

## Встановлення закономірностей передачі тепла через вогнезахищену тканину до деревини

Ю. В. Цапко, О. Ю. Цапко, О. П. Бондаренко

Проведеними дослідженнями процесу теплопровідності захисного екрану з вогнезахищеної тканини при термічній дії на деревину є закономірним процес передавання температури. Доведено, що залежно від теплофізичних властивостей покриття вогнезахищеної тканини це може призвести до різного ступеня передавання тепла. Тому постає необхідність дослідження умов для встановлення низької теплопровідності та встановлення механізму гальмування передачі тепла до деревини. У зв'язку з цим розроблена математична модель процесу передавання тепла до деревини при її захисті екраном з вогнезахищеної тканини. За експериментальними даними з визначення температури на не обігрівній поверхні тканини і отриманими залежностями визначено густину теплового потоку, що передається до деревини через вогнезахищену тканину. Так, з наростанням температури густина теплового потоку до поверхні деревини через захисний екран з вогнезахищеної захисної покриттям на основі «Firewall-Attic» збільшується до значення понад 16 кВт/м<sup>2</sup>, що не достатнє для займання деревини. Натомість, густина теплового потоку через захисний екран з вогнезахищеної тканини захисної покриттям на основі «Firewall-Wood» не перевищила 14 кВт/м<sup>2</sup>. Це дозволяє стверджувати про відповідність виявленого механізму формування теплоізолювальних властивостей при захисті деревини та практичну привабливість запропонованих технологічних рішень. Таким чином, особливості гальмування процесу передавання тепла до деревини через захисний екран з вогнезахищеної тканини при дії радіаційної панелі, полягають в утворенні тепло ізолювального шару пінококсу при розкладі покриття. Так, на поверхні вогнезахищеної тканини була створена температура понад 280 °С, а на не обігрівній поверхні тканини не перевищила 220 °С, що недостатнє для займання деревини.

*Ключові слова:* вогнезахист деревини, спучуючі покриття, теплопровідність, оброблення поверхні, теплофізичні властивості.

### 1. Вступ

Безпека експлуатації об'єктів зберігання тісно пов'язана з застосуванням найрізноманітніших оздоблювальних та пакувальних виробів, які виготовлено з деревини, паперових і текстильних матеріалів. Це пов'язане з тим, що ці матеріали чутливі до впливу високої температури і підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів можливо за допомогою їх вогнезахисного оброблення.

Для комплексного захисту вищенаведених матеріалів від загоряння використовують суміші неорганічних солей, але вогнезахисне оброблення для них не придатне, оскільки на поверхні спостерігається утворення висолів, які осипаються. З часом матеріал втрачає захисні властивості, що приводить до за-

ймання горючих виробів при дії полум'я пожежі. Застосування екранів з вогнезахищеної тканини дозволяє сповільнювати прогрівання матеріалу за рахунок утворення теплоізолювального шару пінококсу при спученні покриття при дії високої температури.

Таким чином, особливість вогнезахисту природних горючих матеріалів, наприклад, деревини, полягає у створенні на поверхні елементів конструкцій з деревини захисних екранів, які витримують високі температури й безпосередню дію вогню. Крім того, наявність таких екранів дозволяє сповільнити прогрівання матеріалу й зберегти свої функції при пожежі протягом заданого періоду часу, що тим самим переводить, наприклад, деревину до важкогорючих матеріалів.

Тому дослідження, що направлені на зниження рівня пожежної небезпеки деревини шляхом застосування захисних екранів з вогнезахищеної тканини, якою обгортається деревина, утворення шару пінококсу при термічному розкладі спучуючого покриття, є актуальними.

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

В роботі [1] показано, що вогнезахисні покриття на неорганічній основі підвищують вогнестійкість текстильних матеріалів при виробництві конструкцій. У зв'язку з цим запропоновано композит, зміцнений тканиною на основі цементу, приготований шляхом заповнення пористої поверхні тривимірної тканини, але характеризується жорсткістю. Але постає необхідність покращити міцність на стиск вогнестійких текстильних виробів, міцність на вигин, зносостійкість, ефективність проти проникнення.

Одним з нових матеріалів є гібридний текстиль, модифікований вуглецевими нанотрубками. У роботі [2] модифіковано текстиль шляхом прищеплення диметилфосфіту та перфторгексил йоду, що наносили на бавовну для вогнезахисну, водовідштовхувальну стійкість та стійкість до ультрафіолету. Властивості горіння текстилю оцінювали за допомогою мікромасштабного калориметра згоряння, тесту відповідності теплоті горіння та термогравіметричного аналізу. Гідрофільність поверхні та гідрофобність поверхні тканини характеризувалася статичним кутом контакту, а стійкість тканини до УФ-випромінювання представлялася величиною Ultraviolet Protection Factor. За даними мініатюрних калориметрів згоряння, як значення максимальної швидкості тепловіддачі, так і загального тепловиділення, було приблизно на 65 % нижчим, ніж у необробленої бавовняної тканини. Модифікована тканина має вогнезахисні, стійкі до ультрафіолету властивості. Однак для підтвердження ефективності не наведені відповідні фізико-хімічні дані щодо вимивання антипіренів в процесі експлуатації.

Дані роботи [3] спрямовані на модифікацію оксиду графену шляхом прищеплення диметилфосфіту та перфторгексилу йоду. Гідрофоб із диметилфосфіту був покращений у порівнянні з необробленою бавовною, але не кращим, ніж тканина, оброблена перфторогексильним ланцюговим прищепленим наведеними антипіренами. Модифікована тканина має вогнезахисні, стійкі до УФ та гідрофобні властивості. Але не сказано, для яких класів експлуатації дані речовини належать.

У роботі [4] показано захист від ультрафіолетового випромінювання та гідрофобний захист тканини шляхом модифікації бавовняної тканини оксидом

графену та силановим в'язучим агентом шляхом занурення-прокладки-сушіння. У результаті бавовняна тканина була успішно модифікована оксидом графену та силановим агентом і порівняно з необробленою тканиною, поверхня тканини була гладкою, а на волокні не було зазорів. Отримані відмінні захисні властивості від ультрафіолету та гідрофобні властивості. Після обробки силановим сполучним агентом гідрофільна тканина, оброблена оксидом графена, переводиться в гідрофобну, а оксид графена з'єднується з бавовною. Але залишаються невирішеними питання, які пов'язані з механізмом захисту. Причиною цього можуть бути тонкощі щодо утворення захисного шару, що відповідно робить такі дослідження складними.

Наноккомпозити, утворені з катіонного крохмалю і глини, вносили проти-пожежні властивості у чисту бавовняну тканину методом пошарового нанесення [5]. У цьому випадку крохмаль і глиняні багат шарові тонкі плівки використовувались для підвищення термічної стійкості тканин та покращення вогнезахисних властивостей за рахунок утворення шару керамічного вугілля та термостійкої вуглецевої структури при високій температурі. Конусова калориметрія показала нижче значення тепловиділення тканини, покритої у два шари антипіреном. Зразки бавовни з двошаровим покриттям антипіреном демонстрували зменшений час горіння при випробуваннях. Однак не сказано про вплив зміни середовища на покриття, його руйнування в часі.

Дослідження [6] спрямовано на обговорення щодо використання нової композиції на основі силікату натрію, сечовини та фосфату натрію для надання вогнезахисних властивостей целюлозним текстильним матеріалам. Необроблена тканина при випробуванні на горючість під час займання повністю вигорає за 60 с. За допомогою електронно-скануючої мікроскопії та енергодисперсійного мікроаналізу 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 %. Показано, що в целюлозних матеріалах, модифікованих композиціями на основі силікату натрію та сечовини, гідрофосфату натрію, зростають вогнезахисні властивості. Проте зі збільшенням концентрації антипірену та температури термічної обробки – розривне навантаження тканини знижується.

В роботі [7] приведений ряд борова-азотних полімерів для забезпечення вогнестійкої обробки бавовняних тканин. Органічне поєднання бору, фенілборазотної кислоти було успішно пов'язано 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 обвуглювання оброблених тканин виявив їх вогнестійкість за рахунок вогнезахисного механізму спучення антипіренів. Однак проведення робіт з вогнезахисту тканин потребує спеціального устаткування по обробленню тканини.

В роботі [8] наведено використання золь-гелевого методу. При цьому беручи тетраетил-ортосилікат та етанол як розчинник і соляну кислоту, каталіза-

тор, метакрилоксипропілтриметоксисилан як в'язучого для препаратів  $\text{SiO}_2$ , фосфорний антипірен і золі для поліпшення вогнестійкості бавовняних тканин. Обробку тканини проводили зануренням-випіканням. Морфологію поверхні та розподіл елементів, внутрішню кристалічну структуру, піроліз та вогнестійкість бавовняних тканин характеризували скануючою електронною мікроскопією, інфрачервоною спектроскопією Фур'є-перетворення, рентгенівською фотоелектронною спектроскопією. Результати показують, що оброблені тканини мають хороший синергетичний ефект вогнезахисту. Бавовняна тканина, оброблена гібридним золем, має найкращий вогнезахисний ефект, її кисневий індекс становить 22,8 %. Гібридний золь, що містить фосфорний антипірен, може сприяти утворенню тривимірного мікроскопічного гелевого покриття та залишкового вугілля в конденсованій фазі. Однак слід зазначити, що в даній роботі не наведені фізико-хімічні умови формування покриття. Це означає, що не визначено, як саме протікає процес створення покриття на тканині.

Матеріали, що містять целюлозу, небезпечні для пожежі, а при пожежі підвищують пожежне навантаження [9]. Досліджено вплив типу антипірену на основі алюмохромфосфатів та тривалості просочення на зниження горючості та температури просочених текстильних матеріалів за час їх горіння. Встановлено зниження частки зруйнованої тканини менше 20 %. Але постає необхідність зафіксувати антипірен у матеріалі.

В [10] відзначено смоли на основі меламіну, які широко використовуються в тканинах для підвищення їх вогне- і теплостійкості. Модельовані експерименти з пранням вогнезахищених тканин припускають, що за один раунд прання водою 76–90 % меламіну було видалено з одягу. При цьому не вказано на стільки знижується горіння композиції з тканини і смоли.

Досліджено вплив ступеня однорідності золю  $\text{SiO}_2$  на тривалість періоду індукції та якість вогнестійких покриттів для 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  $\text{SiO}_2$ . Але залишаються невирішеними питання, які пов'язані з механізмом утворення вогнезахисного покриття. Причиною цього можуть бути тонкощі щодо утворення захисного шару, що відповідно робить такі дослідження складними.

Таким чином, встановлено, що вогнезахисні покриття здатні захищати поверхню текстильного матеріалу від впливу вогню при експлуатації, але не встановлені параметри передачі тепла через товщину тканини.

Крім того, не визначені параметри, які забезпечують стійкість до втрати вогнезахисних властивостей, а нехтування застосуванням органічних речовин для утворення спученого шару пінококсу призводить до неефективного застосування засобів вогнезахисту. Тому для використання вогнезахищеної тканини у якості екранів для горючих виробів, наприклад, деревини, впливу покриттів на процес теплопередачі і обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

### 3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є виявлення закономірностей утворення теплостійкого екрану при впливі високої температури на вогнезахиснену тканину. Це дає можливість обґрунтувати застосування вогнезахисної тканини на об'єктах зберігання горючих виробів з деревини.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- провести моделювання процесу теплопровідності захисного екрану з вогнезахисної тканини при термічній дії на деревину;
- встановити особливості зниження теплопровідності захисного екрану з тканини захищеної спученим покриттям при високотемпературному впливі.

### 4. Матеріали і методи досліджень

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

Для встановлення вогнезахисної ефективності захисного екрану з вогнезахисної тканини використовували зразки парусинової тканини розміром 300×120 мм.

Зразки обробляли модифікованим просочувальним розчином на основі суміші органічних і неорганічних речовин «Firewall-Attic» для вогнезахисту деревини, виробництво Україна. Дана композиція (суміш карбаміду 28...30 % і фосфорних кислот 23...24 %) була модифікована крохмалем у кількості 20 %, а також використовували спучуюче покриття «Firewall-Wood», виробництво Україна (рис. 1).



Рис. 1. Модельні зразки тканини для випробувань захищених покриттями: *a* – на основі «Firewall-Attic»; *б* – на основі «Firewall-Wood»

Отриману масу перемішували і наносили на зразок тканини у кількості 137,0...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.

#### 4. 2. Методика визначення показників теплопередачі захисним екраном з вогнезахисної тканини до деревини

Визначення захисної ефективності покриття для тканини проводили за розробленою методикою, суть якої полягала у експериментальному визначенні температури на поверхні зразка деревини. А саме у впливі на зразок вогнезахисної тканини полум'я радіаційної панелі з заданими параметрами та реєструванні температури на не обігрівій (оберненій) поверхні тканини в ході випробування.

Для одержання значень теплопровідності покриття для тканини розроблено і виготовлено спеціальне обладнання та використано полум'я радіаційної панелі [13], що моделює високотемпературне джерело займання (рис. 2).

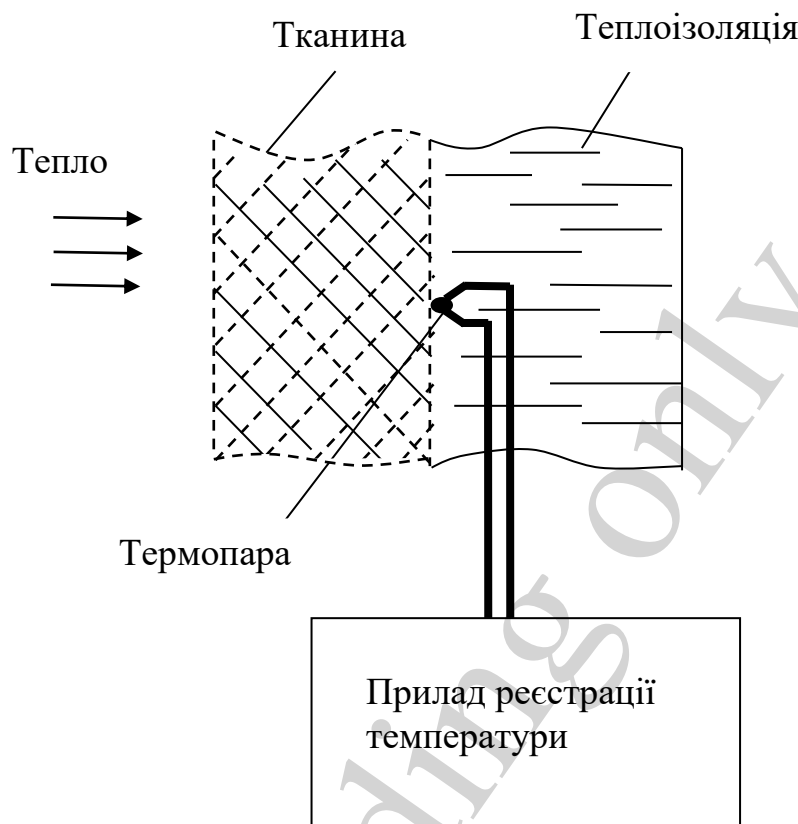


Рис. 2. Пристрій для випробувань теплопровідності вогнезахисної тканини

Зразок тканини захищений покриттям розміщували у тримачі зразка. Зразок фіксували так, щоб кінець термопари притискувався до не обігрівної поверхні зразка тканини. Зразок поміщали у випробувальну камеру і витримували у полум'ї радіаційної панелі протягом 600 с. Контролювали температуру на поверхні тканини.

По вимірних величинах температури фіксували зміни та величину теплового потоку, який передається до тканини при дії радіаційної панелі [14].

Дослідження з моделювання процесу теплопровідності вогнезахисної тканини при термічній дії проводили з застосуванням основних положень математичної фізики [15].

## **5. Результати дослідження процесу теплопровідності вогнезахисної тканини при захисті деревини**

### **5. 1. Моделювання процесу теплопровідності вогнезахисної тканини при захисті деревини**

В результаті оброблення тканини захисними покриттями під дією теплового потоку змінюється направлення передавання тепла, оскільки, теплоізоляційний шар в значній мірі здатний поглинати тепло. З урахуванням вищенаведено-

го постає питання щодо дослідження теплового потоку на межі «покриття – тканина» під час дії тепла.

З метою встановлення дії теплового потоку до вогнезахищеної тканини запропоновано метод вирішення задачі теплопровідності для двохскладової стінки з різними теплофізичними властивостями (рис. 3). В початковий момент часу зовнішня поверхність покриття миттєво нагрівається до температури  $T_{\max}$ , яка підтримується постійною протягом всього процесу нагрівання. Розподілення температури проходить через покриття до досягнення критичної температури тканини на межі “покриття стінка деревини”  $T_s$  [16]. А при врахуванні незначної товщини така температура притаманна по всій товщині тканини.

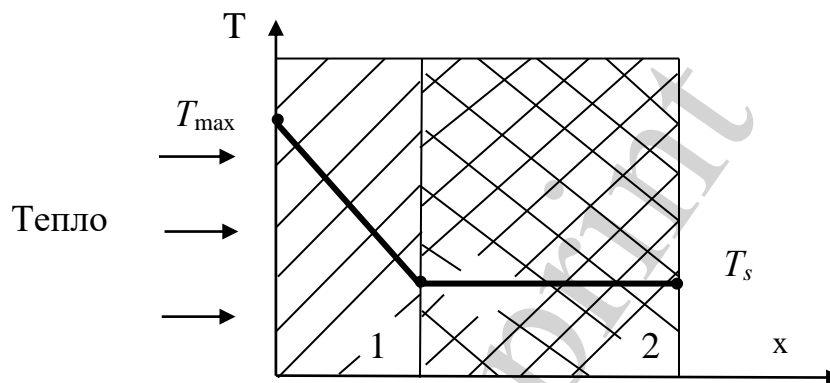


Рис. 3. Схема процесу передавання тепла: 1 – покриття; 2 – тканина

Диференціальні рівняння переносу тепла на межі двох пластин «покриття – тканина» мають вигляд [17]:

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} - \phi_1^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) T = 0, \quad (-\infty < x < 0), \quad (1)$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} - \phi_2^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) T = 0, \quad (0 < x < \infty; 0 < t < \infty), \quad (2)$$

з початковими та граничними умовами

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

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0^-} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0^+}, \quad T|_{t=0} = \begin{cases} T_0, & \text{при } x < 0, \\ 0, & \text{при } x > 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$T_0, \phi_1, \phi_2, \lambda_1, \lambda_2 = \text{const}, \quad (5)$$

де  $T$  – температура, °С;

$x$  – координата, м;

$$\phi = \sqrt{a};$$

$a_1, a_2$  – коефіцієнти теплопровідності покриття та тканини,  $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ;

$\lambda_1, \lambda_2$  – коефіцієнти теплопровідності покриття та тканини,  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{°С}^{-1}$ .

Необхідно знайти значення температури на межі «покриття – тканина»  $T_s$  і відповідно значення теплового потоку між даними областями:

$$Q_0 = \lambda_2 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=+0}. \quad (6)$$

Враховуючи, що для лівої частини моделі (рис. 3) при  $x < 0$  початкова умова не дорівнює нулю, може бути зроблена заміна:

$$T = T_0 - T^*, \quad (7)$$

де  $T_0$  – максимальна температура на межі «покриття – тканина».

Після цього задача визначення температури  $T^*$  запишеться у виді:

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} - \phi_1^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) T^* = 0, \quad (-\infty < x < 0, 0 < t < \infty), \quad (8)$$

за умови

$$T^* \Big|_{x=-\infty} = 0, \quad T^* \Big|_{t=\infty} = 0. \quad (9)$$

Для області  $x < 0$ , з урахуванням перетворення Лапласа, може бути знайдено зв'язок температури і теплового потоку у виді [18]:

$$\left( P^{1/2} - \phi_1 \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot T^* \Big|_{x=0} = 0, \quad (10)$$

де  $P$  – оператор Лапласа.

Враховуючи початкову змінну  $T$ , отримуємо:

$$P^{1/2} (T_0 - T_s) = \frac{T_0}{\sqrt{\pi \cdot t}} - P^{1/2} \cdot T_s = -\phi_1 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=-0}. \quad (11)$$

Для області при  $x > 0$  відповідно можна записати:



$$P^{1/2}T_s = -\phi_2 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=+0}. \quad (12)$$

З рівнянь (11) і (12) за умови рівності потоків (4), отримуємо:

$$P^{1/2}T_s = \frac{\phi_1}{\phi_1 + \phi_2} \frac{T_0}{\sqrt{\pi \cdot t}}. \quad (13)$$

Враховуючи перетворення Лапласа на межі стінки, отримуємо значення температури:

$$T_s = \frac{\phi_1}{\phi_1 + \phi_2} \cdot T_0. \quad (14)$$

Тоді, відповідно до (6), тепловий потік на межі при максимальній температурі визначається рівнянням:

$$Q_s = \frac{\phi_1 \cdot \phi_2}{\phi_1 + \phi_2} \frac{\lambda_2}{\phi_2^2} \frac{T_0}{\sqrt{\pi \cdot t}}. \quad (15)$$

Густина теплового потоку від температурного впливу можна виразити рівнянням [17]:

$$q_s = \frac{Q_s}{s^2} = \frac{\phi_1 \cdot \phi_2}{\phi_1 + \phi_2} \frac{\lambda_2}{\phi_2^2} \cdot \frac{T_0}{\sqrt{\pi \cdot t}} \cdot \frac{1}{s^2}, \quad (16)$$

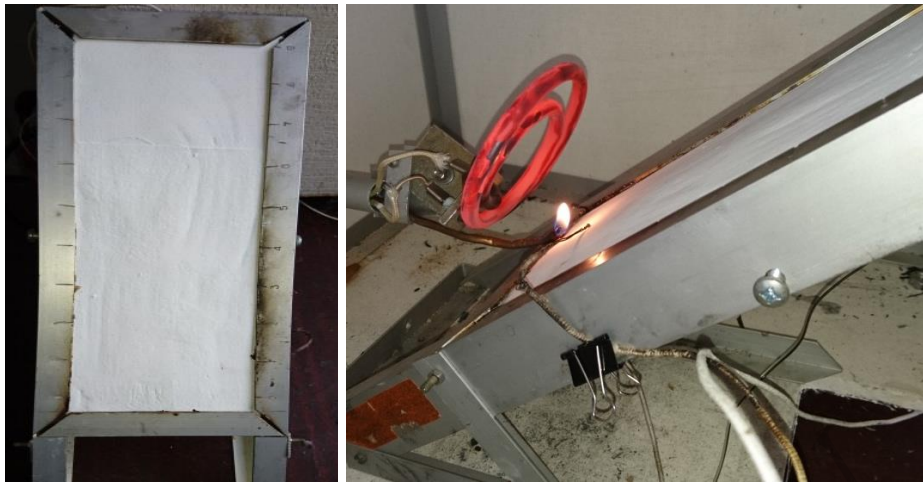
де  $s^2$  – площа термічного впливу,  $m^2$ .

Таким чином, отримані залежності, що дозволяють одержувати значення теплового потоку на необігрітій поверхні тканини захисті спучуючим покриттям. Дані залежності надають можливість безпосередньо розрахувати значення теплового потоку залежно від дії високої температури.

## **5. 2. Результати визначення теплопровідності зразка вогнезахисної тканини при дії полум'я радіаційної панелі**

Для встановлення теплопровідності покриття при захисті тканиною були проведені дослідження щодо передачі тепла при дії полум'я радіаційної панелі до деревини. Результати досліджень з передачі тепла, проведеними у лабораторних умовах, наведено на рис. 4–6.

Дослідження показали, що під дією полум'я радіаційної панелі поверхня тканини розігрілася, що привело до утворення шару пінококсу.



*a*

*б*



*в*

*г*

Рис. 4. Результати випробувань по передачі тепла радіаційної панелі через захисний екран з вогнезахищеної тканини: *a* – конструкція для випробувань; *б* – термічна дія; *в* – спучення покриття; *г* – теплоізоляційний шар пінококсу



*a*

*б*



Рис. 5. Результати випробувань по передачі тепла радіаційної панелі через захисний екран з вогнезахисної тканини: *а* – конструкція для випробувань; *б* – термічна дія; *в* – спучення покриття; *г* – теплоізоляційний шар пінококсу

При дії полум'я радіаційної панелі почалося інтенсивне передавання тепла через захисний екран з вогнезахисної тканини до поверхні деревини, що призвело до утворення теплозахисного шару пінококсу. При цьому горіння деревини не відбулося. Результати досліджень з визначення динаміки температури на необігрітій поверхні тканини, проведеними у лабораторних умовах, наведено на рис. 6.

Дослідження показали, що зразки вогнезахисної тканини витримали температурний вплив. Так, при дії теплового потоку відбувалось інтенсивне передавання тепла, що перевищило температуру займання деревини і продовжувалося протягом 600 с. При цьому, температура на не обігрітій поверхні тканини не перевищила температуру займання деревини.

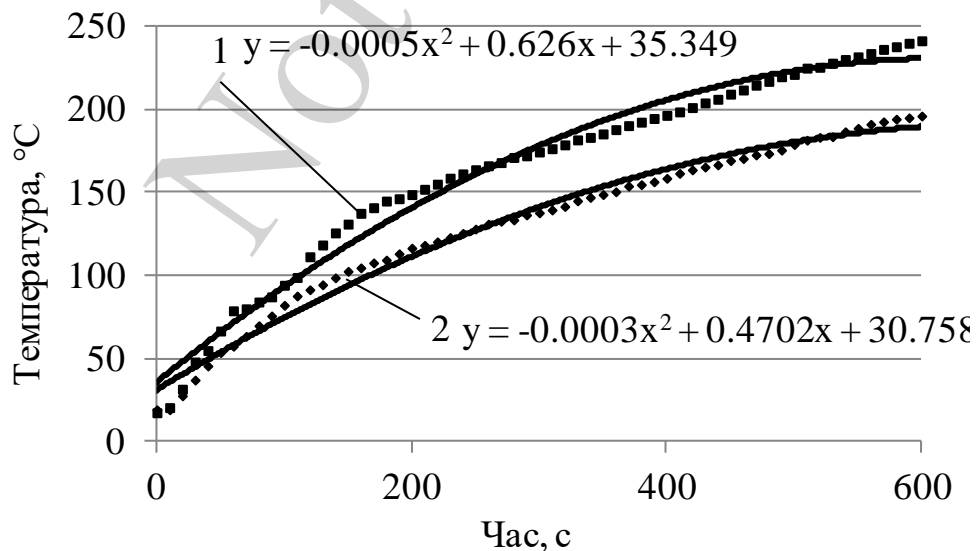


Рис. 6. Динаміка наростання температури через захисний екран з вогнезахисної тканини до поверхні деревини для покриття: 1 – на основі «Firewall-Attic»; 2 – на основі «Firewall-Wood»

Даний метод обмежується тільки визначенням температури на поверхні деревини від дії полум'я радіаційної панелі, при цьому під час теплопередачі через захисний екран з вогнезахищеної тканини зафіксовано спучення покриття, що ізолює передачу тепла. З урахуванням [12, 19, 20] встановлено теплофізичні характеристики для тканини, піно коксу для покриття «Firewall-Attic» та покриття «Firewall-Wood» (табл. 1).

Таблиця 1  
Теплофізичні характеристики матеріалів

Показник	Найменування матеріалу		
	Тканина [19]	Піно кокс «Firewall-Wood» [12]	Піно кокс «Firewall-Attic» [20]
коефіцієнт температуропровідності, м/с <sup>2</sup>	16·10 <sup>-6</sup>	0,26·10 <sup>-6</sup>	0,31·10 <sup>-6</sup>
коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	0,078	0,45	0,034

Дані табл. 1 показують різні теплофізичні характеристики матеріалів, звідки випливає, що і тепла дія через стінку покриття буде різною.

На рис. 7 представлено розрахунок густини теплового потоку  $q$  залежно від часу впливу  $t$  на тканину при горінні полум'я радіаційної панелі.

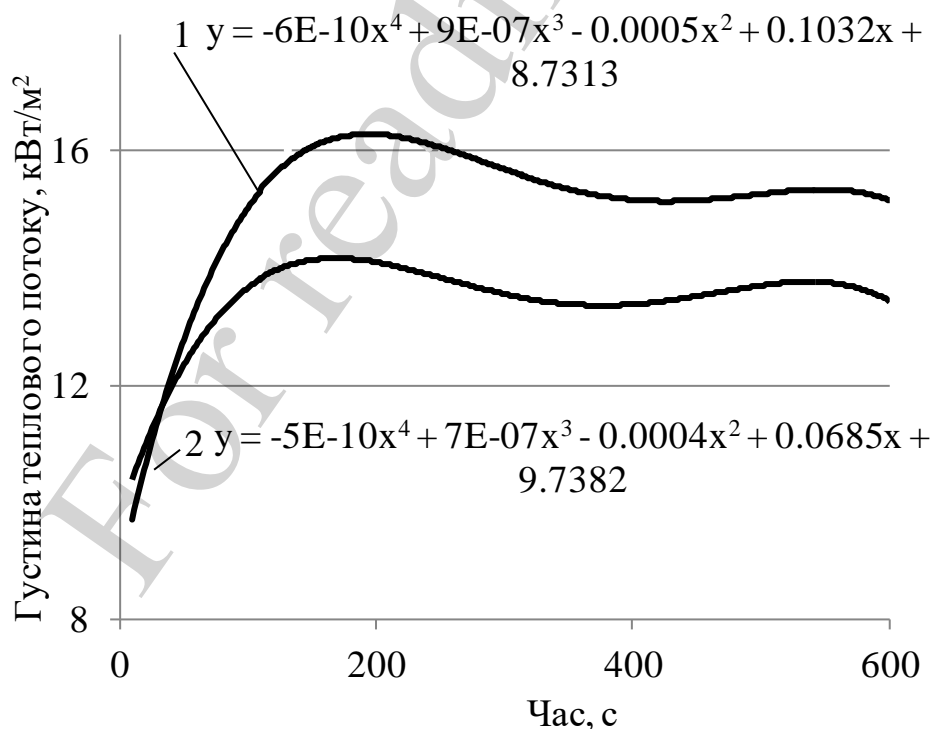


Рис. 7. Залежність густини теплового потоку від часу дії нагрівного середовища через захисний екран з вогнезахищеної тканини для покриття: 1 – на основі «Firewall-Attic»; 2 – на основі «Firewall-Wood»

Як видно з рис. 7, з наростанням температури густина теплового потоку до поверхні деревини через захисний екран з вогнезахищеної тканини для покриття на основі «Firewall-Attic» збільшується до значення понад  $16 \text{ кВт/м}^2$ . Отримане значення недостатнє для займання деревини (мінімальне значення становить  $18,0 \text{ кВт/м}^2$  [21]), а потім поступово знижується в зв'язку з утворенням шару пінококсу на поверхні тканини. Натомість, густина теплового потоку через захисний екран з вогнезахищеної тканини захищеної покриттям на основі «Firewall-Wood» не перевищила  $14 \text{ кВт/м}^2$ .

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

При дослідженні процесу захисту деревини вогнезахищеною тканиною, як витікає з отриманих результатів (рис. 4–6), закономірним є продовження часу передавання температури через вогнезахищену тканину. Це обумовлено утворенням шару спученого шару коксу на поверхні вогнезахищеної тканини при розкладі антипіренів під дією полум'я, що і уповільнює процеси передачі тепла до деревини та її горіння.

Слід зазначити, що присутність вогнезахисної композиції призводить до утворення еластичної плівки на поверхні тканини стійкої до коливань температури та вологості. Вочевидь такий механізм впливу еластичної плівки є тим фактором регулювання процесу, завдяки якому вогнестійкість тканини зберігається. В цьому сенсі має бути інтерпретація результатів визначення важкогорючості тканини після впливу полум'я, а саме теплопередачі при термічному впливі, оскільки температура на оберненій поверхні зразка склала не більше  $220 \text{ }^\circ\text{C}$ , що не достатньо загорання деревини. Це свідчить про утворення заслону для температури, який можливо ідентифікувати за методом термічного впливу на дослідженні зразки [21, 22].

Це означає, що врахування даного факту відкриває можливість для ефективного регулювання властивостями деревини при покриттях вогнезахищеною тканиною безпосередньо в умовах серійного промислового виробництва. Зіставлення експериментальних досліджень з теплоізолювання деревини при вогнезахисті тканиною та теоретичних досліджень теплоізолювання тканини свідчить про гальмування процесів теплопередачі. Підставою для цього є виявлення факту того, що температура на оберненій поверхні при дії радіаційної панелі не перевищила  $220 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Це не розходиться з практичними даними, отриманими з робіт [5, 6], автори яких, до речі, теж пов'язують ефективність вогнезахисту з утворенням шару пінококсу під впливом полум'я. Але, на відміну від результатів досліджень, опублікованих в [7, 9], отримані дані щодо впливу модифікованих антипіренів 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 те, що окремі вогнезахисні покриття руйнуються під впливом дії високої температури;

– суттєвий вплив на процес захисту деревини при застосуванні вогнезахисної тканини здійснюється у напрямку утворення теплоізоляційного екрану на поверхні деревини стійкого до термічного руйнування.

Такі висновки можуть вважатися за доцільні з практичної точки зору, тому що дозволяють обґрунтовано підходити до визначення необхідної кількості вогнезахисного засобу для тканини. З теоретичної точки зору це дозволяє стверджувати про визначення механізму процесів гальмування температури, що є певними перевагами даного дослідження.

Однак неможливо не відмітити, що результати визначення (рис. 6) вказують на неоднозначний вплив захисного екрану на змінення вогнезахисної ефективності покриття. Це проявляється, в першу чергу, в температурі на оберненій поверхні зразка при випробуваннях системи “вогнезахисна тканина-деревина”. 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 та загорання деревини під впливом високої температури. Таке виявлення дозволить дослідити структурні перетворення вогнезахисної тканини, які починають відбуватися в цей час, та визначити вхідні змінні процесу, що суттєво впливають на початок такого перетворення.

## **7. Висновки**

1. Проведено моделювання процесу теплопровідності захисного екрану з вогнезахисної тканини при термічній дії на деревину, отримані залежності, що дозволяють одержувати зміну теплового потоку на не обігрітій поверхні тканини. За експериментальними даними з визначення температури на не обігрітій поверхні тканини і отриманими залежностями визначено густину теплового потоку, що передається до деревини через вогнезахисну тканину. Так, з наростанням температури густина теплового потоку до поверхні деревини через захисний екран з вогнезахисної захисної покриттям на основі «Firewall-Attic» збільшується до значення понад  $16 \text{ кВт/м}^2$ , що не достатнє для займання деревини. Натомість, густина теплового потоку через захисний екран з вогнезахисної тканини захисної покриттям на основі «Firewall-Wood» не перевищила  $14 \text{ кВт/м}^2$ .

2. Особливості гальмування процесу передавання тепла до деревини через захисний екран з вогнезахисної тканини при дії радіаційної панелі полягають в утворенні теплоізолювального шару пінококсу при розкладі покриття. Так, на поверхні вогнезахисної тканини була створена температура понад  $280 \text{ }^\circ\text{C}$ , а на не обігрітій поверхні тканини не перевищила  $220 \text{ }^\circ\text{C}$ , що недостатня для займання деревини.

## **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. Jun, Z., Wei, X., Xingzhong, W., Peiwei, G., Zhihua, Y., Lihai, S., Jiang, W. (2020). Application and research status of concrete canvas and its application prospect in emergency engineering. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15, 155892502097575. doi: <https://doi.org/10.1177/1558925020975759>
2. Xu, J., Zhang, J. Y., Xu, J., Chang, Y., Shi, F., Zhang, Z., Zhang, H. (2020). Design of functional cotton fabric via modified carbon nanotubes. *Pigment & Resin Technology*, 49 (1), 71–78. doi: <https://doi.org/10.1108/prt-03-2019-0032>
3. Xu, J., Zhang, J., Xu, J., Miao, G., Feng, L., Zhang, Z., Zhang, H. (2019). Synthesis and properties of cotton fabric functionalized by dimethyl phosphite and perfluorohexyl group grafted graphene oxide. *Pigment & Resin Technology*, 48 (6), 515–522. doi: <https://doi.org/10.1108/prt-02-2019-0018>
4. Shi, F., Xu, J., Zhang, Z. (2019). Study on UV-protection and hydrophobic properties of cotton fabric functionalized by graphene oxide and silane coupling agent. *Pigment & Resin Technology*, 48 (3), 237–242. doi: <https://doi.org/10.1108/prt-09-2018-0098>
5. Choi, K., Seo, S., Kwon, H., Kim, D., Park, Y. T. (2018). Fire protection behavior of layer-by-layer assembled starch–clay multilayers on cotton fabric. *Journal of Materials Science*, 53 (16), 11433–11443. doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2434-x>
6. Tausarova, B. R., Stasenko, A. Yu. (2019). Giving flame retardant properties to cellulosic textile materials using sol-gel technology. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 4, 365–372. doi: <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019044286>
7. 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: <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1577-2>
8. Zhou, S., Huangfu, W., You, F., Li, D., Fan, D. (2019). Flame Retardancy and Mechanism of Cotton Fabric Finished by Phosphorus Containing SiO<sub>2</sub> Hybrid Sol. 2019 9th International Conference on Fire Science and Fire Protection Engineering (ICFSFPE). doi: <https://doi.org/10.1109/icfsfpe48751.2019.9055847>
9. Vachnina, T. N., Susoeva, I. V., Titunin, A. A. (2020). Improvement of fire protection of wood board and textile materials for premises with a massive stay of people. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 962, 022008. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/962/2/022008>
10. 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: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136396>
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: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1006.25>

12. 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: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.200467>

13. Tsapko, Y., Lomaha, V., Tsapko, A., Mazurchuk, S., Horbachova, O., Zaviyalov, D. (2020). Determination of regularities of heat resistance under flame action on wood wall with fire-retardant varnish. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (10 (106)), 55–60. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210009>

14. Tsapko, Y., Zaviyalov, D., Bondarenko, O., Marchenco, N., Mazurchuk, S., Horbachova, O. (2019). Determination of thermal and physical characteristics of dead pine wood thermal insulation products. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (10 (100)), 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.175346>

15. Potter, M. C. (2019). *Engineering analysis*. Springer, 434. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91683-5>

16. Jannot, Y., Degiovanni, A., Schick, V., Meulemans, J. (2020). Thermal diffusivity measurement of insulating materials at high temperature with a four-layer (4L) method. *International Journal of Thermal Sciences*, 150, 106230. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106230>

17. 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: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.025>

18. Janna, W. S. (2018). *Engineering Heat Transfer*. CRC Press, 692. doi: <https://doi.org/10.1201/9781439883143>

19. Bartlett, A. I., Hadden, R. M., Bisby, L. A. (2018). A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction. *Fire Technology*, 55 (1), 1–49. doi: <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0787-y>

20. Tsapko, Y., Tsapko, A., Bondarenko, O., Chudovska, V. (2021). Thermophysical characteristics of the formed layer of foam coke when protecting fabric from fire by a formulation based on modified phosphorus-ammonium compounds. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (10 (111)), 34–41. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.233479>

21. 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: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.141>

22. 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 (1), 012057. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/907/1/012057>