

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕДАЧІ ТЕПЛА ДО ТКАНИНИ ЧЕРЕЗ ІНТУМЕСЦЕНТНЕ ПОКРИТТЯ^{1, 2}**Цапко Ю.В.**, д.т.н., професор,

juriyts@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0625-0783

¹**Бондаренко О.П.**, к.т.н., доцент,

bondolya3@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8164-6473

^{1, 3}**Цапко О.Ю.**, к.т.н., с.н.с.,

alekseytsapko@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2298-068X

¹**Нерода В.П.**, магістр,

v.nerodaa@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5139-866X

¹*Науково-дослідний інститут в'язучих речовин і матеріалів ім. В.Д. Глуховського
Київський національний університет будівництва та архітектури
пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, 03037, Україна*²*Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 12в, м. Київ, 03041, Україна*³*Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс"
вул. Казимира Малевича, 84, м. Київ, 03150, Україна*

Анотація. Проблема застосування виробів з тканин для будівельних конструкцій із зберігання та транспортування вибухових речовин полягає в забезпеченні їх стійкості до дії вогню та довговічності при експлуатації, але необхідно враховувати зміну їх вогнезахисних властивостей. Зниження горючості і розроблення важкогорючих та важкозаймистих матеріалів є одним із основних напрямків попередження виникнення пожеж та вирішення проблеми розширення області застосування цих матеріалів. Оброблення засобами вогнезахисту суттєво впливає на поширення полум'я, дозволяє набагато зменшити димоутворювальну здатність та тепловиділення. Тому об'єктом досліджень була парусинова тканина, яка була вогнезахиснена інтумесцентним покриттям. Проведено моделювання та отримані залежності, що дозволяють розрахувати значення теплового потоку на межі «шар пінококсу – тканина» залежно від дії температури. Доведено, що в процесі термічного впливу на тканину проходить процес перенесення високої температури та її загорання. На основі одержаних результатів натурних випробувань з визначення процесу передавання високої температури полум'я через покриття встановлено, що при дії полум'я на необроблені модельні зразки елементів намету, виготовлених з парусинової тканини, відбувається її займання на 45 с та поширення полум'я поверхнею, що призводить до повного згорання протягом 108 с. Характер вигорання для модельного зразка елементів намету, який оброблений вогнезахисним інтумесцентним покриттям, показав відсутність поширення полум'я після вигорання вогнища та зафіксовано спучення захисного покриття, що сягало 7...8 мм. Практична цінність отриманих результатів при визначенні властивостей парусинової тканини, вогнезахисненої інтумесцентним покриттям, дозволяє встановити умови експлуатації виробів і будівельних конструкцій на її основі.

Ключові слова: вогнезахист тканини, спучуючі покриття, тепловий потік, оброблення поверхні, теплофізичні властивості.

Вступ. Зберігання та транспортування вибухових речовин тісно пов'язане з застосуванням найрізноманітніших будівельних та пакувальних виробів, які виготовляються у тому числі з текстильних матеріалів [1-2]. Процес займання та поширення горіння при цьому носить прогресуючий характер, оскільки дані матеріали легкозаймисті і швидко поширюють полум'я, а методів ліквідації пожежі вкрай недостатньо. Все це призводить до активного горіння та послідовного вибуху і розповсюдження новітніх осередків.

Статистика пожеж у Збройних Силах України свідчить про необхідність формування ефективної системи забезпечення вибухопожежобезпеки військових об'єктів, особливо місць зберігання запасів боєприпасів. Також важливим є приведення її до стану, спроможного забезпечити надійний захист особового складу та об'єктів Збройних Сил України від пожеж і вибухів. Велике значення для покращення стану вибухопожежобезпеки, запобігання і своєчасного реагування на такі події є проведення заходів по охороні військових об'єктів. Для цього об'єкти, крім обладнання спеціальними системами технічних засобів охорони, системами раннього виявлення надзвичайних ситуацій та оповіщення, мотивуються проведенням заходів профілактичного спрямування, зокрема вогнезахисне оброблення горючих матеріалів ефективними покриттями.

Тому дослідження, що направлені на визначення закономірностей передачі теплового потоку до тканини через інтумесцентне покриття, впливу покриттів на цей процес є невирішеною складовою забезпечення пожежобезпеки. А також визначають необхідність розроблення та використання спеціальних захисних засобів. Що і обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В роботі [3] обговорюється широкий діапазон високоефективних волокон, доступних для вогнестійкого кінцевого використання. Також представлено типи вогнестійких покриттів та обробок. Особливо актуальними є технології, що розвиваються для надання термо- та вогнестійкості і вони включають використання інтумесцентних методів обробки та потенційну корисність нанотехнологій, яким протягом останніх 10 років приділялося багато уваги на дослідницькому рівні. Термо- та вогнестійкі текстильні вироби можуть відповідати вимогам за вогнестійкістю, і при цьому зберегти свої спеціальні характеристики, що обумовлює їх застосування, у тому числі і для військових цілей. Але не наведені відповідні фізико-хімічні дані щодо зміни їх властивостей в процесі експлуатації.

В роботі [4] наведено результати експериментальних досліджень щодо моделювання ефективності вогнезахисту легко зведених конструкцій з текстильних займистих виробів. Проведеними дослідженнями з визначення пожежонебезпечних властивостей текстильних матеріалів встановлено загорання необробленого зразка, натомість для вогнезахищеного – процес займання та поширення полум'я не відбувся. Гальмування процесу займання та поширення полум'я для такого зразка пов'язане з розкладом антипіренів під дією температури з поглинанням тепла та виділенням негорючих газів (азот, діоксин вуглецю), зміною напрямлення розкладу в сторону утворення негорючих газів і важкогорючого коксового залишку. Проте, не досліджено закономірності процесу передачі тепла до тканини через захисне покриття.

В роботі [5] показано можливість отримання екологічно чистих, ефективних, вогнестійких бавовняних тканин. Оброблені бавовняні тканини (COTR) показали чудову термічну стабільність і вогнестійкість з граничним кисневим індексом (LOI), який становив 42,5%. Порівняно з іншими вогнетривкими бавовняними тканинами, COTR продемонстрував надзвичайну стійкість до прання, LOI залишався на рівні 28,3% після 50 циклів прання. Випробування на вертикальне горіння та конусна калориметрія продемонстрували самозатухання та значно покращили вогнестійкість COTR. Пікова швидкість тепловиділення та загальне тепловиділення COTR помітно знизилися на 65,5 та 71,4% відповідно. Крім того, було виявлено нижче утворення та виділення диму зі зменшенням загального утворення диму на 12,5% і загальної кількості диму на 18,8%, порівняно з необробленою бавовняною тканиною. Було припущено, що підвищена вогнестійкість COTR каталізує дегідратацію та карбонізацію целюлози, сприяючи утворенню залишкового вугілля, зменшує виділення горючих газів і тепло/масообмін. Однак, не вказано, як витримують дані композиції зміну температурно-вологісних умов.

В роботі [6] досліджувалися теплоізоляційні властивості необроблених і оброблених тришарових трикотажних тканин різної товщини (2 мм, 3 мм і 4 мм) за допомогою кремнеземних аерогелів. Три зразки спейсерних тканин (300GSM, 350GSM, 540GSM) були покриті нанопористим силікагелем при температурі 26°C, а потім витримані для старіння,

заміни розчинника, модифікації поверхні. Досліджено такі характеристики, як термостійкість, теплопровідність, кут розташування ниток, пористість, повітропроникність зразків прокладочної тканини. Аналіз за допомогою скануючої електронної мікроскопії та інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є були проведені для дослідження морфології та зміни поверхні, ініційованої кремнеземним покриттям. Експериментальні результати показали, що оброблені уточні трикотажні розділові тканини з 350GSM мають вищий термічний опір ($0,09131 \text{ м}^2 \cdot \text{кВт}^{-1}$), вищий коефіцієнт пористості, вищу повітропроникність, більший кут розташування та меншу щільність.

В роботі [7] представлено результати досліджень, проведених з метою отримання деяких екологічно чистих матеріалів для теплозахисту та ізоляції, призначених для використання у виробництві герметичних упаковок, мембран, рукавів, захисних футлярів і штор, засобів захисту від високих температур та пожежної небезпеки. Такі матеріали, виготовлені з вогнетривкої текстильної основи та покривного полімерного матеріалу. Текстильною основою була вогнетривка тканина різної фактури та товщини, отримана з термостійких акрилових волокон. Термостійкі еластомерні сполуки, такі як хлоропрен, змішаний з сажею HAF і хлоридом сурми, використовувалися як покривні матеріали. Екологічно чисті водні нанодисперсії для покриття вогнетривких текстильних виробів були отримані за рахунок покращення адгезії поліхлоропрену шляхом хімічного щеплення поліхлоропренового латексу Dispercoll C 84 з метилметакрилатом у присутності пероксиду бензоїлу як ініціатора. Отримані безазбестові матеріали термо-, хімічностійкі, пожежобезпечні. Однак, не показано вплив зміни середовища на покриття, процес його руйнування з часом.

В роботі [8] показано використання смоли на основі меламіну, яка широко використовуються в тканинах для підвищення вогне- і теплостійкості. Проте, модельовані експерименти з пранням припускають, що за один раунд прання водою 76...90 % меламіну було видалено з одягу. А тому постає задача зафіксувати антипірен у матеріалі.

В роботі [9] відображено розкладання вогнестійких матеріалів через підвищену температуру або контакт з полум'ям, що призводить до появи ряду хімічних сполук, деякі з яких можуть бути досить токсичними для людини. Проводились невеликі або стендові випробування продуктів розкладання, але завжди виникали питання щодо того, чи були іспити репрезентативними для повномасштабних результатів випробувань на спалах. Щоб визначити, чи достатньо для вимірювання продуктів розкладу та чи будуть різні вогнестійкі матеріали утворювати «фірмовий» набір сполук, було проведено повномасштабне тестування. Однак, механізм спучення покриття при цьому не вказаний та не виявлені умови експлуатації покриття.

В роботі [10] неткані матеріали були виготовлені з використанням вогнезахисних поліефірних (ПЕТ) порожнистих волокон (волокна FR-PET) та волокон ПЕТ з низькою температурою плавлення (волокна з низьким вмістом ТМ) для використання в якості теплоізоляції. Чотири неткані матеріали з різними технологічними шляхами були використані для виробництва сипучих нетканних матеріалів (LNF), термопресованих нетканних матеріалів (PNF), голкопробивних та термічнопресованих нетканних матеріалів (NPNF), а також голкопробивних та повітронепроникних нетканних матеріалів (NTNF). Оцінювали теплопровідність цих чотирьох нетканних матеріалів. Крім того, були створені LNF з використанням різних температур термічного пресування (100, 120, 140, 160, 180 та 200 °C), вмісту волокна з низьким вмістом ТМ (10, 20, 30, 40 та 50%) та кількості шарів нетканних матеріалів (1, 2, 3, 4 і 5 шарів) для оцінки міцності на розрив, теплопровідності та обмежувального показника кисню (LOI). Експериментальні результати показують, що LNF мали низьку теплопровідність – $0,5962 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, а LOI становив 35%.

Робота [11] присвячена визначенню теплопровідності рідкофазних матеріалів зі зміною фази (PCM) поблизу точки плавлення шляхом вивчення процесу еволюції поверхні розділу «тверда речовина-рідина». Було запропоновано теоретичну модель, яка дозволяє визначати теплопровідність за характеристики зміщення поверхні розділу під час процесу плавлення. Експерименти проводилися з використанням добре розробленої системи тестування для двох видів неорганічних PCM і експериментальні результати узгоджувалися з літературними

значеннями в діапазоні $\pm 6\%$. Джерела похибки вимірювань досліджувалися за часовими характеристиками зміни результатів експерименту. Виявлено, що неідеальні граничні умови тестової системи та початок природної конвекції були основними причинами похибки вимірювання. Щоб підвищити точність експериментальних результатів були використані чисельні методи для моделювання процесу плавлення в експериментах. Калібровані значення теплопровідності були отримані ітераційно з порівняння кривих руху межі розділу між експериментами та моделюванням, а розбіжності між каліброваними результатами та еталонними значеннями були обмежені до $\pm 3\%$.

Таким чином, з літературних джерел встановлено, що вогнезахисні покриття здатні захищати поверхню текстильного матеріалу від впливу вогню при експлуатації, але потребують значної кількості захисної речовини та здатні до підвищення жорсткості тканин. Крім того, не визначені параметри, які забезпечують стійкість до втрати вогнезахисних властивостей. Недосконалість математичних моделей для пояснення і опису процесу передавання тепла, нехтування застосуванням речовин для утворення теплоізолювального шару призводить до неефективного застосування засобів захисту. Тому необхідність встановлення параметрів стійкості тканин до високої температури і впливу покриттів на цей процес обумовило проведення досліджень у даному напрямку.

Мета дослідження. Метою даної роботи є визначення характеру процесу передачі теплового потоку до тканини від дії високотемпературного полум'я пальника при захисті інтумесцентним покриттям.

Матеріали і методи досліджень. Для дослідження передачі теплового потоку використовували зразки парусинової тканини необроблені [12] (рис. 1) та оброблені модифікованим спучуючим покриттям «Firewall-Wood» виробництва України у кількості 260 г/м^2 .



а)



б)

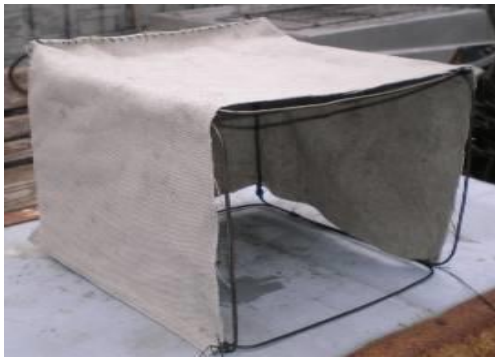
Рис. 1. Модельний зразок тканини:
а – до оброблення; б – після оброблення

Для виготовлення модельних зразків елементів намету, використовували парусинову тканину (рис. 2):

- необроблений (експериментальний зразок №1);
- оброблений модифікованим спучуючим покриттям «Firewall-Wood» (експериментальний зразок №2).

У якості пального для визначення ефективності вогнезахисту зразків елементів намету було використано рідку запалювальну суміш (бензин).

Результати досліджень. Для встановлення передачі теплового потоку до вогнезахисної тканини використовували метод вирішення задачі теплопровідності для двохскладової стінки, яка має різні теплофізичні властивості (рис. 3).



а)



б)

Рис. 2. Модельні зразки елементів намету, виготовлених з парусинової тканини:
а – необроблений; б – оброблений вогнезахисним інтумесцентним покриттям

В початковий момент часу покриття тканини миттєво нагрівається до температури T_{max} , яка підтримується постійною протягом всього часу нагрівання. При цьому покриття спучується та утворює шар пінококсу [13]. Розподілення температури проходить через шар пінококсу до досягнення критичної температури тканини на межі покриття і тканини T_s .

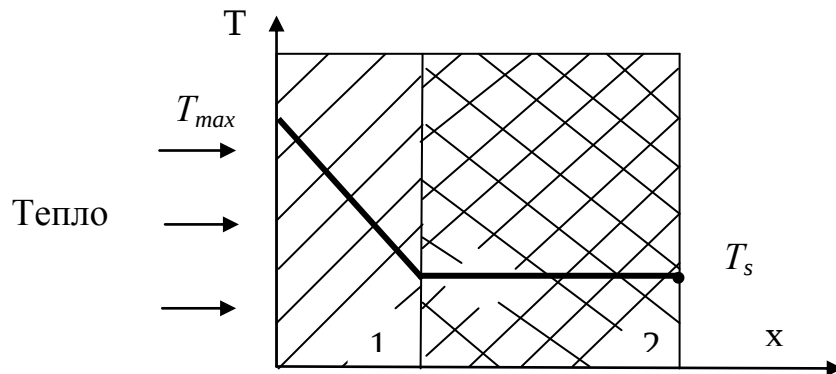


Рис. 3. Схема процесу передавання тепла:
1 – шар пінококсу; 2 – тканина

Диференціальні рівняння переносу тепла на межі двох пластин «шар пінококсу – тканина» мають наступний вигляд [14]:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - a_1 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) T = 0, \quad (-\infty < x < 0), \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - a_2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) T = 0, \quad (-\infty < x < 0; 0 < t < \infty), \quad (2)$$

з початковими та граничними умовами:

$$T|_{x=-\infty} = T_0, \quad T|_{x=\infty} = 0, \quad T|_{x=-0} = T|_{x=+0}, \quad (3)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=-0} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=+0}, \quad (4)$$

$$T|_{t=0} = \begin{cases} T_0 & x < 0 \\ 0 & x > 0 \end{cases}, \quad (5)$$

$$T_0, a_1, a_2, \lambda_1, \lambda_2 = \text{const}, \quad (6)$$

де a_1, a_2 – коефіцієнт теплопровідності шару пінококсу та тканини, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;
 λ_1, λ_2 – коефіцієнт теплопровідності шару пінококсу та тканини, $\text{Вт/м} \cdot \text{К}^{-1}$;
 T – температура, $^{\circ}\text{C}$,
 x – координата, м.

Доцільним є визначення значення температури на межі «шар пінококсу – тканина» (T_s) і теплового потоку між даними областями [15]:

$$Q_m = \lambda_2 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=+0}. \quad (7)$$

Робимо підстановку з врахуванням початкової умови для лівої напівплощини, яка не дорівнює нулю ($x < 0$):

$$T = T_0 - T_s, \quad (8)$$

де T_0 – максимальна температура на межі «шар пінококсу – тканина».

З урахуванням вищевикладеного задача з визначення температури T_s буде мати наступний вид:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - a_1 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) T_s = 0, \quad (-\infty < x < 0; 0 < t < \infty), \quad (9)$$

з наступними умовами:

$$T_s|_{x=-\infty} = 0, \quad T_s|_{t=\infty} = 0. \quad (10)$$

З урахуванням перетворення Лапласа для області $x < 0$ можемо записати зв'язок температури і теплового потоку у наступному виді [16]:

$$\left(P^{1/2} - \sqrt{a_1} \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot T_s|_{x=0} = 0, \quad (11)$$

де P – оператор Лапласа.

З урахуванням початкової змінної температури T отримуємо:

$$P^{1/2} (T_0 - T_s) = \frac{T_0}{\sqrt{\pi \cdot t}} - P^{1/2} \cdot T_s = -\sqrt{a_1} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0}. \quad (12)$$

Тоді для області $x > 0$ маємо значення у виді:

$$P^{1/2} T_s = -\sqrt{a_2} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=+0}. \quad (13)$$

З (12) і (13) з урахуванням умов рівності потоків (4), отримуємо:

$$P^{1/2} T_s = \frac{\sqrt{a_1}}{\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2}} \frac{T_0}{\sqrt{\pi \cdot t}}. \quad (14)$$

Тоді значення температури на межі стінки з врахуванням перетворення Лапласа можемо записати у наступному виді:

$$T_s = \frac{\sqrt{a_1}}{\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2}} \cdot T_0. \quad (15)$$

З урахуванням (7) тепловий потік через межу «шар пінококсу – тканина» за максимальної температури можемо записати у виді:

$$Q_s = \frac{\sqrt{a_1 a_2}}{\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2}} \frac{\lambda_2}{a_2} \frac{T_0}{\sqrt{\pi \cdot t}}. \quad (16)$$

Відповідно густина теплового потоку від високої температури можна виразити рівнянням:

$$q_s = \frac{Q_s}{s^2}, \quad (17)$$

де s^2 – площа температурного впливу горючої речовини, m^2 .

Таким чином, проведено моделювання та отримані залежності, що дозволяють розрахувати значення теплового потоку на межі «шар пінококсу – тканина» залежно від дії температури.

Результати досліджень, з визначення динаміки температури на оберненій поверхні вогнезахищеної тканини, показали, що зразок необробленої тканини не витримав температурний вплив, при дії пальника відбувалось займання тканини, яке продовжувалося понад 110 с. При дії полум'я на зразок вогнезахищеної тканини температура на оберненій поверхні не перевищила 150 °C, займання тканини не відбулося.

З урахуванням літературних даних встановлено теплофізичні характеристики для тканини та пінококсу та представлено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Теплофізичні характеристики матеріалів

Матеріал	Показник		
	Товщина, мм	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	Коефіцієнт температуропровідності, м/с ²
Тканина	1,0	0,078	$16 \cdot 10^{-6}$
Шар пінококсу	7,5	0,034	$8,9 \cdot 10^{-6}$

Дані таблиці 1 показують дещо різні теплофізичні характеристики матеріалів, звідки випливає, що і тепла дія на тканину буде різною. Тепловий потік полум'я газового пальника становила близько 100 кВт/м², а температура полум'я газового пальника становила близько 1000 °C.

Також розраховано густину теплового потоку залежно від часу впливу на тканину полум'я пальника. Показано, що з наростанням температури густина теплового потоку на необроблену тканину збільшується до значення понад 60 кВт/м², чого достатньо для її займання (мінімальне значення густини теплового потоку становить близько 12,0 кВт/м²), а потім поступово підвищується у зв'язку з горінням матеріалу. Натомість, густина теплового потоку через інтумесцентне покриття на початку термічної дії становила понад 20 кВт/м², а потім наступив процес утворення теплоізолювального шару пінококсу і значення густини теплового потоку не перевищило 8,2 кВт/м², що недостатньо для її займання.

В ході подальших досліджень проведено натурні випробування з визначення процесу передавання високої температури полум'я через покриття.

На рис. 4 показано результати випробувань необробленого зразка елементів намету, виготовлених з парусинової тканини, а на рис. 5 – зразка елементів намету, виготовлених з парусинової тканини, обробленого вогнезахисним інтумесцентним покриттям. В таблиці 2 наведено результати втрати маси та час горіння модельного вогнища.

В результаті проведених випробувань встановлено, що при дії полум'я на необроблені зразки елементів намету, відбувається займання на 44...46 с та поширення полум'я, що призводить до повного згорання протягом 108...110 с. Натомість модельний зразок елементів намету, оброблений вогнезахисним інтумесцентним покриттям, при вигоранні модельного вогнища не загорівся, поширення полум'я не відбулося. При цьому зафіксовано спучення захисного покриття, що становило 7...8 мм та відбулося обвуглення поверхні на площі близько 500 мм² оберненої сторони тканини.

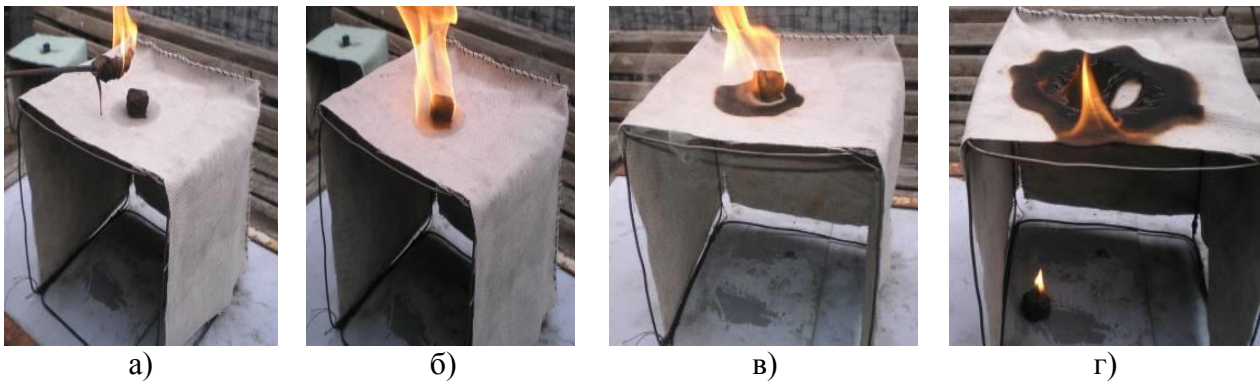


Рис. 4. Результати випробувань необробленого модельного зразка елементів намету, виготовлених з парусинової тканини: а – запалювання модельного вогнища; б – горіння запалювального пристрою; в – займання тканини; г – самостійне вигорання тканини

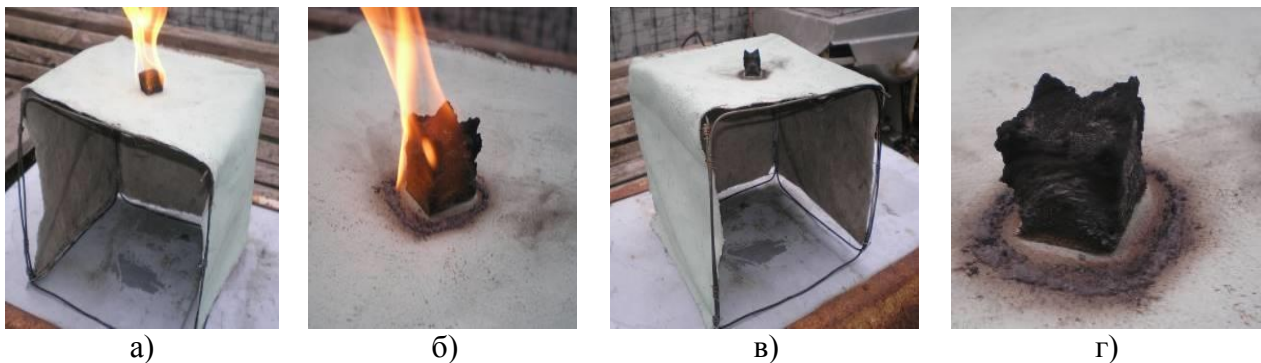


Рис. 5. Результати випробувань вогнезахисного модельного зразка елементів намету, виготовлених з парусинової тканини: а – запалювання модельного вогнища; б – горіння запалювального пристрою; в – обвуглювання тканини; г – вогнище після горіння

Таблиця 2 – Результати випробувань модельного зразка елементів намету, виготовлених з парусинової тканини

Модельний зразок намету виготовлений з парусинової тканини	Маса зразка, кг		Час горіння зразка, с	Втрата маси зразка після випробувань Δm , %	Спучення, мм
	до	після			
необроблений	0,29	0,01	114	100,0	-
оброблений покриттям	0,38	0,37	678	2,47	5...8

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, проведено моделювання процесу теплопровідності при захисті тканини інтумесцентним покриттям. При термічній дії високотемпературного полум'я на елементи намету, виготовлені з парусинової тканини, визначено температуру на поверхні тканини та отримані залежності, що дозволяють одержувати зміну теплового потоку на поверхні матеріалу при спученні покриття. За експериментальними даними і отриманими залежностями встановлено, що густина теплового потоку на необроблену тканину сягає понад 60 кВт/м^2 , що достатньо для її займання. Натомість, густина теплового потоку через утворений шар пінококсу не перевищила $8,2 \text{ кВт/м}^2$, чого недостатньо для її займання.

Результати натурних випробувань з визначення процесу передавання високої температури полум'я через покриття до тканини показали, що при дії полум'я на необроблені модельні зразки елементів намету, виготовлених з парусинової тканини відбувається її займання на 45 с та поширення полум'я поверхнею, що призводить до повного згорання протягом 108 с. Характер вигорання для модельного зразка елементів намету, який оброблений вогнезахисним інтумесцентним покриттям, показав відсутність поширення полум'я після вигорання вогнища та зафіксовано спучення захисного покриття, що сягало 7...8 мм.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на встановлення особливостей зниження теплопровідності при температурному впливі полум'я на будівельну конструкцію з вогнезахищеної тканини.

Подяка. Автори висловлюють подяку за фінансову підтримку роботи, виконаної в рамках бюджетного фінансування № 0121U001007, а також на розробку наукових тем у програмі наукового співробітництва COST Action CA20139 «Холістичне проектування більш високих дерев'яних будівель» (HELEN).

Література

1. Tsapko Yu., Sirko Z., Vasylyshyn R., Melnyk O., Tsapko A., Bondarenko O. Establishing patterns of mass transfer under the action of water on the hydrophobic coating of the fire-retardant element of a tent. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 4. No 10 (112). P. 45-51. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.237884.
2. Tsapko Yu., Tsapko A., Bondarenko O., Chudovska V., Sotnikova I., Sotnikov D. Thermophysical characteristics of the formed layer of pinocox in fire protection of fabric by composition based on modified phosphorus-ammonied. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3. No 10 (111). P. 34-41. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.233479.
3. Horrocks A.R. High performance textiles for heat and fire protection. *High Performance Textiles and their Applications. Woodhead Publishing Series in Textiles*. 2014. P. 144-175. URL: <https://doi.org/10.1533/9780857099075.144>.
4. Цапко Ю.В., Цапко О.Ю., Бондаренко О.П., Суханевич М.В. Аспекти розроблення вогнезахисних композицій для конструкцій з текстильних займистих виробів. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2021. Вип. 83. С. 93-101. DOI: 10.31650/2415-377X-2021-83-93-101.
5. Ma Y., Luo X., Liu L., Shang X., Yao J. Eco-friendly, efficient and durable fireproof cotton fabric prepared by a feasible phytic acid grafting route. *Cellulose*. 2021. Vol. 28 (6). P. 3887-3899. DOI:10.1007/s10570-021-03767-0.
6. Syed Rashedul I., Weidong Yu, Tayyab N. Influence of silica aerogels on fabric structural feature for thermal isolation properties of weft-knitted spacer fabrics. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2019. Vol. 14. P. 1-11.
7. Alexandrescu L., Popa M., Georgescu M., Leca M. Development of new processes intended to obtain fireproof non-asbestos textiles covered with nanodispersions based on modified polychloroprene elastomers. *Industria Textila*. 2013. Vol. 64 (3). P. 277-284. URL: http://www.revistaindustriatextila.ro/images/2013/5_2013.pdf.
8. Zhu H., Kannan K. Determination of melamine and its derivatives in textiles and infant clothing purchased in the United States. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 710. 136396. P. 1-7. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.136396.
9. Ackerman M., Batcheller J., Paskaluk S. Off gas measurements from FR materials exposed to a flash fire. *AATCC Journal of Research*. 2015. Vol. 2 (2). P. 1-12. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.136396.
10. Lin C.-M., Lou C.-W., Lin J.-H. Manufacturing and Properties of Fire-Retardant and Thermal Insulation Nonwoven Fabrics with FR-Polyester Hollow Fibers. *Textile Research Journal*. 2009. Vol. 79 (11). P. 993-1000. URL: <https://doi.org/10.1177/0040517508090492>.
11. Tian Zhou, Xu Liu, Yuan Li, Zhiqiang Sun. Dynamic measurement of the thermal conductivity of phase change materials in the liquid phase near the melting point. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 111. P. 631-641. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.020.
12. Tsapko Yu., Bondarenko O., Tsapko A., Sarapin Y. Application of Coating for Fire Protection of Textile Structures. *Materials and Technologies of Industrial Application. Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 927. P. 115-121. URL: <https://www.scientific.net/KEM.927.115>.
13. Tsapko Yu., Tsapko A. Establishment of fire protective effectiveness of reed treated with an impregnating solution and coatings. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4. No 10 (94). P. 62-68. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141030>.
14. Potter M.C. *Engineering analysis*. New York: Springer. 2018. 444 p. URL:

<https://www.springer.com/gp/book/9783319916828>.

15. Zhang H., Li Y., Tao W.-Q. Theoretical accuracy of anisotropic thermal conductivity determined by transient plane source method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 108. P. 1634-1644. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.025>.

16. Janna W.S. *Engineering Heat Transfer*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2010. 692 p. URL: <https://www.routledge.com/Engineering-Heat-Transfer/Janna/p/book/9781420072020>.

References

- [1] Yu. Tsapko, Z. Sirko, R. Vasylyshyn, O. Melnyk, A. Tsapko, O. Bondarenko, "Establishing patterns of mass transfer under the action of water on the hydrophobic coating of the fire-retardant element of a tent", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4, no. 10 (112), pp. 45-51, 2021. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.237884.
- [2] Yu. Tsapko, A. Tsapko, O. Bondarenko, V. Chudovska, I. Sotnikova, D. Sotnikov, "Thermophysical characteristics of the formed layer of pinocox in fire protection of fabric by composition based on modified phosphorus-ammonied", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 10 (111), pp. 34-41, 2021. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.233479.
- [3] A.R. Horrocks, "High performance textiles for heat and fire protection, High Performance Textiles and their Applications", *Woodhead Publishing Series in Textiles*, pp. 144-175, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1533/9780857099075.144>.
- [4] Yu.V. Tsapko, O.Yu. Tsapko, O.P. Bondarenko, M.V. Sukhanovich, "Aspects of development of fireproof compositions for structures with textile fuel products", *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, no. 86, pp. 86-95. 2022, DOI: 10.31650/2415-377X-2021-83-93-101.
- [5] Y. Ma, X. Luo, L. Liu, X. Shang, J. Yao, "Eco-friendly, efficient and durable fireproof cotton fabric prepared by a feasible phytic acid grafting route", *Cellulose*, vol. 28 (6), pp. 3887-3899, 2021. DOI:10.1007/10570-021-03767-0.
- [6] Syed Rashedul I., Weidong Yu, Tayyab N., "Influence of silica aerogels on fabric structural feature for thermal isolation properties of weft-knitted spacer fabrics", *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 14, pp. 1-11, 2019.
- [7] L. Alexandrescu, M. Popa, M. Georgescu, M. Leca, "Development of new processes intended to obtain fireproof non-asbestos textiles covered with nanodispersions based on modified polychloroprene elastomers", *Industria Textila*, vol. 64 (3), pp. 277-284, 2013. [Online]. Available: http://www.revistaindustriatextila.ro/images/2013/5_2013.pdf.
- [8] H. Zhu, K. Kannan, "Determination of melamine and its derivatives in textiles and infant clothing purchased in the United States", *Science of the Total Environment*, vol. 710, 136396, pp. 1-7, 2020. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.136396.
- [9] M. Ackerman, J. Batcheller, S. Paskaluk, "Off gas measurements from FR materials exposed to a flash fire", *AATCC Journal of Research*, vol. 2 (2), pp. 1-12, 2015. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.136396.
- [10] C.-M. Lin, C.-W. Lou, J.-H. Lin, "Manufacturing and Properties of Fire-Retardant and Thermal Insulation Nonwoven Fabrics with FR-Polyester Hollow Fibers", *Textile Research Journal*, vol. 79 (11), pp. 993-1000, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0040517508090492>.
- [11] Zhou Tian, Liu Xu, Li Yuan, Sun Zhiqiang, "Dynamic measurement of the thermal conductivity of phase change materials in the liquid phase near the melting point", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 111, pp. 631-641. 2017. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.04.020.
- [12] Yu. Tsapko, O. Bondarenko, A. Tsapko, Y. Sarapin, "Application of Coating for Fire Protection of Textile Structures. Materials and Technologies of Industrial Application", *Key Engineering Materials*, vol. 927, pp. 115-121, 2022. [Online]. Available: <https://www.scientific.net/KEM.927.115>.
- [13] Yu. Tsapko, A. Tsapko, "Establishment of fire protective effectiveness of reed treated with an impregnating solution and coatings", *Eastern-European Journal Enterprise*

- Technologies*, vol. 4, no. 10 (94), pp. 62-68, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141030>.
- [14] M.C. Potter, *Engineering analysis*, New York: Springer, 2018. [Online]. Available: <https://www.springer.com/gp/book/9783319916828>.
- [15] H. Zhang, Y. Li, W.-Q. Tao, "Theoretical accuracy of anisotropic thermal conductivity determined by transient plane source method", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 108, pp. 1634-1644, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.025>.
- [16] W.S. Janna, *Engineering Heat Transfer*, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2010. <https://www.routledge.com/Engineering-Heat-Transfer/Janna/p/book/9781420072020>.

SIMULATION OF THE PROCESS OF HEAT TRANSFER TO TISSUE THROUGH INTUMESCENT COATING

^{1,2}**Tsapko Yu.**, Doctor of Technical Sciences,
juriyts@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0625-0783

¹**Bondarenko O.**, PhD, Associate Professor,
bondolya3@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8164-6473

³**Tsapko A.**, PhD, Senior Research Fellow,
alekseytsapko@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2298-068X

¹**Neroda V.**, master,
v.nerodaa@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5139-866X

¹*Scientific Research Institute for Binders and Materials,
Kyiv National University of Construction and Architecture
Povitroflotsky ave., 31, Kyiv, 03037, Ukraine*

²*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Heroiv Oborony str., 15, Kyiv, 03041, Ukraine*

³*Ukrainian State Research Institute "Resurs"
Kazimyra Malevicha str., 84, Kyiv, 03150, Ukraine*

Abstract. The problem of using fabric products for building structures for the storage and transportation of explosives is to ensure their resistance to fire and durability during operation, but it is necessary to take into account the change in their fire-resistant properties. Reducing the flammability and developing non-flammable and non-flammable materials is one of the main areas of preventing fires and solving the problem of expanding the scope of application of these materials. Treatment with fire retardants has a significant effect on the spread of the flame, allows you to significantly reduce the smoke-generating capacity and heat generation. Therefore, the object of research was canvas fabric, which was fireproofed with an intumescent coating. Simulations were carried out and dependences were obtained, which allow to calculate the value of the heat flow at the boundary "pinocoke layer - fabric" depending on the effect of temperature. It has been proven that in the process of thermal impact on the fabric, the process of transfer of high temperature and its ignition takes place. On the basis of the obtained results of field tests to determine the process of transferring high temperature of the flame through the coating, it was established that when the flame acts on untreated model samples of tent elements made of canvas fabric, it ignites at 45 C and the flame spreads over the surface, which leads to complete combustion for 108 s. The pattern of burning for a model sample of tent elements, which is treated with a fire-resistant intumescent coating, showed the absence of flame propagation after the fire burned out, and the swelling of the protective coating was recorded, reaching 7...8 mm. The practical value lies in the fact that the obtained results of determining the properties of canvas fabric fire-resistant with an intumescent coating make it possible to establish the conditions of operation of products and building structures based on it.

Keywords: fabric fire protection, intumescent coatings, heat flow, surface treatment, thermophysical properties.

Стаття надійшла до редакції 28.10.2022