

## ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НОВОГО МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАХИСНОГО ОДЯГУ ПОЖЕЖНИКА

Запропоновано програмне забезпечення для методики випробовування пакету спеціальних матеріалів теплозахисного одягу пожежника, яке дає змогу аналізувати та вираховувати досліджувані параметри при проведенні випробування, що забезпечує об'єктивну оцінку термічних показників якості досліджуваних матеріалів для подальшого їх вибору та оптимізації. Встановлено, що ієрархічно-модульний спосіб організації дає змогу змінювати або доповнювати окремі складові програмного забезпечення. Керування блоками, реєстрацію та оброблення даних ЕОМ виконується за схемою теплової дії. Опрацювання даних здійснюється оброблювальними програмами, які дають змогу здійснити: оброблення даних дослідження, будувати двовимірну залежність, накладати графіки, виконувати апроксимацію даних.

**Ключові слова:** математичне моделювання, теплозахисний одяг пожежника.

**Вступ.** Давши загальну характеристику сучасним методам та способам дослідження теплозахисних характеристик спеціального матеріалу теплозахисного одягу пожежника [1, 2], провідну роль у створенні та оптимізації пакетів матеріалів відіграє правильний вибір матеріалів. Для створення надійного теплозахисного одягу пожежника виготовляють нові термостійкі матеріали різного сировинного складу. Захисний рівень пакету матеріалів може бути зроблений на підставі об'єктивної оцінки їхніх властивостей з врахуванням дії певних високотемпературних чинників.

**Постановка проблеми.** Методології та технічного забезпечення, які б давали змогу моделювати умови теплової дії, наближені до експлуатаційних, виконуючи їх комплексне оцінювання властивостей, що оцінюють за критеріями відповідно до стандартів в Україні та за кордоном [3-8], недостатньо. Цей факт свідчить про складнощі в розробленні та виборі оптимального пакета матеріалів під час створення вискоелективного захисного одягу пожежника (ЗОП) та науково-обґрунтованих рекомендацій щодо безпечного часу перебування пожежника в приміщенні, де сталося загоряння.

**Експериментальні та теоретичні дослідження.** Розроблення нового методу та приладу для визначення ефективних теплофізичних характеристик і оцінки теплозахисних властивостей спеціальних матеріалів теплозахисного одягу пожежника неможлива без розроблення програмного забезпечення для автоматизації процесу визначення, обчислення отриманих результатів, а також виключення людського чинника.

Для розроблення програмного забезпечення потрібно дослідити фізичну сутність процесу теплопередачі крізь матеріали ЗОП. Для цього ми розглянемо полімерний композитний матеріал теплозахисного одягу пожежників як багат шарову композицію з такими складовими частинами:

- а) поверхневий шар між одягом і зовнішнім середовищем, в якому можуть відбуватися процеси термодеструкції внаслідок дії ІЧ-випромінювання та конвективної теплопровідності;
- б) чотиришаровий пакет теплозахисного одягу товщиною  $\delta$  ( $\delta = \sum_{k=1}^4 \delta_k$ ,  $k=1, 2, 3, 4$ );
- в) перехідний шар між одягом і внутрішнім середовищем, тобто між одягом і власне пожежником.

У захисному матеріалі можуть відбуватися багатостадійні окислювальні екзотермічні фізико-хімічні процеси термомасоперенесення й подальші перетворення початкових речовин та матеріалів у продукти згорання.

У першому наближенні одяг пожежника моделюємо безмежною по  $y$  та  $z$  чотиришаровою пластиною, товщина якої  $\delta$  ( $0 < x < \delta$ ). Для квазістаціонарного стану за дії зовнішнього джерела тепла  $q$  і обмежувальних припущень диференційні рівняння теплопровідності для зовнішнього (1) і внутрішніх ( $k$ ) шарів набувають вигляду [9]

$$\operatorname{div}(\lambda_j \nabla T) = q, \operatorname{div}(\lambda_k \nabla T) = 0 \quad (k=2, 3, 4), \quad (1)$$

де:  $\lambda_k$  – коефіцієнти теплопровідності матеріалів пакету теплозахисного одягу (конденсованої фази);  $\nabla T$  – тепловий градієнт.

Для квазістаціонарного температурного поля характерний закон конвективного теплообміну між поверхневим шаром тіла і навколишнім (газовим) середовищем. У цьому випадку кількість теплоти, що передається в одиницю часу з навколишнього середовища на одиницю площі поверхні твердого тіла (за  $x = x_g$  для одновимірної ситуації), пропорційна різниці температур між поверхнею тіла  $T_I$  і навколишнім середовищем  $T_r$ , тобто виконується гранична умова третього роду [9] при  $x = x_g$

$$\lambda_1 \frac{dT}{dx} + \zeta_1 \cdot (T_I - T_r) = 0, \quad (2)$$

де:  $\zeta_1$  – коефіцієнт теплообміну поверхневого шару на границі розділу двох середовищ (зокрема, між твердим ( $k=1$ ) і газовим "Г");  $x$  – координата.

Граничні умови на межі розділу двох твердих середовищ (чотиришарового пакету теплозахисного одягу) такі [9]:

$$\begin{cases} T_i = T_j; \\ \lambda_i \left( \frac{dT}{dx} \right) = \lambda_j \left( \frac{dT}{dx} \right), \quad i, j = 1, 2; 2, 3; 3, 4. \end{cases} \quad (3)$$

Аналогічна до (2) гранична умова виконується на границі розділу між пакетом і внутрішнім повітряним середовищем, тобто між одягом і тонким повітряним шаром. Для багатшарового пакета ( $n=4$ ), що складається з окремих однорідних пластин товщиною  $L_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) з відповідними коефіцієнтами теплопровідності  $\lambda_i$ , тепловий опір набуває значення [9]

$$R_q = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^4 \frac{L_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (4)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2$  – коефіцієнти теплообміну зовнішніх поверхонь пакета.

Для оцінки динамічних змін комплексних показників якості пакету використовуємо методи оптимізації, зокрема, функціонал якості задамо у вигляді [10]

$$J = \int_{t_0}^{t_k} f(g, u, s) dt, \quad (5)$$

де:  $g$  – вектор заданих впливів ( $g_i$  – параметри системи, які, зокрема, характеризують інтенсивність теплових потоків;  $u$  – вектор керувань;  $s$  – вектор невизначених збурень  $\Delta T = T_2 - T_1$ ;  $[t_0, t_k]$  – інтервал часу, в якому розглядають процес (формування критеріального співвідношення для системи ризиків);  $f(g, u, s)$  – функція, що відображає інтегральний показник якості одягу пожежника.

Визначено функціонал оцінювання у формі  $F = F^+$ , який використовуємо для оптимізації таких категорій, як корисність, надійність, ефективність, імовірність (ймовірність досягнення поставленої мети – покращення надійності теплозахисного одягу пожежника). У формі  $F = F^-$  функціонал оцінювання використовується для оптимізації таких категорій: витрати, збитки, ризик. Функціонал  $F$  введено аналогічно як у праці [11].

Функція ризику визначається як лінійне перетворення елементів функціонала оцінювання  $F = (f_{kj}; k = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$  до відносних одиниць вимірювання. Функцію ризику використано для прогнозування змін захисного рівня одягу пожежника.

Поняття критерію прийняття оптимального рішення щодо якісного захисного одягу пожежника. Для цього використовуємо співвідношення (5) і умову  $R_q \Rightarrow \max$ . Розроблено методику оцінки ступеня ризику і відповідного прогнозу змін якості за фізичними та хімічними характеристиками шарів композиційного матеріалу, з якого складається одяг пожежника. Побудовано функцію ризику і розроблено раціональну систему оптимізаційної процедури на основі функціонала якості матеріалів, яка передбачає узгоджену програму робіт щодо покращення захисних властивостей одягу пожежника.

На основі співвідношень (1)-(5) запропоновано одновимірний варіант (по осі x) математичної моделі теплових процесів для теплозахисного одягу пожежників за високих температур. Здійснено теоретичний аналіз теплових режимів, що характеризують основні стадії процесу горіння у зовнішньому середовищі. Наведені у цьому дослідженні елементи модельних уявлень дають змогу аналізувати складний процес прогрівання композиційних матеріалів спецодягу пожежників (пакета) в умовах високих температур і контакту з розжареними елементами конструкцій та теоретично прогнозувати й обґрунтувати вибір основних методик підвищення довговічності цього виду ЗОП.

Провівши вимірювання температур на лицевій і виворітній поверхнях матеріалу (пакета) за допомогою розробленого приладу безконтактного вимірювання температури ОТВ-КД1, принцип якого полягає у перетворенні світлових хвиль в електричні, можливо отримати графіки залежності температур від часу теплової дії (рис. 1).

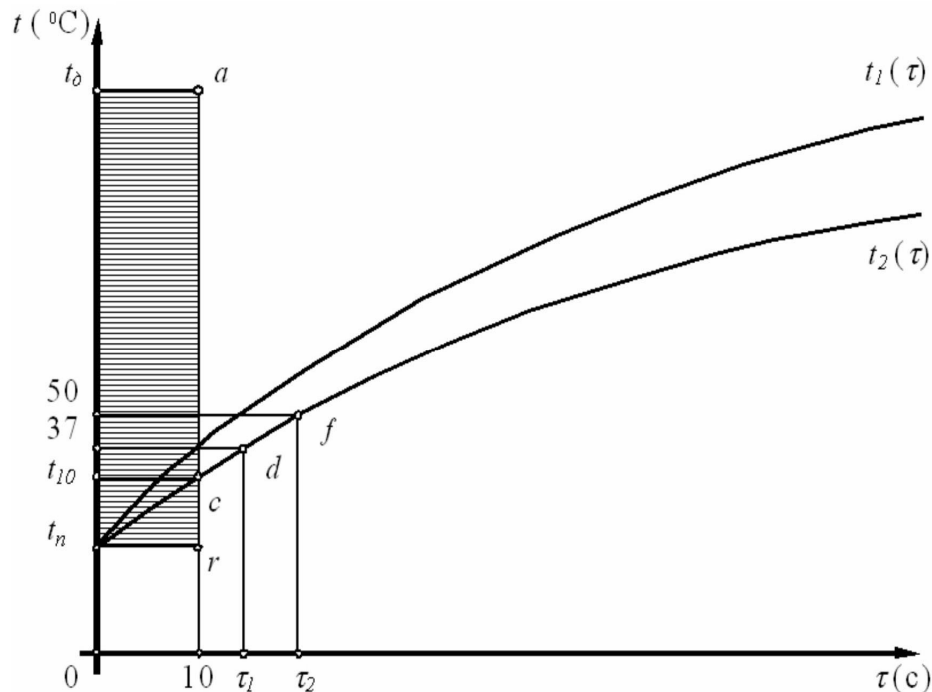


Рис. 1. Схема визначення критеріїв оцінки теплозахисних властивостей матеріалів (пакетів)

На основі аналізу представлених графіків для оцінки теплозахисних властивостей матеріалу (пакета) запропоновано використовувати низку характеристик:

- підвищення температури на виворітній поверхні проби пакета матеріалів до значення 310,15 К (37 °С) (відповідає граничній температурі відносно комфортного відчуття людини);
- підвищення температури на виворітній поверхні проби матеріалів спецодягу до значення 323,15 К (50 °С) (відповідає температурі початку коагуляції білків тканин шкіри людини, під час якої можливо отримати опік);

- підвищення температури на виворітній поверхні проби матеріалів спецодягу за наперед визначений термін дії – 10 с (ця характеристика може бути віднесена до додаткових, але вона дає практичне уявлення про швидкість прогрівання матеріалу або пакета);
- захисний індекс відношення кількості тепла, що блоковано матеріалом (пакетом), до кількості тепла, що діє, за термін в 10 с, який обчислюють за формулою

$$I_{зах} = \frac{S_{t_0 t_n ra} - S_{t_n cr}}{S_{t_0 t_n ra}} \cdot 100, \quad (6)$$

де:  $I_{зах}$  – захисний індекс, %;  $S_{t_0 t_n ra} = 10(t_0 - t_n)$  – площа прямокутника  $t_0 t_n ra$  (див. рис. 1);

$S_{t_n cr} = \int_0^{10} t_2(\tau) d\tau - 10 \cdot t_n$  – площа криволінійної трапеції  $t_n cr$ . Якщо виконана апроксимація залежності  $t_1(\tau)$  і  $t_2(\tau)$ , то завжди можливо аналітично розрахувати критерії з рівнянь  $t_1 = t_1(\tau_4)$ ,  $t_2 = t_2(\tau_3)$ .

На рис. 2 зображено основні вузли, з яких складатиметься прилад для визначення теплозахисних параметрів теплозахисного одягу пожежника (ТЗОП): тепловий I та електровимірвальний II блоки.

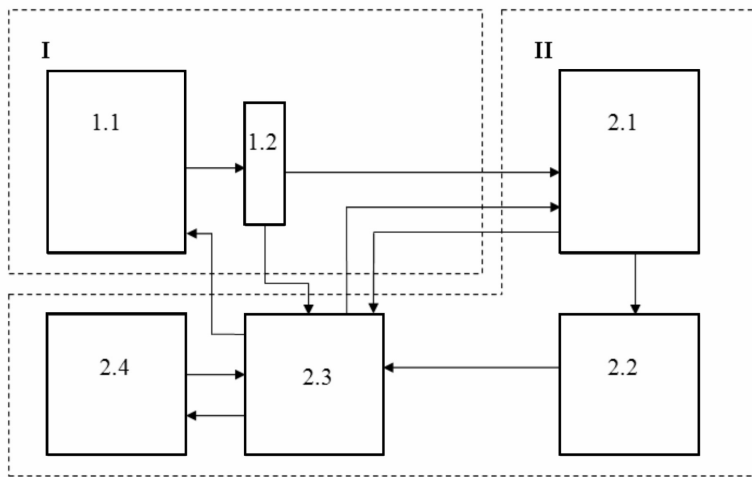


Рис. 2. Блок-схема приладу ОТВ-КД1 для оцінки теплозахисних властивостей спеціальних матеріалів ТЗОП

2.1, пристрою приймання та оброблення даних 2.2, пристрою синхронізації і запису інформації 2.3, а також ПК 2.4.

Структура приладу для дослідження теплофізичних параметрів ЗОП виконана відповідно до рекомендацій щодо загальної схеми теплофізичних приладів. Згідно з цими рекомендаціями прилад має містити тепловий та електровимірвальний блоки (рис. 3)

Управління відповідними блоками, які входять до складу приладу ОТВ-КД1, реєстрацію та оброблення даних неможлива без застосування спеціального програмного забезпечення (ПЗ). Розроблення ПЗ здійснювалось з урахуванням оптимальних режимів виконання експерименту. До його складу входять: програма сканування, допоміжні, тестові та обробляючі програми (рис. 4).

Цей спосіб структури ПЗ дає змогу змінювати або доповняти окремі складові, зберігаючи інші незмінні [12]. Усі програми приладу ОТВ-КД1, які входять до його складу, розроблено так, що можуть виконуватися незалежно одна від іншої.

До функцій та складу теплового блоку належать: визначення граничних умов 1.1, кріплення перетворювачів температури та блока для моделювання теплової радіації (ІЧ-випромінювання, конвекційного та контактного тепла, відкритого полум'я) 1.2, закріплення випробувального зразка 1.3. Електровимірвальний блок складається з пристрою дзеркального сканування

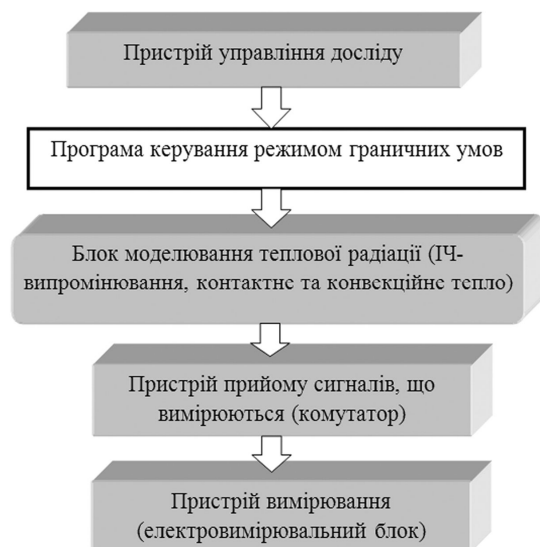


Рис. 3. Загальна структурна схема приладу ОТВ-КД1

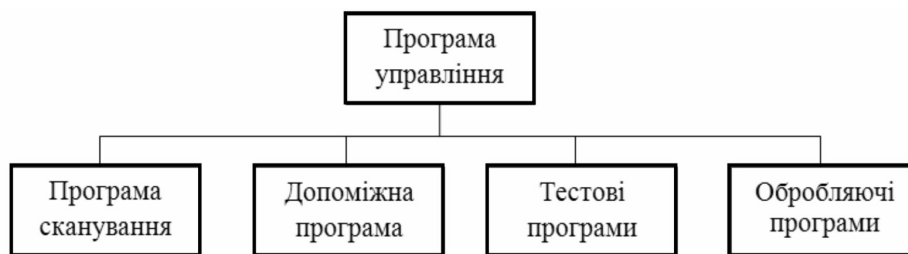


Рис. 4. Схема програмного забезпечення

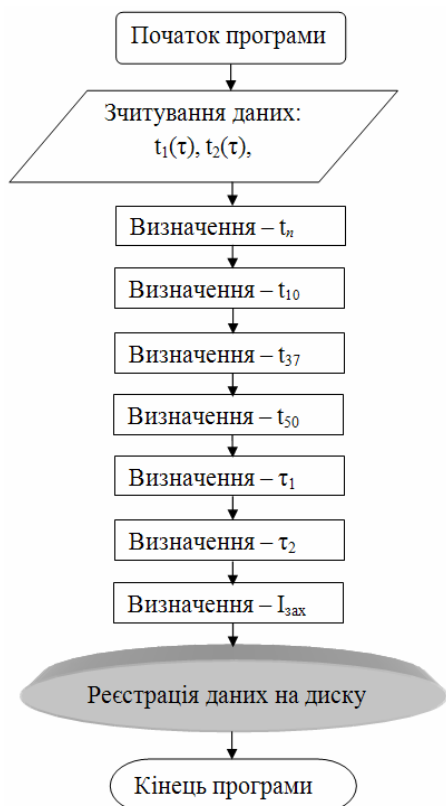


Рис. 5. Алгоритм визначення критеріїв оцінки теплозахисних властивостей матеріалів

Для обчислення даних експерименту ми розробили спеціальне ПЗ. До його структури належать програми визначення критеріїв оцінки та теплофізичних характеристик пакетів матеріалів (рис. 5). Спочатку, згідно з алгоритмом програми, ЕОМ здійснює підготовчі операції (відкриває файли, готує графічний інтерфейс). Далі ЕОМ зчитує дані експерименту і послідовно визначає:

- $t_1$  – температуру підвищення на виворотній поверхні проби до значення 310,15 К (37 °С) з відповідним часом її досягнення  $\tau_{37}$ ;
- $t_2$  – температуру підвищення на виворотній поверхні проби до значення 323,10 К (50 °С) з відповідним часом її досягнення  $\tau_{50}$ ;
- $t_n$  – початкову температуру випробувального взірця;
- $t_{10}$  – підвищення температури на виворотній поверхні проби за визначений період – 10 с;
- $I_{зах}$  – захисний індекс, %.

Дані, отримані ЕОМ, реєструють на диску в табличному файлі для подальшого використання. В кінці програми ЕОМ виконує спеціальні операції з переведенням їх у графічний інтерфейс.

Програма визначення критеріїв оцінки теплозахисних властивостей матеріалів (пакетів) ЗОП вміщує дві підпрограми, які призначені для опрацювання даних в регулярній або стаціонарній стадіях експерименту (рис. 5). До регулярної стадії виконання експерименту входять такі показники:

а) мінімальна кількість вузлів ( $m$ ), що розраховується за формулою:

$$m = \frac{1}{M_k} \sum_{z=1}^f \delta_z, \quad (7)$$

б) коефіцієнт теплопровідності проби матеріалу  $\lambda$ , Вт/(м·К);

в) тепловий опір проби  $R$ , К/(Вт/м<sup>2</sup>);

г) питома теплоємність проби  $c$ , (Дж/кг·К).

У виразі (7) введено такі позначення:  $f$  – кількість шарів матеріалу (пакета);  $\delta_z$  – товщина  $z$ -го шару (пакета), м;  $M_k$  – найбільше спільне кратне товщині шарів матеріалу (пакета).

Відповідно визначають межі стаціонарної стадії, які вміщують такі дані:

а) константа  $C$ , яка визначається на стаціонарній стадії експерименту щільності теплового потоку, що проходить крізь пробу до тіла людини, складаючи таку систему:

$$q_{np} = q_1 = q_n = C, \quad (8)$$

б) коефіцієнт теплопровідності проби матеріалу  $\lambda$ , Вт/(м·К);

- в) тепловий опір проби  $R$ ,  $K/(Вт/м^2)$ ;
- г) температура дії на пробу,  $K$ .

За програмою розрахунку теплофізичних характеристик ЕОМ виконує аналіз матриці даних, знаходить початок і кінець стадії експерименту, виконуючи їхнє оброблення. Надалі ЕОМ послідовно розраховує усі показники матеріалу.

Як ми бачимо, алгоритм керування програмою є нескладний, але водночас досить ефективний під час дослідження обраного напрямку. Робоче вікно комп'ютерної програми зображено на рис. 6.

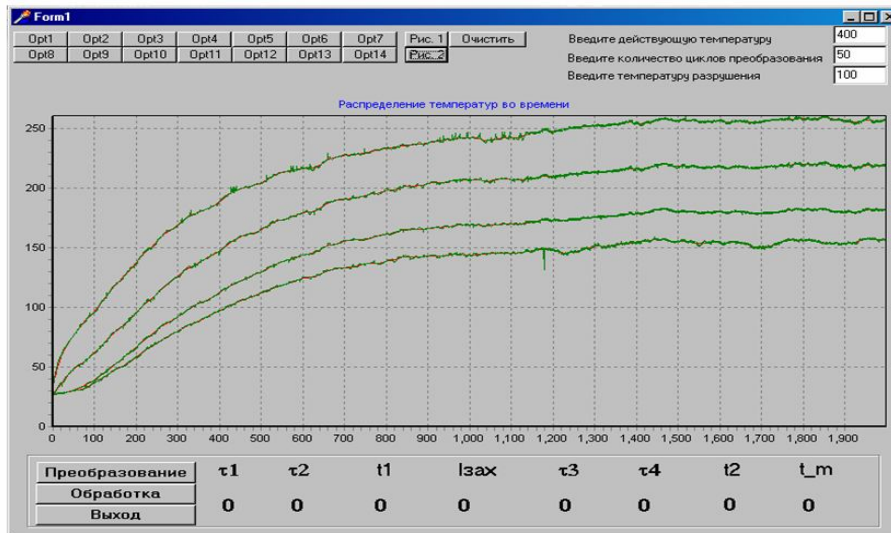


Рис. 6. Робоче вікно програми Form.1

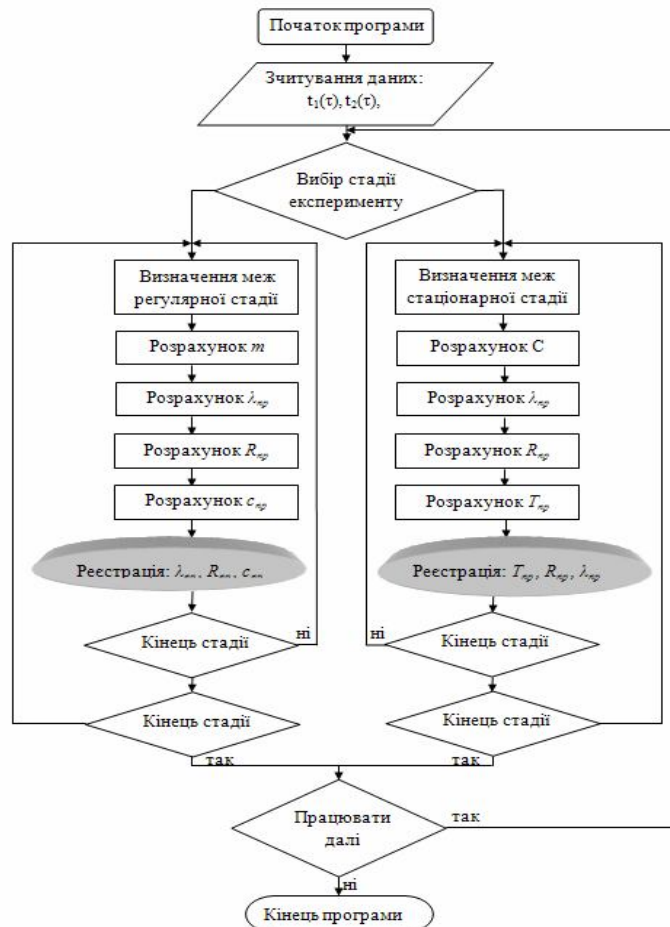


Рис. 7. Схема визначення критеріїв оцінки теплозахисних властивостей матеріалів

**Висновок.** Сучасні матеріали відрізняються один від одного не лише своїм сировинним складом, а й видом покриття, товщиною та іншими фізико-механічними властивостями. Розрахунки показали, що для отримання результатів із середнім значенням граничної похибки до 5 % і довірчою імовірністю 0,95 на розробленому приладі ОТВ-КД1 достатньо виконати 4 експериментальних випробування.

Програмне забезпечення вміщує програми: програма сканування, допоміжні, тестові та обробляючі програми. Ієрархічно-модульний спосіб організації дає змогу змінювати або доповнювати окремі складові ПЗ. Керування блоками, реєстрацію та оброблення даних ЕОМ виконується за схемою теплової дії. Опрацювання даних здійснюється обробляючими програмами, які дають змогу здійснити: оброблення даних досліду, будувати двовимірну залежність, накладати графіки, виконувати апроксимацію даних.

### Список літератури:

1. **Болібрux Б.В.** Особливості проведення випробувань термозахисних властивостей спеціальних матеріалів захисного одягу пожежників / Б.В. Болібрux, Б.В. Штайн, В.В. Присяжнюк // Матеріали VI всеукраїнської наукової конференції : зб. наук. праць. – К. : Вид-во "Либідь". – 2006. – 236 с.
2. **Болібрux Б.В.** Узагальнений аналіз приладів по визначенню термозахисних властивостей та дослідження довговічності спеціальних матеріалів для виготовлення захисного одягу пожежників / Б.В. Болібрux, А.А. Мичко, Б.В. Штайн, З.В. Андрусак // Пожежна безпека : зб. наук. праць. – Львів : Вид-во ЛДУ БЖД. – 2006. – № 9. – С. 96-99.
3. **ДСТУ 4366-2006.** Пожежна техніка. Одяг пожежника захисний. Загальні технічні вимоги та методи випробування.
4. **ДСТУ 4125-2002.** Одяг захисний від дії тепла і полум'я. Метод оцінювання реакції матеріалів на дію теплового випромінювання.
5. **ДСТУ ISO 1368-2001.** Одяг захисний. Загальні вимоги (ISO 13688: 1998, IDT).
6. **ДСТУ ISO 6942-2001.** Одяг захисний тепло- та вогнетривкий. Оцінювання теплопровідності матеріалів, що зазнають дії джерела теплового випромінювання (ISO 6942:1993, IDT).
7. **ДСТУ EN 532:2001.** Одяг захисний. Захист від високої температури та полум'я. Метод випробування та обмеженість поширення полум'я (EN 532: 1994, IDT).
8. **ДСТУ EN 340:2001.** Одяг спеціальний захисний. Загальні вимоги (EN 340: 1993, IDT).
9. **Лыков Л.В.** Теплообмен : справочник. – М. : Изд-во "Энергия", 1972. – 560 с.
10. **Чумаков Е.П.** Оптимальные и адаптивные системы. – М. : Изд-во "Энергоатомиздат", 1987. – 256 с.
11. **Хохлов Н.В.** Управление риском. – М. : Изд-во "ЮНИТИ", 2001. – 239 с.
12. **Орлов С.А.** Технология разработки программного обеспечения (Разработка сложных программных систем). – СПб. : Изд-во "Питер", 2002. – 464 с.

**Б.В. Штайн, Б.В. Болібрux, канд. техн. наук, доцент, В.В. Кошеленко, канд. техн. наук, доцент (Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности)**

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НОВОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ

Предложено программное обеспечение для методики испытания пакета специальных материалов теплозащитной одежды пожарного, которое позволяет анализировать и высчитывать исследуемые параметры при проведении испытания, которое обеспечивает объективную оценку термических показателей качества исследуемых материалов для последующего их выбора, а также оптимизации. Установлено, что иєрархически модульный способ организации дает возможность изменять или дополнять отдельные составляющие программного обеспечения. Управление блоками, регистрацию и обработку данных ЭВМ выполняется по схеме теплового действия. Проработывания данные осуществляется обрабатывающими программами, которые позволяют осуществить: обработку данных опыта, строить двумерную зависимость, настраивать графику, выполнять апроксимацию данных.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, теплозащитная одежда пожарных.

*B.V. Shtayn, B.V. Bolibrukh, Assoc. prof., V.V. Koshelenko, Assoc. prof. (Lviv State University of Vital Activity Safety)*

### **NEW METHOD OF RESEARCH OF HEATCOVER PROPERTIES OF PROTECTIVE CLOTHING OF FIREMEN SOFTWARE**

Software is offered for the method of test of package of the special materials of heatcover clothes of fireman, which allows to analyse and calculate the probed parameters during testing, which provides the objective estimation of thermal indexes of quality of the probed materials for subsequent their choice and also optimization. It is set that the hierarchically module method of organization enables to change or complement the separate constituents of software. Management, registration and treatment of these COMPUTERS, blocks executed after the chart of thermal action. Workings given carried out the processing programs which enable to carry out: treatments given of experience, to build dvovimirnu dependence, impose graphic arts, execute approximation of information.

**Keywords:** mathematical design, heatcover clothes of firemen.