищати пожежника від дії теплового потоку різного походження та інтенсивності.

Оптимальний вибір та об'єктивна оцінка теплофізичних показників якості пакета спеціальних матеріалів ЗО пожежника дасть змогу визначати порогові значення умов експлуатації та відповідно час безпечного перебування пожежників-рятувальників в зоні високих температур.

Основним недоліком існуючих методів дослідження теплозахисних показників якості ЗО пожежника є відсутність сучасних технічних засобів моделювання високотемпературних факторів пожежі та сучасних інформаційних засобів прийому і обробки результатів експерименту. Важливим фактом є те, що усі сучасні методи визначення теплозахисних показників якості (стійкість до дії густини теплового потоку, до підвищеної температури, до дії відкритого полум'я), які регламентуються у ДСТУ 4366:2004 [1], визначають критерії спеціального матеріалу і жоден з них не дає інформації щодо граничного часу перебування пожежника в умовах дії небезпечних факторів пожежі.

При вирішенні означених проблем у процесі розроблення документації, вибір і перевірка нових технічних рішень, що забезпечують досягнення основних споживчих властивостей продукції, повинні здійснюватися методом лабораторних, стендових, інших дослідницьких випробувальних моделей, макетів, натурних складових частин виробів і експериментальних зразків продукції в цілому в умовах, які, імітують умови їх експлуатації, як це вказано у ДСТУ ГОСТ 15.001:2009 [2].

У зв'язку з розвитком інформаційних технологій сьогодні є можливість розробки та впровадження новітніх технічних засобів для аналізу параметрів теплозахисних показників якості ЗО пожежника. Це дасть змогу прогнозувати особливості поведінки спецматеріалу, рівня захисту, а також розробляти та формувати його нові конструкції, наблизивши умови випробування до експлуатаційних.

Таким чином, розробка методу для визначення теплозахисних показників якості спеціальних матеріалів ЗО пожежника обумовлена необхідністю об'єктивнішого оцінювання теплозахисних показників якості нових та існуючих матеріалів, а також обмеженими можливостями та кількістю приладів, які дають змогу проводити такі дослідження комплексно, з моделюванням умов експлуатації.

Дослідження із вдосконалення методів визначення показників якості і розробки технічних засобів для їх реалізації, проводили: А.А. Мичко, Б.В. Болібрух, С.Д. Кухарішин, С. Гончарук, О.С. Засорнов, Т.О. Полька, William E. Mell, J. Randall Lawson, C. Stoll та інші.

Нами проаналізовано вітчизняні та закордонні методи [3], які регламентують визначення теплозахисних показників якості та встановлено, що об'єктивність оцінювання показників якості пакета спеціальних матеріалів визначається залежністю дії температурних факторів до часу досягнення граничної температури 50°C на виворотній поверхні матеріалу, що обумовлено медико-біологічними особливостями організму людини та відповідає умовам, наближеним до експлуатаційних, оскільки досягнення граничної температури (50°C) визначає початок коагуляції білків шкіри людини [4].

Взявши за основу граничний показник, ми розробили метод для оцінювання теплозахисних показників якості пакета матеріалів теплозахисного одягу пожежника, який відрізняється тим, що контроль і визначення досягнення граничної температури (50°C) на виворотній поверхні випробувального зразка при дії температури до 300°C та густини теплового потоку до 7 кВт/м<sup>2</sup> здійснюється тепловізійним вимірюванням за допомогою оптичної системи сканування [5].

Загалом, в основу методу покладено принцип теплобачення – одержання видимого зображення об'єктів за їх тепловим випромінюванням (інфрачервоним (ІЧ) випромінюванням).

Температурне випромінювання властиве усім тілам й обумовлене тільки температурою і оптичними властивостями тіл, що беруть участь у теплообміні. Такі властивості при-таманні світловим (довжина хвилі 0,4...0,8 мкм) та інфрачервоним (довжина хвилі 0,8...800 мкм) променям, які мають однакову фізичну природу.

Процес поширення теплового випромінювання в просторі характеризується довжиною хвилі ( $\lambda$ ) і частотою коливань ( $\nu$ ). Поширення хвиль відбувається із швидкістю світла ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с), а частота  $\nu = c/\lambda$ . Світлові і інфрачервоні промені мають однакову фізичну природу. Тому закони, встановлені для світлового випромінювання, є об'єктивними і для теплового випромінювання.

Розклад енергії випромінювання в функції довжини хвиль був описаний Максом Планком. Результатом є характеристична графа, яка охоплює криві, що відповідають закону розподілу енергії в спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ).

Закон зміни спектральної щільності потоку випромінювання ( $E_{\sigma\lambda}$ ) від довжини хвилі ( $\lambda$ , м) і температури ( $T$ , К) для АЧТ (рис.1).

$$E_{\sigma\lambda} = C_1 \lambda^{-5} \left( \frac{C_2}{e^{\lambda T}} - 1 \right), \quad (1)$$

де  $C_1 = 3,73 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup>,  $C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$  м·К – сталі випромінювання;  
 $e$  – основа натурального логарифма.

Ізотерми, що характеризують зміну щільності потоку випромінювання, проходять через максимум, а кожній довжині хвилі відповідає своє значення  $E_{\sigma\lambda}$  (при  $\lambda \rightarrow 0$  і  $\rightarrow \infty$   $E_{\sigma\lambda} \rightarrow 0$ ).

Із підвищенням температури тіла енергія його випромінювання суттєво зростає. Зміщення максимуму спектральної щільності потоку випромінювання при підвищенні температури ( $T_1 < T_2 < \dots$ ) в напрямку коротких хвиль описується законом Віна, що витікає з (2) при  $\lambda T \ll C_2$ :

$$\lambda_{max} \cdot T = 2,9 \cdot 10^3, \quad (2)$$

де  $\lambda_{max}$  – довжина хвилі, яка відповідає максимальному значенню спектральної щільності потоку випромінювання;  $T$  – температура, К.

Описана вище залежність відноситься до так званого АЧТ, яке повністю поглинає все випромінювання, незалежно від його напрямку, спектрального складу і поляризації. Абсолютно чорне тіло при даній температурі характеризується найбільшою енергією випромінювання для усіх частот, порівняно із власним випромінюванням інших (сірих) тіл [7,8,9].

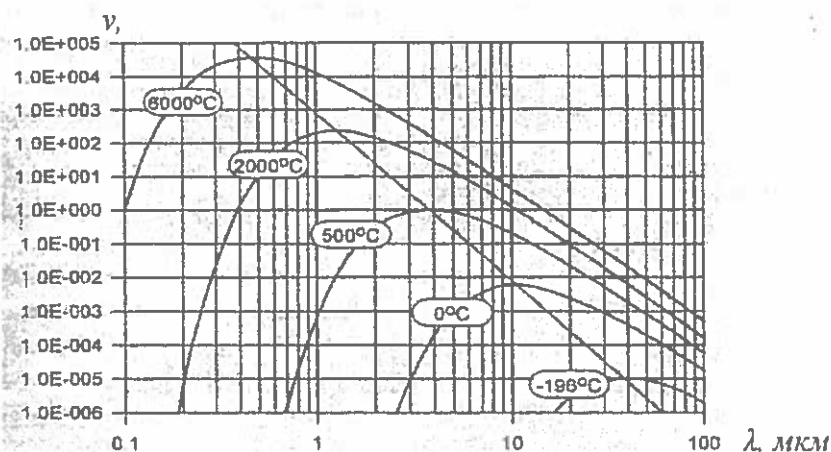


Рис. 1. Закон розподілу Планка – залежність спектральної яскравості випромінювання АЧТ від довжини хвилі та температури

Потужність випромінювання з одиниці площі поверхні АЧТ  $I_b$  в 1879 році описав Йозеф Стефан та у 1884 році Людвіг Едуард Больцман.

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4, \text{ або } E_0 = C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4, \quad (3)$$

де  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ , Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup> – стала Стефана-Больцмана,  
Для сірих (реальних) тіл:

$$E = \varepsilon \sigma_0 \cdot T^4, \quad (4)$$

де  $\varepsilon$  – ступінь чорноти, або коефіцієнт випромінювання – відношення потоку власного випромінювання тіла до потоку чорного випромінювання при тій же температурі (визначається дослідним шляхом і залежить від природи тіла, його температури і стану поверхні).

Коефіцієнт випромінювання (ступінь чорноти) – це властивість кожного тіла яке випромінює енергію. Цей параметр набуває значення близького до  $\varepsilon = 1,0$  лише і винятково для АЧТ. Коефіцієнт випромінювання об'єкта є відношенням енергії яка випромінюється через випромінюваний об'єкт за певної температури, до енергії вивільненої ідеальним джерелом випромінювання (АЧТ) за тієї ж температури. Інакше кажучи, ступінь чорноти становить міру можливості випромінювання енергії в відношенні до тіла досконало чорного.

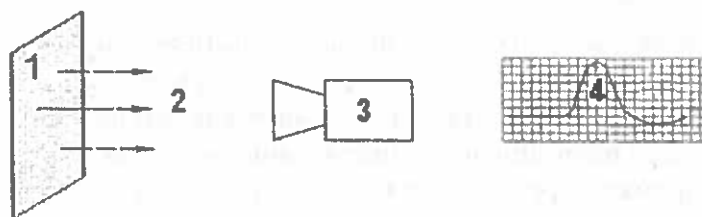


Рис. 2. Спрощена схема тепловізійного вимірювання:

1 – об'єкт дослідження; 2 – ІЧ- випромінювання; 3 – сканер; 4 – блок управління ПК

Інфрачервоне випромінювання (2), від певного об'єкта (1) проходить через об'єктив на термочутливий детектор (3), звідки інформація про його параметри передається на блок управління ПК (4) (рис. 2).

Потік теплового випромінювання, який досягає детектора, складається з таких параметрів [9]:

- випромінювання від об'єкта (температура об'єкта  $T_{об}$ ) потужністю  $\varepsilon\tau W_{об}$ , де  $\varepsilon$  – коефіцієнт випромінювання об'єкта,  $\tau$  – коефіцієнт пропускання атмосфери;
- випромінювання від сусідніх об'єктів (температура  $T_i$ ), відбите від об'єкта спостереження потужністю  $(1-\varepsilon)\tau W_i$ , де  $(1-\varepsilon)$  – коефіцієнт відбивання поверхні об'єкта спостереження. Тут припускається, що коефіцієнт випромінювання сусідніх об'єктів тотожний одиниці;
- випромінювання від атмосфери (температура  $T_a$ ), потужністю  $(1-\tau)\tau W_a$ , де  $(1-\tau)$  – коефіцієнт випромінювання атмосфери.
- повна потужність випромінювання на вході сканера:

$$W_c = \varepsilon\tau W_{об} + (1-\varepsilon)\tau W_i + (1-\tau)W_a. \quad (5)$$

Множимо кожен складову цього виразу на коефіцієнт пропорційності  $C$  і записуємо у вигляді:

$$U_c = \varepsilon\tau U_{об} + (1-\varepsilon)\tau U_i + (1-\tau)U_a, \quad (6)$$

після перетворень отримуємо співвідношення для  $U_{об}$ :

$$U_{об} = \frac{1}{\varepsilon\tau} U_c - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \tau U_i - \frac{1-\tau}{\varepsilon\tau} U_a, \quad (7)$$

Точніший вираз для  $U_{об}$  і подальшого розрахунку температури об'єкта виглядає таким чином:

$$U_{об} = U \frac{1}{\varepsilon\tau} - \frac{R}{\exp\left(\frac{B}{T_i}\right) - F} \left( \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + \frac{1-\tau}{\varepsilon\tau} \right), \quad (8)$$

де  $B, R, F$  – сталі, які визначаються у процесі метрологічної агеєтації сканера випробувального устаткування.

В наукових дослідженнях найчастіше застосовуються квантові матричні детектори *QWIP* (Quantum Well Infrared Photodetector) (рис. 3). Вони вперше були виготовлені фірмою *AT&T* на початку дев'яностих років минулого століття. Структуру становить напівпровідниковий шар *AlGaAs*, а також *GaAs*. Такі шари для нормального функціонування вимагають глибокого охолодження до  $-203^\circ\text{C}$  (близько 70 К), що значно ускладнює їхню конструкцію, а відповідно і експлуатацію. У той же час, це найбільш чутливі приймачі ІЧ-випромінювання, які переважно застосовують у наукових дослідженнях. Роздільна здатність детекторів становить  $20 \pm 40$  мК. Найбільша довжина хвиль в довгохвильовому діапазоні становить 8 – 9 мкм.

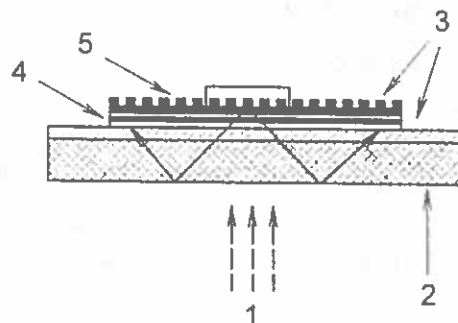


Рис. 3. Структура пікселя матриці скануючого елемента:

1 – ІЧ випромінювання; 2 – тонкий; нижній прошарок GaAs; 3 – контактні прошарки GaAs; 4 – прошарки QWIP; 5 – двовимірний розподільчий шар

Для реалізації запропонованого методу нами розроблено прилад ОТВ-КД1 [6], принцип якого полягає у перетворенні світлових хвиль у електричні, де здійснюється контроль усієї виворотньої поверхні випробувального зразка.

Для перевірки точності та достовірності результатів оцінювання теплозахисних показників якості матеріалів ЗО, ми провели дослідження з визначення коефіцієнта теплопровідності за стандартним методом (метод динамічного калориметра [10]) та порівняли їх результати з результатами, отриманими на приладі ОТВ-КД1.

Теплова схема калориметра показана на рис. 4.

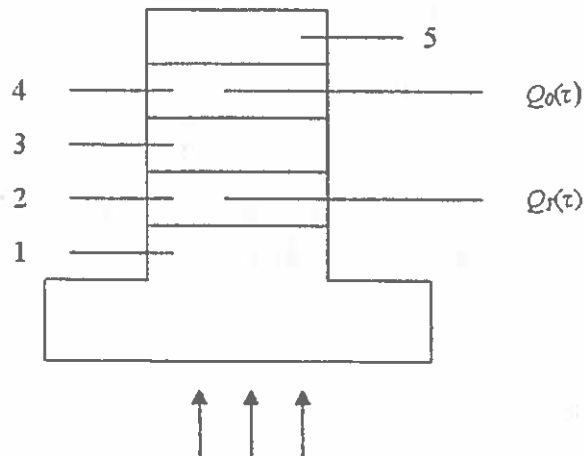


Рис. 4. Теплова схема динамічного калориметра [10]

Досліджуваній зразок 4, контактна пластина 3 і стержень 5 монотонно розігріваються тепловим потоком  $Q(\tau)$ , що надходить від основи 1. Тепловий потік  $Q_T(\tau)$  що проходить через середній переріз пластини 2, частково поглинається нею і йде далі на розігрів пластини 3, зразка 4 і стержня 5.

Для будь-якого теплового потоку справедливі формули:

$$Q_0(\tau) = \frac{V_0 S}{P} = (0,5C_0 + C_c) b, \quad (9)$$

де  $Q_0(\tau)$  – тепловий потік, що проходить через зразок і поглинається стержнем, Вт;

$V_0$  – перепад температури на зразку, К;

$P$  – тепловий опір між стержнем і контактною пластиною,  $\text{м}^2 \text{К/Вт}$ ;

$C_0$  – повна теплоємність зразка, Дж/К;

$C_c$  – повна теплоємність стержня, Дж/К;

$b$  – швидкість розігріву вимірювальної комірки в К/с;

$S$  – площа поперечного перерізу зразка в  $\text{м}^2$ ;

$$Q_T(\tau) = K_T \cdot V_T = (0,5C_T + C_{\text{п}} + C_c) b, \quad (10)$$

де  $Q_T(\tau)$  – тепловий потік, що проходить через середній переріз пластини 2, Вт;

$K_T$  – коефіцієнт пропорційності, що характеризує ефективну теплову провідність пластини,  $\text{Вт/К}$ ;

$V_T$  – перепад температури на пластині 2, К;

$C_T$  – повна теплоємність пластини 2, Дж/К;

$C_{\text{п}}$  – повна теплоємність контактної пластини 3, Дж/К;

Тепловий опір між стержнем і контактною пластиною визначаємо за формулою:

$$P = P_0 + P_k, \quad (11)$$

де  $P_0$  – тепловий опір зразка,  $m^2 K/Вт$ ;  
 $P_k$  – поправка, що враховує тепловий опір контакту,  $m^2 \cdot K/Вт$ .  
 Тепловий опір визначаємо за формулою:

$$P_0 = \frac{h}{\chi}, \quad (12)$$

де  $h$  – висота зразка, м;  
 $\chi$  – теплопровідність зразка,  $Вт/м \cdot K$ .

На основі формул (9)-(12) одержуємо робочі розрахункові формули для теплового опору зразка і його теплопровідності:

$$P_0 = (V_0 S(1 + \delta_c) / V_T K_T) * P_0, \quad (13)$$

де  $\delta_c$  – поправка, що враховує теплоємність зразка.

$$\delta_c = C_0(C_0 + C_c) / 2$$

де  $C_0$  – повна теплоємність досліджуваного зразка в  $Дж/К$ ;

$$C_0 = c_0(T) m_0$$

де  $c_0(T)$  – орієнтовне значення питомої теплоємності зразка в  $Дж/кг \cdot K$ ;

$m_0$  – маса зразка в  $кг$ .

$$C_c = c_M(T) m_c, \quad (14)$$

де  $c_M(T)$  – питома теплоємність міді в  $Дж/кг \cdot K$ ;

$m_c$  – маса стержня в  $кг$ ;

$K_T$  – теплова провідність пластини тепломіра в  $Вт/К$ .

Значення теплопровідності зразка визначається за формулою:

$$\chi = h / P_0, \quad (15)$$

Цей метод відноситься до стаціонарних порівняльних методів вимірювання теплопровідності. Точність вимірювання становить близько  $\pm 10\%$ .

Під час визначення відхилення показника коефіцієнта теплопровідності матеріалів методом динамічного калориметра за допомогою стандартного приладу ИТ-λ-400 та розробленого ОТВ-КД1 встановлено, що коефіцієнт залежить від виду матеріалу та температури зразка і відхилення результатів не перевищують  $1,075\%$ . Це свідчить про об'єктивність оцінювання теплозахисних показників якості спеціальних матеріалів ЗО пожежника за допомогою розробленого приладу ОТВ-КД1.

Таблиця 1

Термін досягнення температури  $50^\circ C$  на виворотній поверхні зразка матеріалів при інтенсивності теплової дії  $300^\circ C$

Назва матеріалу, артикул	Назва приладу	Одиниці вимірювання	Значення показника досягнення граничної температури, $50^\circ C$
Полотно термостійке Kevlar	ОТЗВМ	с	63,5
	ОТВ-КД1	с	59,3
	Відхилення	%	7,13
Парусина напівляня, арт. 11201	ОТЗВМ	с	67,8
	ОТВ-КД1	с	61,7
	Відхилення	%	8,99
Саржа для ЗО пожежника ТСТ-2 Notex	ОТЗВМ	с	55,8
	ОТВ-КД1	с	52,1
	Відхилення	%	6,63

Нами проведено ряд експериментів з визначення за допомогою приладу ОТВ-КД1 часу досягнення температури 50°C на виворотній поверхні зразка, та порівняння результатів з експериментальними даними, отриманими за допомогою існуючого приладу ОТЗВМ [11]. Результати наведені у таблиці 1.

**Висновок:** проведені порівняльні експерименти свідчать про невідповідність існуючих методик оцінювання теплозахисних показників якості спеціальних матеріалів ЗО пожежника, оскільки середньостатистичне відхилення отриманих показників  $\Delta T$ , від дійсних становить 7,58%, а це свідчить про необхідність внесення змін в існуючу нормативну документацію на ці матеріали (ДСТУ, ТУ).

#### Список літератури:

1. ДСТУ 4366:2004 (ISO 11613:1999. NEQ; EN 469:1995. NEQ). Одяг пожежника захисний. Загальні технічні вимоги та методи випробовування; Чинний 01.07.05. – К.: Вид-во держспоживстандарт, 2004. – 34 с.
2. ДСТУ ГОСТ 15.001:2009. СРПП. Продукция производственно-технического назначения. – Введ. 22.12.08. М.: Изд-во стандартов, 2008. 14с.
3. Узагальнений аналіз приладів з визначення термофізичних показників та дослідження довговічності спеціальних матеріалів для виготовлення захисного одягу пожежників / А.А. Мичко, Б.В. Болібрух, Б.В. Штайн, З.В. Андрусак / Зб. наук. праць. Пожежна безпека №9 – Л.: ЛДУ БЖД 2006. – С. 96-99.
4. Умрюхін Е.А. Медико-биологические аспекты интеллектуальной деятельности. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – С. 34–47.
5. Пат. № 53322 Україна, МПК G01N33/36 / Спосіб оцінки теплозахисних характеристик спеціальних матеріалів теплозахисного одягу пожежника / Б.В.Штайн, Б.В.Болібрух. – №а200811628; Заявл. 29.09.2008; Опубл. ; Бюл. № 6.
6. Пат. № 90944 А Україна, МПК G 01N3/18 / Прилад для оцінки термозахисних властивостей спеціальних матеріалів / Б.В.Штайн, Б.В.Болібрух. – №а200915784; Заявл. 29.03.2010; Опубл. ; Бюл. № 1.
7. Minkina W. Pomiarы termovizyjne – przyrzondy i metody. Czestochowa: Wyd-wa Politechniki Czestochowskiej. –2004. – 243 s.
8. Луцик Я.Т. та ін., Вимірювання температурні: теорія і практика. – Львів: Видавництво “Бескит Біт”, 2006. – 560 с. ISBN 966-8450-25-6
9. Погорслов А.І. Тепломасообмін (основи теорії і розрахунку): Навчальний посібник для вузів. 4-те видання, виправлене. – Львів: “Новий світ-2000”, 2006. – 144 с.
10. Д.М. Фреїк, Р.Я. Михайльонка, В.М. Кланічка. Методи вимірювання теплопровідності напівпровідникових матеріалів. Фізика і хімія твердого тіла. Т.5, №1, 2004. – С. 173–191.
11. Пат. 39669 Україна, МПК G01N3/18 Спосіб оцінки термостійкості матеріалів / О.М.Сарана, О.С.Засорнов, О.М.Троян, А.А.Мичко. – №2000127064; Заявл. 08.12.2000; Опубл. 15.06.2001; Бюл. №5.

*Б.В.Штайн, Б.В.Болибрух, Д.А.Чалый*

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСООТВЕТСТВИЯ В ОЦЕНКЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ.

В материалах статьи описаны окончательные результаты теоретических и экспериментальных опытов, где установлено несоответствие современных методов оценки теплозащитных показателей качества пакетов специальных материалов теплозащитной одежды пожарно-

го, описанные в ДСТУ 4366:2004, что противоречит требованиям ДСТУ ГОСТ 15.001:2009. В работе предложено и научно обосновано использование метода бесконтактного измерения изнаночной поверхности пакета специальных материалов теплозащитной одежды пожарного до момента достижения предельной температуры 50<sup>0</sup>С при помощи разработанного прибора ОТВ-КД1, поскольку среднестатистическое отклонение между существующим и предложенным методом оценки показателей качества составляет 7,58%, что свидетельствует о необходимости внесения изменений в существующую техническую документацию.

**Ключевые слова:** защитная одежда пожарного, пакет специальных материалов, метод исследования, теплопроводность.

*B.V. Shtain, B.V. Bolibrukh, D.O. Chalyy*

### **RESULTS OF PROTECTIVE CLOTHING MATERIALS HEAT-SHIELDING QUALITY INDEX ASSESSMENT VARIANCE**

The article describes final results of theoretical and practical research which ascertain variance of modern assessment methods of heat-shielding quality index of special materials used for fire-fighter's heat-shielding clothing inventoried in the Government Standard of Ukraine 4366:2004 which contradict the Government Standard of Ukraine 15.001:2009. The research suggests and scientifically corroborates application of noncontacting assessment method of the turnout surface of special materials used for fire-fighter's protective clothing till the moment of reaching the limit of 50<sup>0</sup>С. The research was conducted with the help of device "ОТВ-КД1". An average deviation between the existing and elaborated assessment methods of quality index is 7,58% which indicates the necessity to make amendments to the existing technical documentation.

**Key words:** fire-fighter's protective clothing, set of special materials, assessment method, heat conduction.

