

9. Кавецький В.В., Міщенко С.М., Антонов А.В. Основні принципи вибору типів та необхідної кількості вогнегасників для протипожежного захисту об'єктів. // Науковий вісник УкрНДППБ. 2002, № 1. С. 154-160.
10. Чеповський В.О., Міщенко С.М., Кравецький В.В., Гладішев О.В. Удосконалення нормативного регулювання якості виготовлення та експлуатації вогнегасників. // Науковий вісник УкрНДППБ. 2003, № 2. С. 99-103.
11. Ковалишин В.В., Копистинський О.Р., Чернов С.М., Міщенко С.М., Гладішев О.В. Проблеми нормування кількості вогнегасників для протипожежного захисту об'єктів України // Науковий вісник УкрНДППБ. – 2003. - № 2. – С. 131-137.
12. Чернов С.М., Ковалишин В.В. Проблеми використання вогнегасників як первинного засобу гасіння пожежі. // Пожарная безопасность 2003. Материалы VI научно-практической конференции. – Харьков: АПБУ, 2003. – С. 224-226.
13. Сопенко С.І., Кравецький В.В. Визначення норм належності вогнегасників розрахунковим методом з урахуванням можливого впливу на оператора небезпечних факторів пожежі. // Науковий вісник УкрНДППБ. – 2003. - № 2. – С. 123-130.
14. Смирнов Н.В. Прогнозирование пожарной опасности строительных материалов. Совершенствование методологии исследований и испытаний, классификации и нормирования // Пожарная безопасность. - 2002. - № 3. - С. 58-68.
15. Калинин М.И. Питание. Здоровье. Двигательная активность. – К.: Наукова думка, 1990. – 176 с.
16. Холщевников В.В. Исследование людских потоков и методология нормирования эвакуации людей при пожаре. – М.: МИПБ МВД России, 1999. – 93 с.
17. Кисляков В.М., Филиппов В.В., Школяренко И.А. Математическое моделирование и оценка условий движения автомобилей и пешеходов. – М.: Транспорт, 1979. – 200 с.
18. Бекасов В.А., Богдад Г.Я., Зотов Б.Л., Индиченко Г.Г. Автотехническая экспертиза. – М.: Юридическая литература, 1967. – 255 с.

УДК 687.4: 338.4

Б.В.Болібрux, А.А.Мичко, д.т.н., професор (Львівський інститут пожежної безпеки МНС України, м Львів)

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕМЕНТАХ ОДЯГУ ПОЖЕЖНИКІВ

На підставі застосування теорії спалаху та теорії горіння полімерних матеріалів запропоновано математичну модель теплових процесів для випробування матеріалів захисного спецодягу пожежних при високих температурах і проведено теоретичний аналіз теплових режимів, що характеризують можливість підвищення термостійкості композиційних матеріалів спецодягу пожежників та умов, що визначають довговічність вказаного виду одягу

В пожежній справі важливою проблемою є уточнення термінів експлуатації спецодягу при використанні та проектуванні нових термостійких матеріалів. При цьому бажано підвищити тривалість експлуатації спецодягу з врахуванням показників термостійкості.

Термостійкість спецодягу пожежників залежить від протидії його матеріалу руйнуванню під впливом температурного потоку високої інтенсивності. Термостійким вважається такий спецодяг, який захищає пожежника від негативного впливу теплових потоків.

Важливим фактором у забезпеченні довговічності спецодягу пожежників від дії теплових потоків високої інтенсивності є матеріал цього спецодягу, який характеризується

певними значеннями теплофізичних характеристик, що визначають тривалість проходження теплового потоку від зовнішньої поверхні до внутрішньої.

Основні характеристики та фізико-хімічні параметри спеодягу пожежників встановлювались експериментально. В останній час у зв'язку з розвитком інформаційних технологій стало можливим для аналізу параметрів та характеристик спеодягу і теплових режимів використовувати обчислювальний експеримент. Це дозволить прогнозувати особливості спеодягу і розробляти його нові конструкції.

В даний час не сформовано математичну модель (і відповідну методику обчислювального експерименту для аналізу числових значень параметрів), яка б розглядала полімерний композитний матеріал спеодягу пожежників як тришарову композицію з такими складовими частинами:

а) поверхневий шар між одягом і зовнішнім середовищем, в якому можуть проходити процеси горіння;

б) сердечник (основа);

в) поверхневий шар між одягом і внутрішнім середовищем, тобто між одягом і власне пожежником.

Розробці відповідної математичної моделі спеодягу і аналізу взаємозв'язків між товщиною матеріалу δ та фізичними характеристиками теплових процесів у ньому присвячена дана праця.

Теплопередача від зовнішнього джерела тепла до захисного матеріалу спеодягу пожежників може здійснюватися трьома способами [1]: теплопровідністю (кондуктивним теплообміном), конвекцією, тепловим випромінюванням. В захисному матеріалі можуть проходити багатостадійні окислювальні екзотермічні фізико-хімічні процеси термомасопереносу і подальші перетворення початкових речовин у продукти згорання.

Теплопровідність може виникати при безпосередньому контакті розжарених елементів конструкцій з матеріалом спеодягу. Конвекція є видом теплообміну, що відбувається завдяки повітряним потокам від джерела тепла до матеріалу. Теплопередача тепловим випромінюванням здійснюється у вигляді електромагнітних хвиль, що випромінюють нагріті поверхні тіл.

Для формування захисного матеріалу спеодягу пожежників використовують полімерний матеріал, зокрема, поліуретан. Горіння поліуретану може проходити у твердій (конденсованій) та газовій фазах. Кожній з цих фаз властиві певні зони та стадії горіння [2].

Тверда (конденсована) фаза (матеріал одягу) характеризується зоною піролізу та поверхневою зоною. Газову фазу можна умовно розділити на передполум'яну зону, зону полум'я та зону догорання. У цій фазі з полімерним матеріалом проходять хімічні зміни, а також горіння і догорання.

Під впливом зовнішніх теплових потоків газоподібні продукти горіння конденсованої речовини проникають в зовнішнє газоподібне середовище та реагують з ним на стадії окислення. Експериментально встановлено, що при відповідному моделюванні термодифузійних процесів можна припускати сталість теплофізичних характеристик газу та конденсованої фази, а також сталість та рівність коефіцієнтів масової дифузії та температуропровідності усіх газоподібних компонентів.

З деяким наближенням горіння поліуретану можна подати як послідовність наступних стадій [2]: а) деструкції; б) активних хімічних процесів; в) спалаху;

г) горіння; д) завершення процесу горіння (догорання).

Перші дві стадії математично описуються відомими рівняннями [1,2]:

- у твердій фазі:

$$\frac{dT}{d\tau} = \alpha_K \Delta t - \left(\frac{Q_{\text{мр}}}{C_K} \right) K_{\text{ок}} \exp\left(-\frac{E_K}{RT_S} \right) + \left(\frac{1}{\rho_K C_K} \right) \frac{dI_x}{dx} + \frac{\mu Q_{\text{ФК}} I_x}{\rho_K C_K}; \quad (1)$$

- у газовій фазі:

$$\frac{dT}{d\tau} = \alpha_{\Gamma} \Delta t + \left(\frac{Q_{\Gamma} C_{\text{OK}} C_{\text{M}}}{\rho_{\Gamma} C_{\Gamma}} \right) K_{\text{OF}} \exp\left(-\frac{E_{\Gamma}}{RT_s}\right), \quad (2)$$

де $a_k = \frac{\lambda_k}{\rho_k C_k}$, λ_k – коефіцієнти температуропровідності і теплопровідності поліуретану у конденсованій фазі; τ – час;

$a_{\Gamma} = \frac{\lambda_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma} C_{\Gamma}}$, λ_{Γ} – коефіцієнти температуропровідності і теплопровідності газової фази відповідно;

$\nabla^2 t = \Delta t$ – оператор Лапласа; $\nabla t = \vec{i} \cdot \partial(T_s - T_0) / \partial x$ і $\nabla^2 t = \partial^2(T_s - T_0) / \partial x^2$ – для одновимірного випадку; $t = T_s - T_0$; \vec{i} – одиничний вектор у напрямку товщини;

T_0 , T_s – відповідно, температура поверхні матеріалу початкова та в зоні нагріву;

$Q_{\text{пр}}$, $Q_{\text{ФК}}$, Q_{Γ} – кількість теплоти, що виділяється під час піролізу поліуретану, його фотохімічної реакції розкладу у конденсованій фазі та у газовій фазі відповідно;

C_{OK} – питома теплоємність окислювача у конденсованій фазі;

C_{M} , C_k , C_{Γ} – питома теплоємність матеріалу в нормальних умовах, в конденсованій та у газовій фазах відповідно;

ρ_k , ρ_{Γ} – об'ємна густина поліуретану у конденсованій та газовій фазах відповідно;

K_{OK} , K_{OF} – постійні параметри (фізичні характеристики матеріалу), що враховують температуру полімеру у твердій та газовій фазах відповідно;

E_k , E_{Γ} – енергія активації полімеру у конденсованій та газовій фазах;

R – універсальна газова стала;

I_x – функція поглинання теплового випромінювання;

μ – коефіцієнт поглинання теплового випромінювання;

x – координата в напрямку товщини одягу пожежника.

Граничні умови на межі розділу середовищ (фаз) наступні [1]:

$$\begin{cases} T_{(x,0)} = T_0; & T_{(\pm\infty)} = T_0; & T_{(0,\tau)_{\text{K}}} = T_{(0,\tau)_{\Gamma}}; \\ C_{(x,0)_{\Gamma}} = 0; & \lambda_{\text{K}} \left(\frac{dT}{dx} \right)_{(0,\tau)} = \lambda_{\Gamma} \left(\frac{dT}{dx} \right)_{(0,\tau)}. \end{cases} \quad (3)$$

Стадія спалаху матеріалу здійснюється у випадку, якщо є рівність температур на поверхні тіла та у сусідній з ним газовій фазі. При цьому швидкість утворення горючих газоподібних продуктів повинна бути достатньо великою, щоб відповідні процеси завершилися граничними значеннями їх концентрацій у газовому шарі.

Основними характеристиками спалаху є показники “період спалаху” та “температура спалаху” [2,3].

Температура спалаху – це найменша температура зовнішнього теплового потоку, при якій концентрація горючих компонентів піролізу матеріалу достатня для утворення стійкого полум'я у процесі поступового зростання інтенсивності зовнішнього теплового потоку, який діє на поверхню даного матеріалу. Відповідно, час від початку дії на матеріал зовнішнього джерела запалювання до моменту появи стійкого полум'я назвемо періодом спалаху τ_c .

Стадію спалаху (зокрема, τ_c) умовно розділимо на дві частини [3]:

$$\tau_c = \tau_1 + \tau_2, \quad (4)$$

де τ_1 – час нагріву зразка до температури газифікації;

τ_2 – час, необхідний для утворення стійкого полум'я під впливом зовнішнього джерела нагріву.

Аналіз складових елементів стадії спалаху (4) показує, що є два основних шляхи підвищення термостійкості та іскростійкості матеріалу спецодягу:

а) збільшення часу нагріву матеріалу до температури газифікації T_1 ;

б) запобігання утворення стійкого полум'я матеріалу спецодягу пожежника під дією зовнішнього джерела запалювання.

Перший шлях передбачає застосування фізико-технологічних способів і прийомів підвищення термостійкості та іскростійкості матеріалу спецодягу, а саме:

- збільшення товщини цього матеріалу;
- використання термостійких волокон;
- екранування поверхні матеріалу захисними покриттями;
- відведення тепла від зони горіння захисного матеріалу;
- охолодження зони нагріву (наприклад, водою) тощо.

Підвищення термостійкості та іскростійкості матеріалу спецодягу для другої стадії тривалістю τ_2 (4) здійснюється в основному за допомогою фізико-хімічних способів і прийомів, найбільш поширеними з яких є зменшення концентрації горючих компонентів, що утворюються в процесі нагріву при піролізі матеріалу даного спецодягу.

При передачі енергії тепловим випромінюванням та конвекцією, період спалаху може бути обчислений за відомою формулою [3]:

$$\tau_{is} = \tau_{cd} + \frac{\rho_k \cdot c_k (T_n - T_0)}{I_j (1-r)} \left[\frac{\pi \cdot a_k \cdot \rho_k \cdot c_k (T_n - T_0)}{4 \cdot I_0 (1-r)} + \frac{1}{\mu} \right], \quad (5)$$

де τ_{is} - період спалаху при теплопередачі тепловим випромінюванням;

τ_{cd} - час, який необхідний для здійснення реакції піролізу матеріалу спецодягу та дифузії реагентів у передполум'яну зону;

ρ_k - об'ємна густина матеріалу у конденсованій фазі;

c_k - питома теплоємність матеріалу у конденсованій фазі;

T_n - характеристична температура поверхні матеріалу, при якій починається його інтенсивний піроліз;

T_0 - температура зовнішнього оточуючого середовища;

I_0 - інтенсивність теплового потоку, що діє на матеріал спецодягу;

r - коефіцієнт відбивання теплового потоку;

a_k - коефіцієнт температуропровідності матеріалу у конденсованій фазі;

μ - коефіцієнт теплового опору матеріалу дії теплового випромінювання.

В залежності від інтенсивності теплового потоку, переважає та чи інша складова співвідношення [3].

Наприклад, під час попадання пожежника у вогненну зону відбувається миттєвий нагрів поверхні матеріалу спецодягу до характеристичної температури піролізу цього матеріалу та дифузії реагентів у передполум'яну зону. Тобто $\tau_{is} = \tau_{cd}$. В даному випадку для забезпечення достатньої термостійкості матеріалу спецодягу найбільш доцільним є впровадження усіх заходів і способів, які сприяють загальному збільшенню тривалості часу, що необхідний для здійснення реакції піролізу цього матеріалу та дифузії реагентів у передполум'яну зону.

Підвищення довговічності спецодягу пожежників може бути досягнуто за допомогою способів і прийомів, що забезпечують суттєве збільшення величини коефіцієнта теплового опору матеріалу спецодягу дії теплового випромінювання з одночасним збільшенням коефіцієнта відбиття цього теплового потоку.

При малій інтенсивності променистого потоку (наприклад, під час локальних дій на спецодяг розжарених елементів конструкцій) слід враховувати теплове запізнення. Воно

визначається, головним чином, прогрівом (теплопроводністю) матеріалу спецодягу пожежників, що слід враховувати під час проектування відповідного спецодягу.

Основні шляхи підвищення довговічності спецодягу пожежників наступні:

– удосконалення матеріалу спецодягу з метою збільшення часу, необхідного для піролізу його захисних елементів;

– застосування композиційних матеріалів з великою об'ємною густиною, підвищеними значеннями величини коефіцієнтів питомої теплоємності, температуропровідності, теплового опору та відбиття теплового потоку.

При теплопередачі тільки кондуктивним способом відносна температура поверхні матеріалу в зоні контакту з розжареними елементами конструкцій визначається рівнянням [4]:

$$Q_n = \frac{T_s - T_k}{T_o - T_k} = \frac{K_\xi}{K_\xi + 1} - \frac{2K_\xi}{(K_\xi + 1)^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-h)^{n-1} \operatorname{erfc} \frac{nR}{\sqrt{\alpha_1 \tau}}, \quad (6)$$

де Q_n – відносна температура поверхні матеріалу в зоні контакту з розжареними елементами конструкцій;

T_o – температура розжареного елемента конструкцій під час контакту з матеріалом спецодягу (зокрема, $T_o = 910^0 \text{ C}$);

T_k – початкова температура матеріалу спецодягу;

T_s – фактична температура поверхні матеріалу безпосередньо у зоні контакту з розжареними елементами конструкцій;

$\xi = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sqrt{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}}$ – відношення, яке характеризує теплову активність матеріалу спецодягу у

порівнянні з розжареними елементами конструкцій ;

λ_1, λ_2 – коефіцієнти теплопроводності розжарених елементів конструкцій та матеріалу спецодягу відповідно;

α_1, α_2 – коефіцієнти температуропровідності розжарених елементів конструкцій та матеріалу спецодягу відповідно;

$h = (1 - K_\xi)/(K_\xi + 1)$;

$\operatorname{erfc} \frac{nR}{\sqrt{\alpha_1 \tau}}$ – математична функція Крампа.

Оскільки під час контакту розжарених елементів конструкцій з матеріалом спецодягу граничні умови на поверхні цього матеріалу дещо відрізняються від граничних умов першого роду (у відповідності з якими на зовнішній поверхні спецодягу в будь-який момент часу мав би задаватись розподіл температури), при аналізі співвідношення (6) врахуємо деякі спрощуючі припущення, які обґрунтовані експериментально [2].

Зокрема:

– тепловий потік матеріалу спецодягу передається тільки під час його контакту з розжареними елементами конструкцій;

– матеріал спецодягу у початковому стані інертний відносно теплового потоку;

– масообміном між матеріалом спецодягу та розжареними елементами конструкцій нехтуємо;

– вважаємо, що хімічні реакції в елементах спецодягу залежать тільки від температури оточуючого газового середовища або температури розжарених елементів конструкцій, якщо відбувається контакт.

На підставі таких припущень рівняння (6) набирає вигляду:

$$T_o \approx T_s = T_n + (T_o - T_n) \left(1 + \frac{1}{K_\xi + 1} \right), \quad (7)$$

де T_s – температура спалаху матеріалу спецодягу при контакті з розжареними елементами конструкцій.

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що для виготовлення спецодягу, стійкого до процесу спалаху на границі, необхідно використовувати матеріали з невеликими значеннями коефіцієнта теплопровідності та високою температурою спалаху.

Стадії безпосереднього горіння та догорання композиційного матеріалу є завершальними для процесу горіння. Ці стадії характеризуємо густиною теплового потоку q , що йде на вигорання матеріалу [2]:

$$q = q_k + q_g = f(\rho, C, \nu, \delta, T_0, T_s), \quad (8)$$

де q_k – густина теплового потоку, що переноситься вздовж фронту поширення полум'я через конденсоване середовище, в якому відбувається горіння матеріалу,

q_g – густина теплового потоку, що переноситься вздовж фронту розповсюдження полум'я через газове середовище, в якому відбувається горіння матеріалу;

ρ – густина матеріалу спецодягу;

C – об'ємна теплоємність матеріалу спецодягу;

ν – швидкість горіння матеріалу у напрямку товщини;

$\nu_m = \nu \rho$ – масова швидкість горіння матеріалу;

δ – товщина матеріалу одягу пожежника ($0 < x < \delta$);

T_0 – температура оточуючого середовища;

T_s – температура поверхневого шару матеріалу в момент горіння.

Експериментально встановлено, що через газову фазу переноситься орієнтовно 10 % всієї енергії, яка йде на нагрівання матеріалу одягу до температури спалаху. Крім того встановлено екзотермічний характер процесу горіння матеріалу спецодягу [4].

Аналіз рівнянь математичної моделі горіння (1)–(8) і відповідних експериментальних результатів дає можливість стверджувати, що основними факторами, які визначають процес тепломасопереносу матеріалу спецодягу пожежників у процесі горіння, є:

1) густина матеріалу спецодягу;

2) об'ємна теплоємність матеріалу спецодягу;

3) початкові температури матеріалу і зовнішнього середовища;

4) швидкість горіння матеріалу у напрямку товщини;

5) товщина захисного матеріалу.

З врахуванням вищезазначеного, подамо наступне рівняння ситуації, яке узагальнює рівняння стану і описує процес прогорання композиційного матеріалу спецодягу внаслідок дії високих температур та контакту з розжареними елементами конструкцій [4]:

$$\nu_m = f(C_{ок}, P, T, \alpha_i, h), \quad (9)$$

де $C_{ок}$ – концентрація окислювача (кисню) в оточуючому середовищі;

P – тиск окислювача (кисню) в оточуючому середовищі;

T – температура в зоні полум'я;

α_i – термічні характеристики композиційного матеріалу спецодягу (усереднені коефіцієнти теплопровідності, температуропровідності, відбивання теплового (променистого) потоку, тепловий опір матеріалу тощо).

Аналіз даного співвідношення (9), яке в загальному випадку є нелінійне, показує, що основними можливостями збільшення термостійкості та іскростійкості спецодягу пожежних є:

- зменшення до мінімуму вмісту в матеріалах спецодягу компонентів, які легко піддаються горінню;
- збільшення товщини захисного матеріалу;
- використання термостійких полімерних волокон;

- використання захисних покриттів, які відбивають потік теплової енергії;
- створення на поверхні матеріалу спецодягу негорючих швів;
- збільшення теплового опору матеріалів одягу шляхом оптимальної комбінації компонентів композиції;
- запобігання доступу кисню до зони горіння;
- розробка методик охолодження зони горіння фізико-хімічними способами.

Якщо одяг знаходиться у середовищі, температура якого $T_{c1} = 200^\circ \text{C}$, протягом часу $\tau = 25$ хв, чи $\tau = 20$ хв, то можна перехідний процес не розглядати, оскільки установлений режим для числового значення коефіцієнта теплопровідності $a_K = 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ [5], що відповідає спецодягу пожежника, настає через кілька секунд після початку дії високої температури. У таких випадках температурне поле вважають квазістаціонарним.

Для квазістаціонарного температурного поля характерний закон конвективного теплообміну між поверхнею тіла і оточуючим (газовим) середовищем. У цьому випадку кількість теплоти, що передається в одиницю часу з оточуючого середовища на одиницю площі поверхні твердого тіла (при $x = x_g$ для одновимірної ситуації) пропорційна різниці температур між поверхнею тіла T_{11} і оточуючим середовищем T_{12} , тобто виконується гранична умова третього роду [1]:

$$\lambda_K \frac{dT}{dx} + \zeta_i \cdot (T_{11} - T_{12}) = 0 \quad \text{при } x = x_g. \quad (10)$$

Тут ζ_i – коефіцієнт теплообміну поверхневого шару на границі розділу двох середовищ (наприклад, між конденсованим і газовим).

У першому наближенні одяг пожежника моделюємо безмежною по y і z тришаровою пластиною, товщина якої δ ($0 < x < \delta$). Для квазістаціонарного стану при відсутності внутрішніх джерел тепла і обмежуючих припущеннях диференціальне рівняння теплопровідності (1) набуває вигляду

$$\text{div}(\lambda_K \nabla T) = 0. \quad (11)$$

Для одновимірного температурного поля, коли припускаємо залежність температури тільки від одної координати, розв'язок диференціального рівняння (11) при постійному коефіцієнті теплопровідності ($\lambda_K = \text{const}$) запишемо так:

$$T = M_1 \cdot x + M_2. \quad (12)$$

Конкретизуємо граничні умови (10):

$$\lambda_K \frac{dT}{dx} + \zeta_i \cdot (T_{c1} - T_{i0}) = 0 \quad \text{при } x = 0, \quad (13)$$

$$\lambda_K \frac{dT}{dx} + \zeta_j \cdot (T_\delta - T_{c2}) = 0 \quad \text{при } x = \delta, \quad (14)$$

де T_{c1} , T_{c2} – значення температури газу з лівої ($x = 0$) і правої ($x = \delta$) сторін пластини відповідно; T_{i0} , T_δ , ζ_i , ζ_j – температури матеріалу та коефіцієнти теплообміну поверхневого шару спецодягу з лівої ($x = 0$) і правої ($x = \delta$) сторін пластини відповідно; $x < 0$ – зовнішнє газове середовище; $x > \delta$ – газове середовище між одягом і тілом пожежника.

Таким чином, розглядаємо полімерний композитний матеріал спецодягу пожежників як тришарову композицію з такими складовими частинами:

а) поверхневий шар (фізична поверхня нульової товщини) між одягом і зовнішнім середовищем, якому відповідає параметр ζ_i ;

- б) сердечник (основа) ($0 < x < \delta$);
 в) поверхневий шар (фізична поверхня нульової товщини) між одягом і внутрішнім середовищем, якому відповідає параметр ζ_j .

З врахуванням граничних умов (13), (14) розподіл температури в межах пластини, яка моделює одяг, такий [1]:

$$T = T_{c1} - (T_{c1} - T_{c2}) \cdot (x/\lambda_K + 1/\zeta_i) / (\delta/\lambda_K + 1/\zeta_i + 1/\zeta_j). \quad (15)$$

Приймаючи стандартне значення товщини спецодягу $\delta = 0,5$ мм, експериментально встановлено для даної δ можливість знаходження пожежника у середовищі з температурою $T_{c1} = 200^\circ \text{C}$ і відповідна внутрішня температура у газовому проміжку між ним і спецодягом не перевищує $T_{c2} = 40^\circ \text{C}$. При цьому експериментально і на основі обчислювального експерименту встановлено, що коефіцієнт теплопровідності композитного захисного матеріалу не перевищує $\lambda_K = 0,06$ Вт/(м·К), а коефіцієнти теплообміну поверхневого шару спецодягу набирають наближеного значення $\zeta_i = \zeta_j = 84$ Вт/(м²·К).

З допомогою співвідношення (15) знаходимо потік тепла:

$$q_x = -\lambda_K \frac{dT}{dx} = (T_{c1} - T_{c2}) / (\delta/\lambda_K + 1/\zeta_i + 1/\zeta_j). \quad (16)$$

Для вище приведених даних $\delta = 0,5$ мм, $T_{c1} = 200^\circ \text{C}$, $\lambda_K = 0,06$ Вт/(м·К), $\zeta_i = \zeta_j = 84$ Вт/(м²·К), $T_{c2} = 40^\circ \text{C}$ отримано $q_x = 1680$ Вт/м².

Аналогічно отримано числові значення параметрів q_x , T_{c2} для менших товщин одягу δ і подано у таблиці 1.

Таблиця 1

Залежність температури внутрішнього середовища T_{c2} та інтенсивності теплового потоку q_x від товщини δ матеріалу захисного спецодягу

δ , мм	T_{c2} , °С	q_x , Вт/м ²
5	40	1680
4,5	41,7	1821
4	43,7	1989
3,5	46,1	2191
3	49,0	2349

Отримані в табл.1 результати відображають нелінійний характер зміни взаємозалежностей між представленими трьома параметрами δ , T_{c2} , q_x . Зокрема, при зменшенні δ на 22,2 % числові значення T_{c2} та q_x зростають на 8,8 % і 16,8 % відповідно. При зменшенні δ на 50 % числові значення T_{c2} та q_x зростають на 20 % і 33 % відповідно.

Висновки

На основі теорії спалаху та теорії горіння полімерних матеріалів запропоновано одновимірний варіант (по осі x) математичної моделі теплових процесів для захисного спецодягу пожежників при високих температурах.

Проведено теоретичний аналіз теплових режимів, що характеризують основні стадії процесу горіння.

Розроблено методику обчислювального експерименту для аналізу параметрів теплових процесів запропонованої математичної моделі. На основі відповідних експериментальних даних і числових розрахунків встановлено, що якщо коефіцієнт теплопровідності