

## Теплофізичні характеристики утвореного шару пінококсу при вогнезахисті тканини композицією на основі модифікованих фосфорно-амонійних з'єднань

Ю. В. Цапко, О. Ю. Цапко, О. П. Бондаренко, В. А. Чудовська, І. М. Сотнікова, Д. А. Сотніков

Проведено аналіз вогнезахисних матеріалів для тканин і встановлено, що мізерність даних для пояснення і опису процесу вогнезахисту, нехтування еластичних покриттів, призводить до загорання конструкцій з тканин під дією полум'я. Розробка надійних методів дослідження умов вогнезахисту тканин призводить до створення нових типів вогнезахисних матеріалів. Тому виникає необхідність визначення умов утворення бар'єру для горіння та поширення полум'я тканиною і встановлення механізму гальмування передачі температури до матеріалу. У зв'язку з цим розроблено розрахунково-експериментальний метод визначення теплопровідності при застосуванні вогнезахисного засобу в якості покриття, що дозволяє оцінити коефіцієнт теплопровідності при високотемпературній дії. За експериментальними даними та теоретичними залежностями розраховано коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного шару пінококсу, який становить  $0,034 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , що відповідно забезпечує телостійкість тканини. У результаті досліджень доведено, що процес теплоізолювання тканини полягає в утворенні сажоподібних продуктів на поверхні зразка. Особливості гальмування процесу передавання тепла до матеріалу, який оброблений композицією на основі модифікованих фосфорно-амонійних з'єднань, полягають в утворенні на поверхні тканини теплозахисного шару коксу. Проведено оцінку максимально можливого проникнення температури через товщу покриття. На поверхні зразка створено температуру, що значно перевищує температуру займання тканини, а на необігрітій поверхні не перевищує  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Таким чином, є підстави стверджувати про можливість спрямованого регулювання процесів вогнезахисту тканини шляхом застосування покриттів, здатних утворювати на поверхні матеріалу захисний шар, який гальмує швидкість передавання тепла.

Ключові слова: захисні засоби, тканина, горіння тканини, втрата маси, оброблення поверхні тканини, спучення покриття.

### 1. Вступ

Тканини з природніх волокон все частіше використовуються в різних типах будівельних конструкцій, як у постійних, так і зокрема в тимчасових спорудах. Під час проживання і опалювання таких споруд можливе займання та швидке поширення пожежі, оскільки тканина утворює значне пожежне навантаження. Оскільки цей матеріал чутливий до впливу високої температури, підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів, де використовуються будівельні конструкції з тканинних матеріалів, можливо за допомогою їх вогнезахисного оброблення.

Прикладом є пожежа, яка виникла у будові Хартфордського цирку, штат Коннектикут (США) під час його роботи, що привело до масової загибелі глядачів.

Для комплексного захисту целюлозовмісних матеріалів від загоряння використовують суміші неорганічних солей, але вогнезахисне оброблення для тканин не придатне, оскільки на поверхні спостерігається утворення висолів, які осипаються. З часом матеріал втрачає захисні властивості, що приводить до займання горючих конструкцій при дії високотемпературного полум'я.

Необхідність вогнезахисту актуальна і для об'єктів масового перебування людей, які виготовлені з горючих тканин. Зокрема, у 2005 році в одному з театрів м. Каїра (Єгипет) від звичайної свічки виникло загоряння порт'єр, куліс та декорацій з паперу. Однією з причин швидкого розвитку пожежі була відсутність протипожежного захисту виробів з тканин.

Тому дослідження, що направлені на зниження рівня пожежної небезпеки тканин шляхом утворення шару пінококсу при термічному розкладі композиції на основі модифікованих фосфорно-амонійних солей, є актуальними.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Робота [1] зосереджена на поведінці текстильних мембран на реакцію вогню. Класифікаційні випробування проводились із типовими текстильними виробами. Асортимент продукції був випробуваний двома різними тестами малого полум'я, на які чинні шведські класифікаційні тести. Деякі продукти були випробувані згідно з EN 13823 що являє середній метод випробування для визначення швидкості виділення тепла, утворення диму та розповсюдження полум'я. Крім того, були проведені широкомасштабні випробування, щоб отримати інформацію про поведінку вогню в реальному застосуванні та використовуватись як еталон при оцінці інформації, отриманої в результаті класифікаційних випробувань. Були розроблені різні сценарії тестування, які моделювали додатки в будівлях та захисту від погоди. Масштабні випробування показали важливість вимірювання димоутворення та виникнення полум'яних крапель у класифікаційній схемі. Але не наведені відповідні фізико-хімічні дані щодо їх зміни тканини в процесі експлуатації.

У дослідженні [2] повідомляється про виготовлення багатофункціонального захисного текстилю з бавовняної тканини, змішаної з арамідною, шляхом осадження тривимірного полімерного покриття тетракіс (гідроксиметил) фосфоній хлорид. Для цього виготовлені змішані тканини з різним складом, ткацькими структурами, товщинами, і щільністю ниток, з подальшим хімічним осадженням полімерного покриття. Результати показують, що найнижча середня довжина вугільної основи при щільності теплового потоку випромінювання ( $11,021 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ ), і найвищий кисневий індекс % (36,8 %), були виявлені в змішаній тканині при 40 % бавовни 30 % арамідна тканина. Що стосується водовідштовхувальних властивостей, то всі оброблені зразки демонстрували водовідштовхувальні властивості, виражені як кут контакту з водою до  $141,70^\circ$  до  $151,50^\circ$ . Ці результати дають фундаментальні підстави для проектування змішаного текстилю з необхідними функціоналами. Але не сказано, для яких класів експлуатації дані речовини належать.

Вогнезахисний провідний бавовняний тканинний матеріал був успішно підготовлений шляхом полімеризації поліаніліну, легованого новою фітиновою кислотою, шляхом просочення [3]. Експериментальні результати показали, що граничний індекс кисню вихідної тканини збільшився до 32 %, а опір листа зменшився до 1,13 кОм. Під час піролізу вихідної та готової тканини максимальна температура розкладання та максимальний викид легкого газу знизилися з 380 °С до 290 °С. А вміст залишків вуглецю збільшився з 12,6 % до 39,2 % при 700 °С, що вказувало на те, що полімеризація аніліну, легованого поліаніліну, призвела до вогнезахисної властивості тканини. Але залишаються невирішеними питання, які пов'язані з механізмом утворення пінококсу. Причиною цього можуть бути тонкощі щодо утворення захисного шару, що відповідно робить такі дослідження складними.

У статті [4] розглядається використання водно-спиртового розчину тетроетоксисилану, водного розчину силікату натрію, фосфорутримуючих антипіренів для надання вогнезахисних властивостей целюлозним текстильним матеріалам. Досліджуються швидкість тепловиділення, час та пікова швидкість тепловиділення, які є найважливішими факторами при прогнозуванні швидкості зростання пожежі. Однак не вказано як витримують дані композиції зміну температурно-вологісних полів.

У дослідженні [5] було спрямовано на обговорення щодо використання нової композиції на основі силікату натрію, сечовини та фосфату натрію для надання вогнезахисних властивостей целюлозним текстильним матеріалам. Необроблена тканина розміром 220×170 мм при випробуванні на горючість під час займання 15 с повністю вигорає за 60 с. У зразках, оброблених антипіреном, при часі займання 15 с час тління практично зводиться до нуля. Зі збільшенням концентрації антипірену та температури термічної обробки втрата міцності матеріалу, розривне навантаження та зовнішній вигляд тканини дещо змінюються. За допомогою електронно-скануючої мікроскопії та енергодисперсійного мікроскопу було показано, що чиста бавовняна тканина містить 68,77 % вуглецю та 31,22 % кисню. Після модифікації на поверхні обробленої тканини утворюються частинки натрію 0,02 %, фосфору 0,04 % та калію 0,05 %. розподілено досить нерівномірно. Показано, що в целюлозних матеріалах, модифікованих композиціями на основі силікату натрію та сечовини, гідрофосфату натрію, зростають вогнезахисні властивості. Проте виконання даних робіт по вогнезахисту тканин потребує спеціального устаткування на стадії виготовлення матеріалів.

Представлений синтезований ряд борово-азотних полімерів, щоб забезпечити екологічно чисту альтернативу вогнестійкої обробки бавовняних тканин [6]. Органічне поєднання бору, фенілборазотної кислота була успішно пов'язаний з розгалуженим поліетиленіміном, та було підтверджено аналізом. Термогравіметричний аналіз показав, що полімер у мольному співвідношенні 1:1 етиленіміну та антипірену демонструє оптимальну термоокислювальну стабільність, легко наноситься на бавовняні тканини методом занурення з високим поглинанням в середовищі ацетону. Тканина з добавкою 33,8 мас.% володіє самозатухаючою здатністю. Аналіз морфології обуглювання оброблених тканин виявив вогнестійкість покриття за рахунок спучення вогнезахисного механізму.

Пошук можливих альтернатив традиційним антипіренам штовхає наукове та промислове співтовариство до проектування нових продуктів, що мають низький вплив на довкілля та токсичність, незважаючи на високі експлуатаційні характеристики, при контакті з полум'ям [7]. Тут придатність та ефективність деяких біомакромолекул та продуктів біологічного походження зі специфічною хімічною структурою та складом як антипіренів для природного або синтетичного текстилю була ретельно вивчена на рівні лабораторії. Зокрема, різні білки (такі як білки сироватки, казеїни та гідрофобіни), нуклеїнові кислоти та екстракти з природних джерел, були обрані та використані для розробки вогнезахисних обробних процедур для декількох волокон та тканин. Було виявлено, що біомакромолекули та продукти біологічного походження, які зазвичай містять ключові елементи (тобто азот, фосфор та сірка), можуть бути застосовані до текстилю за допомогою стандартних методів просочення. Крім того, ці вироби в основному відповідають за утворення стійкого захисного вугілля (тобто вуглецевого залишку) в результаті впливу полум'я на тканину. Однак не сказано про вплив зміни середовища на покриття, його руйнування в часі.

Розроблено новий вогнезахисний шар покриття для історичних тканин [8]. Наночастинки кремнезему додатково просочували органічним боратом, утворюючи вогнезахисний композит. Отриманий композит поєднують із сполучною механічним змішуванням, забезпечуючи вогнезахисну пасту для покриття. Покривальна паста наноситься на тильну поверхню тканин. Досліджено горючість, термічну стійкість та механічні властивості заготовки та оброблених зразків лляних тканин як внутрішньої опори історичному текстилю. Вплив полум'я на зразки тканини із зворотним покриттям показала високий клас вогнезахисту тканин з нульовою швидкістю горіння порівняно з 80,3 мм/хв для необробленої. При цьому встановлено синергетичний ефект вогнетривкості між наночастинками та органічним боратом. Межа міцності на розрив вогнезахисних тканин була підвищена на 27 %, а подовження покращено. Однак не вивчено вплив старіння на вогнезахист та механічні властивості вогнезахисного текстилю із зворотним покриттям.

В роботі [9] відзначено смоли на основі меламіну, які широко використовуються в тканинах для додання вогне- і теплостійкості. 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.

Розкладання вогнестійких матеріалів через підвищену температуру або контакт з полум'ям призводить до появи ряду хімічних видів, деякі з яких можуть бути досить токсичними для людини [10]. У минулому 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 розпаду 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.

Досліджено вплив ступеня однорідності золю  $\text{SiO}_2$  на тривалість періоду індукції та якість вогнестійких покриттів на тканин [11]. Перспективи використання ІЧ-спектроскопії як експрес-методу для вивчення фазового складу гелевого покриття, ступеня завершення гідролізу кремнійорганічного компонента та коригування параметрів для отримання високоякісного вогнестійкого бінарного покриття золі показана система антипірену  $\text{SiO}_2$ . Однак не сказані сфери застосування приведених виробів.

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

### **3. Мета і задачі досліджень**

Метою роботи є виявлення закономірностей утворення шару пінококсу при впливі високої температури на тканину, вогнезахиснену композицією на основі модифікованих фосфорно-амонійних з'єднань. Це дає можливість обґрунтувати застосування вогнезахисного покриття на об'єктах з застосуванням тканин.

Для досягнення мети вирішувались наступні задачі:

- провести моделювання процесу утворення шару піно коксу на поверхні тканини при розкладі композицією на основі модифікованих фосфорно-амонійних з'єднань під впливом високої температури;
- встановити ефективність вогнезахисту тканини композицією на основі модифікованих фосфорно-амонійних з'єднань під впливом полум'я.

### **4. Матеріали і методи досліджень**

#### **4. 1. Досліджувані матеріали, які використовувались в експерименті.**

Для встановлення вогнезахисної ефективності тканини композицією використовували зразки парусинової тканини розміром  $220 \times 170$  мм, (рис. 1).

Зразки обробляли модифікованим покрівельним просочувальним розчином на основі суміші органічних і неорганічних речовин «Firewall-Attic» для вогнезахисту деревини (суміш карбаміду 28...30 % і фосфорних кислот 23...24 %), але модифікована крохмалем у кількості 20 %.

Отриману масу перемішували і наносили на зразок тканини у кількості  $137,0 \dots 140,0$  г/м<sup>2</sup> [12]. При цьому вогнезахисне покриття проникало у структуру тканини та утворювало еластичну плівку на поверхні товщиною близько 20 мкм.

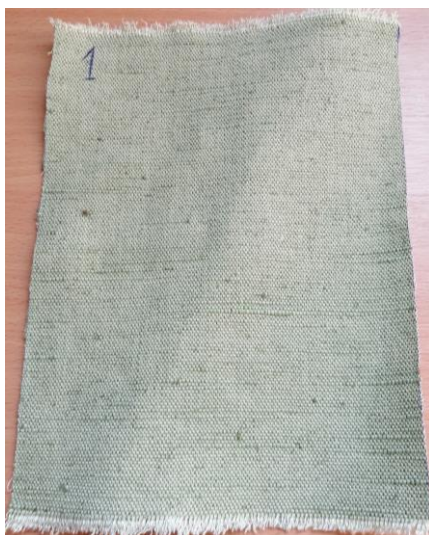


Рис. 1. Модельні зразки тканини для випробувань

#### 4. 2. Методика визначення показників вогнезахисту тканин композицією на основі модифікованих фосфорно-амонійних з'єднань

Для проведення дослідження використовували установку з визначення займистості тканин, яка додатково була оснащена пристроєм для вимірювання температури на поверхні зразка в ході випробувань за допомогою термопари (рис. 2).

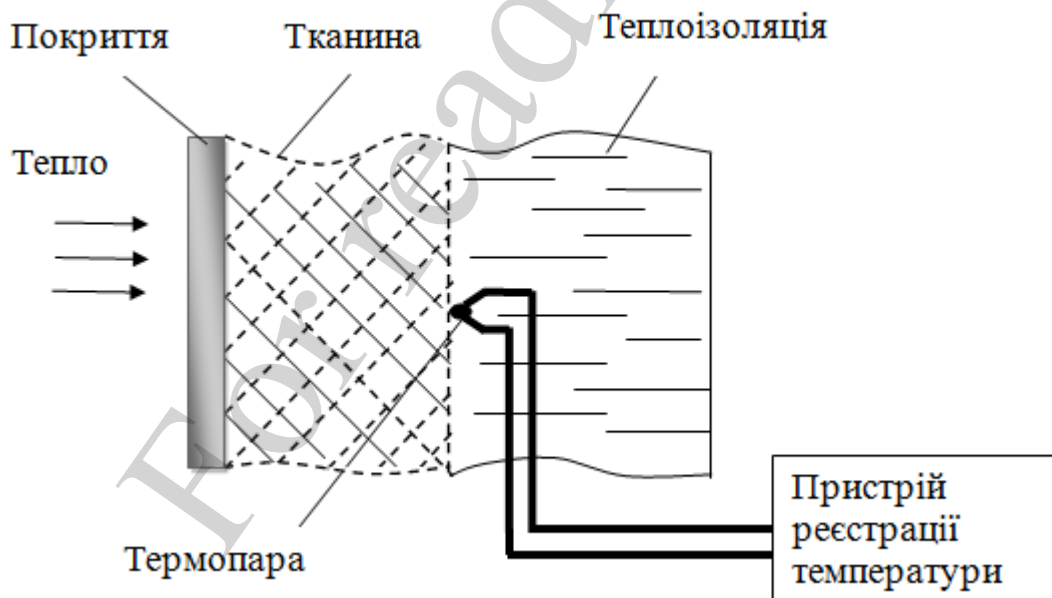


Рис. 2. Пристрій для випробувань теплопровідності вогнезахисної тканини

Зразок тканини, оброблений вогнезахисним засобом, закріплювали у тримачі зразка та вставляли у випробувальну камеру (рис. 2). Зразок фіксували так, щоб кінець термопари притискувався до внутрішньої поверхні зразка. Запалю-

вали пальник та підводили до зразка, вимірювали температуру на зворотній поверхні. По виміряних величинам визначали теплоізолювальні властивості та фіксували зміни покриття на поверхні тканини [13].

Дослідження з моделювання процесу теплопровідності вогнезахищеної тканини при термічній дії проводили з застосуванням основних положень математичної фізики [14].

## **5. Результати дослідження процесу вогнезахисту тканини композицією при впливі високої температури**

### **5. 1. Моделювання процесу утворення піно коксу на поверхні вогнезахищеної тканини при впливі високої температури**

При теплового потоку на тканину вогнезахищену покриттями розклад матеріалу направлений в сторону утворення негорючих газів і важко займистого коксового залишку, який ізолює тепло та знижує теплопередачу до тканини.

Визначення теплофізичних характеристик вогнезахисного шару покриття тканини пов'язано в необхідності виміру температури в тонкому шарі вогнезахисту (до 0,5 мм), що має певні труднощі.

Тому в даному випадку запропоновано метод вирішення задачі теплопровідності для двохшарової пластини з різними теплофізичними властивостями. Так, у початковий момент часу до поверхні зразка вогнезахищеної тканини підводиться постійний по часу тепловий потік  $q_0$ , що піддержується постійним протягом всього процесу нагрівання. При цьому поширення температури проходить через покриття до досягнення критичної температури тканини. При цьому протилежна частина зразка адіабатизована ( $q=0$ ).

Розглядались дві області (рис. 3):

– 1 – зона спученого шару пінококсу,  $0 < x \leq R$  ( $R$  – координата перетворення плівки покриття у спучений шар пінококсу, м);

– 2 – тканина (матеріал зразка з твердою речовиною вогнезахисного покриття) ( $R-R_1$ ), м.

Диференціальні рівняння переносу тепла на поверхні двохшарової пластини мають вигляд [15]:

– для покриття

$$\frac{\partial^2 T_1(x, \tau)}{\partial x^2} - \frac{1}{\phi_1^2} \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} = 0 \quad (\tau > 0; 0 < x < R); \quad (1)$$

– для тканини

$$\frac{\partial^2 T_2(x, \tau)}{\partial x^2} - \frac{1}{\phi_2^2} \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = 0 \quad (\tau > 0; R < x < R_1), \quad (2)$$

з початковими та граничними умовами

$$T_1(x, 0) = T_2(x, 0) = T_0, \quad (3)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x} = q_0 = \text{const}, \quad (4)$$

$$T_1(R, \tau) = T_2(R, \tau), \quad (5)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(R, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(R, \tau)}{\partial x}, \quad (6)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (7)$$

де  $T_1(x, \tau)$ ,  $T_2(x, \tau)$  – температурне поле вступного шару пінококсу покриття і тканини в точках з координатами  $x$  в момент часу  $\tau$ ;

$\phi = \sqrt{a}$ ;  $a_1, a_2$  – коефіцієнти температуропровідності покриття та тканини;

$\lambda_1, \lambda_2$  – коефіцієнти теплопровідності покриття та тканини;

$R, (R_1 - R)$  – товщина покриття та тканини.

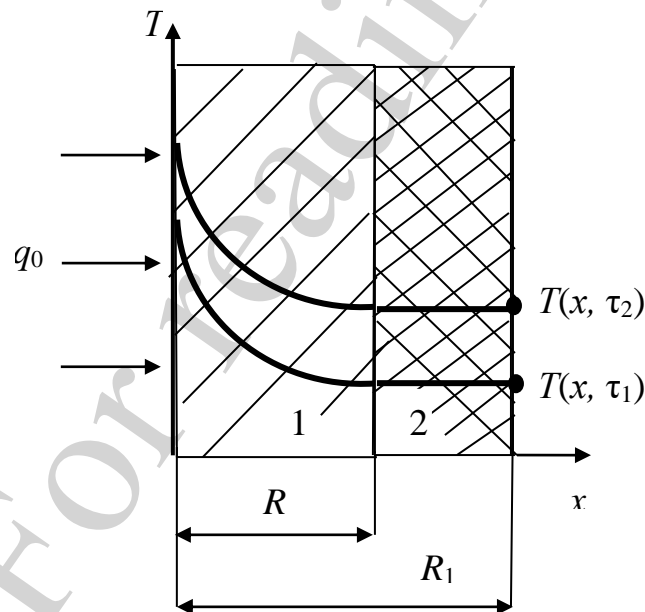


Рис. 3. Схема процесу спучування вогнезахисного покриття на тканині: 1 – шар пінококсу; 2 – вогнезахисна тканина

Після математичних перетворень аналітичне рішення задачі теплопровідності (1)–(7) можна отримати, якщо температурне поле  $T_2(x, \tau)$  для тканини в кожний момент часу рівномірно розподіленою по координаті  $x$  (однакова у всіх точках  $R < x < R_1$ ). При цьому температурне поле  $T_1(x, \tau)$  вступного шару пінококсу може бути записано у наступному виді [16]:



$$T_1(x, \tau) - T_1(0, \tau) = -\frac{q_0}{\lambda_1} \cdot x + \frac{\alpha(\tau)}{2\sqrt{\phi_1}} \cdot x^2, \quad (8)$$

де  $\alpha(\tau)$  – швидкість зміни в часі температури тканини, яка залежить від величини теплового потоку  $q_0$ , геометричних розмірів  $R$ ,  $(R_1 - R)$  і об'ємних теплоємностей покриття  $c_1\rho_1$  і тканини  $c_2\rho_2$ :

$$\alpha(\tau) = \frac{\partial T_2(R, \tau)}{\partial \tau} = \frac{q_0}{[c_1\rho_1 \cdot R + c_2\rho_2 \cdot (R_1 - R)]}. \quad (9)$$

За експериментальними даними швидкість зміни температури тканини можна представити у виді:

$$\alpha(\tau) = \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{T_2(R, \tau_2) - T_2(R, \tau_1)}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (10)$$

Прирівнюючи (9) і (10) для визначення об'ємної теплоємності шару спученого коксу покриття отримуємо рівняння:

$$c_1\rho_1 = \frac{1}{R} \left[ \frac{q_0(\tau_2 - \tau_1)}{T_2(R, \tau_2) - T_2(R, \tau_1)} - c_2\rho_2(R_1 - R) \right]. \quad (11)$$

Звідки по виміряним експериментальним величинам теплового потоку, швидкості зміни температури, геометричних розмірів спученого шару коксу і тканини та об'ємної теплоємності необробленої тканини можна розрахувати об'ємну теплоємність спученого шару пінококсу.

Якщо підставити  $x=0$  і  $x=R$  в залежність (8) то отримаємо рівняння:

$$T_1(0, \tau) = T_1(0, \tau), \quad (12)$$

$$T_1(R, \tau) = T_1(0, \tau) - \frac{q_0}{\lambda_1} \cdot R + \frac{\alpha(\tau)}{2\sqrt{\phi_1}} \cdot R^2. \quad (13)$$

На підставі  $\phi = \sqrt{a}$  з (10) і з урахуванням [17] можна отримати формулу для розрахунку температуропровідності тканини:

$$a = \frac{(R_1 - R)^2}{2(\tau_2 - \tau_1)}. \quad (14)$$

За експериментальними даними перепаду температур  $\Delta T$  досліджуваного спученого шару коксу було визначена залежність у наступному виді:

$$T_1(R, \tau) - T_1(0, \tau) = \frac{q_0 \cdot R}{\lambda_1} - \frac{\alpha(\tau) \cdot R^2}{2\lambda_1} \cdot c_1 \rho_1, \quad (15)$$

так як температуропровідність є рівняння

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}. \quad (16)$$

З (15) визначено рівняння для розрахунку коефіцієнта теплопровідності:

$$\lambda_1 = \frac{q_0 \cdot R - 0,5\alpha(\tau) \cdot R^2 \cdot c_1 \rho_1}{T_1(R, \tau) - T_1(0, \tau)}. \quad (17)$$

За отриманою залежністю (17) розраховуємо теплопровідність спученого шару коксу покриття. Вихідні дані є експериментальні значення теплового потоку, різниця температур і швидкість зміни температури тканини (рівняння (10)), геометричні розміри і об'ємна теплоємність пінококсу (11).

## 5. 2. Результати визначення температури поверхні зразка деревини при термічному впливі

Для встановлення горючості тканини були проведені дослідження щодо її займання при дії пальника, що імітує низькокалорійне джерело. Результати досліджень із займання необробленого зразка тканини, проведеними у лабораторних умовах, наведено на рис. 4.

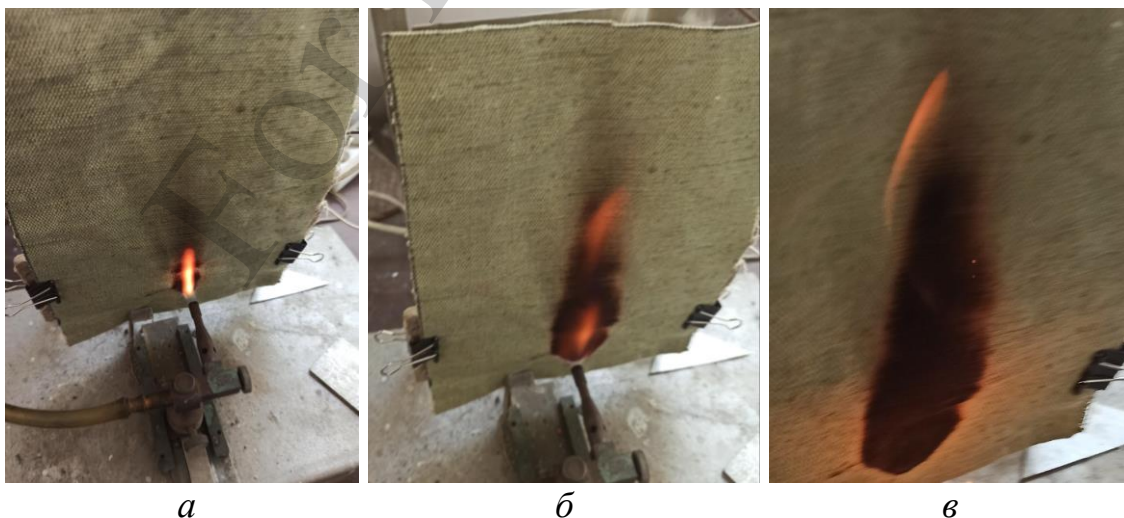


Рис. 4. Визначення займистості зразка тканини під дією пальника: *а* – займання зразка тканини; *б* – горіння тканини; *в* – вигорання тканини

Дослідження показали, що, необроблений вогнезахисним засобом, зразок тканини, під дією пальника протягом 5 с, зайнявся, полум'я поширилося по всій вертикалі, що привело до його згорання та втрати маси.

Потім були проведені випробування зразків, які були оброблені вогнезахисною композицією. Експериментальні дослідження займистості вогнезахисної тканини при спучуванні вогнезахисного засобу показано на рис. 5.

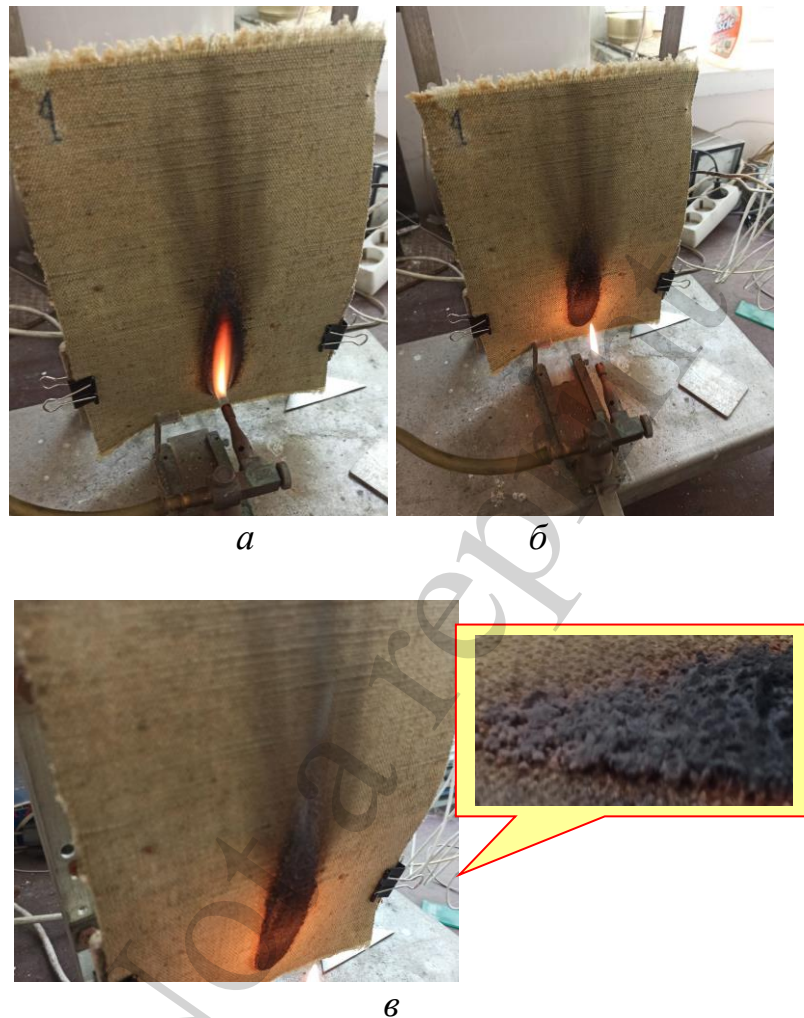


Рис. 5. Результати випробувань вогнезахисної тканини: *а* – вплив полум'я пальника на зразок тканини; *б* – обвуглювання поверхні зразка тканини; *в* – утворення на поверхні горючої речовини теплоізолювального шару піно коксу

При дії полум'я пальника на зразки вогнезахисної тканини почалося інтенсивне спучення та незначне підвищення температури на оберненій поверхні зразка. У результаті проведених випробувань встановлено, що під впливом полум'я протягом 60 с спучення для модельного зразка тканини, обробленого вогнезахисною композицією, склало близько 4 мм.

Результати досліджень з експериментального визначення динаміки температури зразків тканини, проведеними у лабораторних умовах, у вигляді експериментальних кривих, які отримано за вище приведеною методикою, наведено на рис. 6.

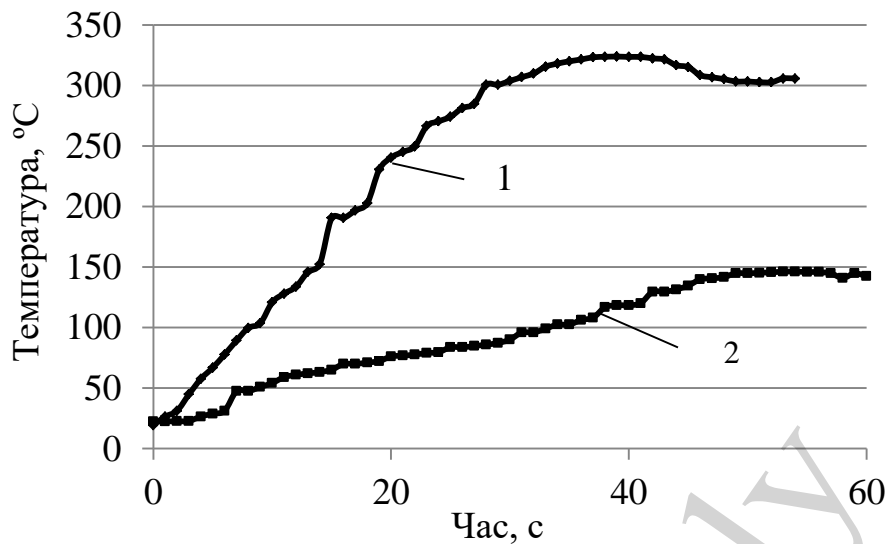


Рис. 6. Динаміка наростання температури оберненої поверхні тканини при впливі полум'я пальника: 1 – необроблена; 2 – вогнезахищена композицією

Дослідження показали, що при дії полум'я пальника на зразок необробленої тканини відбулося її займання, температура (крива 1) на оберненій поверхні становила понад 300 °C. Горіння продовжувалось понад 480 с, прогорання матеріалу становило понад 40 %. Зразок вогнезахищеної тканини витримав температурний вплив полум'я пальника. При дії теплового потоку відбувалось спучення покриття, яке продовжувалося протягом 60 с, температура (крива 2) на внутрішній поверхні не перевищила 150 °C, а втрата маси становила 2,9 %.

Визначення теплофізичних характеристик тканини без вогнезахисту проводили за методикою [18], результати досліджень приведено в табл. 1.

Таблиця 1  
Теплофізичні характеристики тканини

Назва матеріалу	Товщина, мм	Маса, г	Розрахункові характеристики виробів з деревини			
			Густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Температуропровідність, м <sup>2</sup> /с	Теплопровідність $\lambda$ , Вт/(м·К)	Теплоємність, кДж/(кг·К)
Тканина 170×220 мм	1,2	25,2	560,0	$16 \cdot 10^{-6}$	0,078	2,88

Враховуючи, що тепловий потік полум'я газового пальника становить близько 10100 кВт/м<sup>2</sup> [19], а температура полум'я газового пальника становила близько 1000 °C [20]. За отриманими під час випробувань даними температурних вимірювань (рис. 6), з використанням отриманих залежностей (11) і (17), розраховано теплофізичні властивості пінококсу. Так, об'ємна теплоємність шару пінококсу становила 427,5 кДж/(м<sup>3</sup>·К), а коефіцієнт теплопровідності склав 0,034 Вт/(м·К) відповідно.

Отримані дослідження з визначення займистості вогнезахищеної тканини, відповідають властивостям утвореного теплостійкого шару пінококсу під дією

високотемпературного полум'я, а значить показують стійкість вогнезахисної композиції до впливу високої температури полум'я та захисту матеріалу.

## **6. Обговорення результатів дослідження процесу утворення шару пінококсу при вогнезахисті тканини**

При дослідженні процесу вогнезахисту тканини композицією на основі модифікованих фосфорно-амонійних з'єднань, як витікає з отриманих результатів (табл. 1, рис. 6), закономірним є продовження часу передавання температури через вогнезахищену тканину. Це обумовлено утворенням шару спученого шару коксу на поверхні вогнезахищеної деревини при розкладі антипіренів під дією полум'я, що і уповільнює процеси передачі тепла до тканини та її горіння.

Слід зазначити, що присутність модифікованих фосфорно-амонійних з'єднань призводить до утворення еластичної плівки на поверхні тканини стійкої до коливань. Вочевидь такий механізм впливу еластичної плівки є тим фактором регулювання процесу, завдяки якому вогнестійкість тканини зберігається. В цьому сенсі має інтерпретація результатів визначення важкогорючості тканини після впливу полум'я, а саме втрати маси зразків при термічному впливі. Оскільки втрата маси не перевищила 2,9 %, а температура на оберненій поверхні зразка склала не більше 150 °С. Це свідчить про утворення заслону для температури, який можливо ідентифікувати за методом термічного впливу на дослідженні зразки.

Це означає, що врахування даного факту відкриває можливість для ефективного регулювання властивостями вогнезахищеної тканини безпосередньо в умовах серійного промислового виробництва.

Зіставлення експериментальних досліджень з тепло ізолювання шару пінококсу при вогнезахисті тканини та теоретичних досліджень теплоізолювання тканини свідчить про гальмування процесів теплопередачі. Оскільки температура на оберненій поверхні при дії пальника не перевищила 150 °С, а втрата маси становила 2,9 %.

Це не розходиться з практичними даними, добре відомими з робіт [3, 5], автори яких, до речі, теж пов'язують ефективність вогнезахисту з утворенням шару піно коксу під впливом полум'я пальника. Але, на відміну від результатів досліджень, опублікованих в [6, 7], отримані дані щодо впливу модифікованих фосфорно-амонійних з'єднань на процес гальмування передачі температури, дозволяють стверджувати наступне:

– основним регулятором процесу є не стільки формування значної кількості газів, що інгібують полум'я, оскільки окремі вогнезахисні покриття руйнуються під впливом дії високої температури;

– суттєвий вплив на процес захисту тканини при застосуванні вогнезахисного покриття здійснюється у напрямку утворення шару коксу з еластичної плівки на поверхні тканини стійкою до руйнування під дією коливань виробу.

Такі висновки можуть вважатися за доцільні з практичної точки зору, тому що дозволяють обґрунтовано підходити до визначення необхідної кількості вогнезахисного засобу. З теоретичної точки зору це дозволяє стверджувати про ви-

значення механізму процесів гальмування температури, що є певними перевагами даного дослідження.

Однак неможливо не відмітити, що результати визначення (рис. 5) вказують на неоднозначний вплив шару пінококсу на змінення вогнезахисної ефективності. Це проявляється, в першу чергу, в температурі на оберненій поверхні зразка при випробуваннях вогнезахисної тканини. Така невизначеність накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися як недоліки даного дослідження. Неможливість зняти названі обмеження в рамках даного дослідження породжує потенційно цікавий напрям подальших досліджень. Зокрема, можуть бути орієнтовані на виявлення моменту часу, з якого починається падіння вогнезахисних властивостей до загорання тканини під впливом високої температури. Таке виявлення дозволить дослідити структурні перетворення еластичної плівки, які починають відбуватися в цей час, та визначити вхідні змінні процесу, що суттєво впливають на початок такого перетворення.

## **7. Висновки**

1. Проведено моделювання процесу передавання тепла тканиною при її захисту композицією на основі модифікованих фосфорно-амонійних з'єднань, визначено коефіцієнт теплопровідності та отримані залежності, що дозволяють одержувати зміну динаміки теплопередачі при спучуванні покриття. За експериментальними даними і отриманими залежностями розраховано коефіцієнт теплопровідності деревини, який становить відповідно 0,034 Вт/(м·К) за рахунок утворення теплоізолювального шару пінококсу.

2. Особливості гальмування процесу передавання тепла до матеріалу, що оброблений композицією на основі модифікованих фосфорно-амонійних з'єднань, полягають в утворенні на поверхні тканини теплозахисного шару коксу. Так, на поверхні зразка була створена температура, що значно перевищила температуру займання тканини, а на необігрітій поверхні не перевищила 150 °С.

## **Подяка**

Автори висловлюють подяку за фінансову підтримку роботи, виконаної в рамках бюджету фінансування № 0121U001007, а також на розробку наукових тем у програмі наукового співробітництва COST Action FP 1407 «Розуміння модифікації деревини за допомогою інтегрованого наукового та екологічного підходу» в рамках програми Європейського Союзу HORIZON2020.

## **Література**

1. Blomqvist, P., Bergstrand, A., Neumann, N., Thureson, P., Bengtsson, S. (2015). Fire safety of textile membranes in temporary structures. Fire and Materials. 14th International Conference and Exhibition, 554–567. Available at: <https://polymerandfire.files.wordpress.com/2014/11/fm15-brochure.pdf>
2. Ahmed, M. T., Morshed, M. N., Farjana, S., An, S. K. (2020). Fabrication of new multifunctional cotton–modal–recycled aramid blended protective textiles through deposition of a 3D-polymer coating: high fire retardant, water repellent

and antibacterial properties. *New Journal of Chemistry*, 44 (28), 12122–12133. doi: <http://doi.org/10.1039/d0nj02142c>

3. Zhou, Q., Chen, J., Zhou, T., Shao, J. (2020). In situ polymerization of polyaniline on cotton fabrics with phytic acid as a novel efficient dopant for flame retardancy and conductivity switching. *New Journal of Chemistry*, 44 (8), 3504–3513. doi: <http://doi.org/10.1039/c9nj05689k>

4. Takey, Y., Taussarova, B. R., Burkytbay, A. (2020). Investigation of heat processed cellulose textile materials of sol-gel composition. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 6, 236–240. Available at: [https://tftp.ivgpu.com/wp-content/uploads/2020/07/384\\_46.pdf](https://tftp.ivgpu.com/wp-content/uploads/2020/07/384_46.pdf)

5. Таусарова, Б. Р., Стасенко, А. Ю. (2019). Придание огнезащитных свойств целлюлозным текстильным материалам с применением золь – гель технологии. *Химия растительного сырья*, 4, 365–372. doi: <http://doi.org/10.14258/jcrpm.2019044286>

6. Chan, S. Y., Si, L., Lee, K. I., Ng, P. F., Chen, L., Yu, B. et. al. (2017). A novel boron–nitrogen intumescent flame retardant coating on cotton with improved washing durability. *Cellulose*, 25 (1), 843–857. doi: <http://doi.org/10.1007/s10570-017-1577-2>

7. Malucelli, G. (2019). Biomacromolecules and Bio-Sourced Products for the Design of Flame Retarded Fabrics: Current State of the Art and Future Perspectives. *Molecules*, 24 (20), 3774. doi: <http://doi.org/10.3390/molecules24203774>

8. Attia, N., Ahmed, H., Yehia, D., Hassan, M., Zaddin, Y. (2016). Novel synthesis of nanoparticles-based back coating flame-retardant materials for historic textile fabrics conservation. *Journal of Industrial Textiles*, 46 (6), 1379–1392. doi: <http://doi.org/10.1177/1528083715619957>

9. Zhu, H., Kannan, K. (2020). Determination of melamine and its derivatives in textiles and infant clothing purchased in the United States. *Science of The Total Environment*, 710, 136396. doi: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136396>

10. Ackerman, M., Batcheller, J., Paskaluk, S. (2015). Off Gas Measurements from FR Materials Exposed to a Flash Fire. *AATCC Journal of Research*, 2 (2), 1–12. doi: <http://doi.org/10.14504/ajr.2.2.1>

11. Skorodumova, O., Tarakhno, O., Chebotaryova, O., Hapon, Y., Emen, F. M. (2020). Formation of Fire Retardant Properties in Elastic Silica Coatings for Textile Materials. *Materials Science Forum*, 1006, 25–31. doi: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1006.25>

12. Tsapko, Y., Tsapko, A., Bondarenko, O. P. (2020). Research of Conditions of Removal of Fire Protection from Building Construction. *Key Engineering Materials*, 864, 141–148. doi: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.141>

13. Tsapko, Y., Tsapko, O., Bondarenko, O. (2020). Determination of the laws of thermal resistance of wood in application of fire-retardant fabric coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (10 (104)), 13–18. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.200467>

14. Tsapko, Y., Rogovskii, I., Titova, L., Bilko, T., Tsapko, A., Bondarenko, O., Mazurchuk, S. (2020). Establishing regularities in the insulating capacity of a foaming

agent for localizing flammable liquids. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10 (107)), 51–57. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.215130>

15. Potter, M. C. (2018). *Engineering analysis*. New York: Springer, 444. doi: <http://doi.org/10.1007/978-3-319-91683-5>

16. Zhang, H., Li, Y.-M., Tao, W.-Q. (2017). Theoretical accuracy of anisotropic thermal conductivity determined by transient plane source method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 1634–1644. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.025>

17. Janna, W. S. (2010). *Engineering Heat Transfer*. Boca Raton: CRC Press, 692. Available at: <https://www.routledge.com/Engineering-Heat-Transfer/Janna/p/book/9781420072020>

18. Tsapko, Y. V., Tsapko, A. Y., Bondarenko, O. P. (2020). Modeling of thermal conductivity of reed products. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 907, 012057. doi: <http://doi.org/10.1088/1757-899x/907/1/012057>

19. Бронин, Ф. А. (2008). Горелки лабораторные газовые. Устройство и характеристики. Available at: <http://www.bststgr.narod.ru>

20. Крыжановский, Ю. В., Крыжановский, В. Н. (2012). Структура и расчет газового факела. Киев: Освіта України, 96. Available at: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/2264/1/Kryzhanovskie\\_gazovyi\\_fakel.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/2264/1/Kryzhanovskie_gazovyi_fakel.pdf)

For readings only