

УДК 648.4.05

**Ю.В. Цапко<sup>1</sup>,**

докт. техн. наук, професор  
ORCID: 0000-0003-0625-0783

**О.П. Бондаренко<sup>1</sup>,**

канд. техн. наук, доцент  
ORCID: 0000-0002-8164-6473

**О.Ю. Цапко<sup>1,2</sup>,**

канд. техн. наук, доцент  
ORCID: 0000-0003-2298-068X

**В.Ю. Апанасенко<sup>1</sup>,**

старш. викладач  
ORCID: 0000-0002-7174-132X

**К.О. Каверин<sup>1</sup>,**

канд. техн. наук, доцент  
ORCID: 0000-0001-9086-5953

**Д.С. Жеребчук<sup>1</sup>,**

студент  
ORCID: 0000-0002-7174-132X

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

<sup>2</sup>Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс"

## **ВСТАНОВЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ШВИДКОСТІ ВИГОРЯННЯ ЗРАЗКІВ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ЦЕЛЮЛОЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ**

*В роботі висвітлені питання вогнезахисту целюлозовмісних матеріалів, зокрема парусинової тканини та деревини. На процес згоряння матеріалів впливають їх фізичні властивості: густина, теплопровідність, теплоємність, а також ряд інших факторів – вологість, співвідношення між реагуючою поверхнею та об'ємом або масою матеріалу, який займається, положення його в тепловому потоці, швидкість повітряного потоку або тяга, ступінь концентрації тепла при згорянні. Опис поведінки вогнезахисних засобів та покриттів, у тому числі і спучувальних, в момент формування теплоізоляційної структури є окремим і складним завданням. Загалом він охоплює обидві стадії процесу теплозахисту: як правило розклад антипіренів під дією температури з поглинанням тепла та виділенням негорючих газів і в подальшому – спучування покриття, яке утворюється при вогнезахисті. Тому постає необхідність дослідження умов утворення бар'єру для теплопровідності та встановлення механізму вогнезахисту від шару до шару коксу. У зв'язку з цим проведено дослідження процесу вогнезахисту при роботі вогнезахисного покриття. В результаті досліджень проведених встановлено, що, швидкість вигорання вогнезахисених целюлозовмісних матеріалів залежить від чотирьох параметрів, а саме параметра, який характеризує інтенсивність розвитку полуменевого горіння ( $\alpha$ ,  $c^{-1}$ ), показника інтенсивності пригнічення реакцій горіння за рахунок вогнезахисту матеріалів ( $\gamma$ ,  $c^{-1}$ ), інтенсивності згоряння матеріалу в початковий момент часу ( $\omega_0$ ,  $kg/(m^2 \cdot c^2)$ ), початкової швидкості вигорання ( $\nu_0$ ,  $kg/(m^2 \cdot c)$ ). Отримано залежність екстремального моменту часу  $\tau$ , в якій масова швидкість*

*вигорання зразка вогнезахисного матеріалу мінімальна (швидкість вигорання зразків деревини, оброблених вогнезахисними засобами (порівняно з необробленими) зменшується в 3, 6 рази), що дозволяє більш ефективно встановити вплив просочувальних композицій на горіння зразків целюлозовмісних матеріалів.*

**Ключові слова:** *вогнезахист, вогнезахисний засіб, оброблення, целюлозовмісні матеріали, деревина.*

**Актуальність теми дослідження.** Швидкість тепловиділення під час горіння матеріалів впливає на показники пожежної безпеки. Поширення полум'я під час горіння природних та синтетичних матеріалів є чинником, що визначає інтенсивність і динаміку розвитку пожежі та залежить від ефективності вогнезахисту та масової швидкості вигорання зразків у процесі полуменевого горіння [1].

Процеси теплообміну та тепломасообміну, що відбуваються в целюлозовмісних матеріалах (деревина, тканини, папір, та ін.), залежать як від параметрів цих процесів (температура, час, кількість вологи чи парів), так і від теплофізичних властивостей матеріалів (теплопровідності, теплоємності, температуропровідності та інш.). Вони являються анізотропними тілами, тобто в різних напрямленнях мають неоднакову структуру, тому величина коефіцієнта теплопровідності для одного і того ж матеріалу не є постійною і залежить від напрямлення теплового потоку відносно волокон (паралельно волокнам чи перпендикулярно їм), їх питомої ваги, пористості, густини, температури, вологості, повітропроникності матеріалу [2, 3].

Незважаючи на існуючі розходження між целюлозними матеріалами по складу і зовнішньому вигляду, вони виявляють ряд однакових властивостей. Усі ці матеріали при нагріванні піддаються розкладу. Процес термічного розкладання протікає послідовно у дві стадії: з поглинанням енергії і виділенням енергії. Кількість енергії, що поглинається, відповідає енергії, яка необхідна для порушення існуючого стану речовини і початку мимовільного процесу її перетворення в продукти, що мають більшу стійкість в умовах нагрівання. Термічну деструкцію целюлози супроводжує хімічне окиснення, гідроліз, що прискорюється значним підвищенням температури. В результаті цих процесів отримується складна суміш продуктів глибокого розкладу, причому характер одержуваних продуктів залежить від умов протікання процесу розкладання і від того, на якій стадії він припиняється [4, 5].

Загальна властивість целюлозовмісних матеріалів виражається в їх здатності при розкладанні виділяти легкозаймисті гази та пари і залишати в звичайних умовах твердий залишок (вугілля) як кінцевий продукт піролізу.

Горіння целюлозовмісних матеріалів відбувається тільки при наявності необхідних умов. Початок горіння газоподібних продуктів піролізу починається з реалізації трикутника горіння (пожежі), відбувається взаємозв'язок між горючою речовиною, окисником та джерелом запалювання [6].

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день існують стандартні способи визначення пожежонебезпечних властивостей речовин та матеріалів [7], а також спосіб випробування для оцінювання характеристик горіння текстильних матеріалів, із яких виготовлюють штори, занавіски, декорації, одяг, навіси, намети та інші вироби, що експлуатують у вертикальному положенні [8]. Недоліком даних

способів є те, що вони не дозволяють визначити ефективність вогнезахисту зразків целюлозовмісних матеріалів, а саме втрату маси зразків після випробувань та площу пошкодження зразків і застосовуються для оцінювання характеристик горіння матеріалів під дією полум'я в лабораторних умовах, які контролюються, і не можуть бути застосовані для визначення або регламентації пожежної небезпеки матеріалів в умовах реальної пожежі.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Вогнезахист дерев'яних будівельних конструкцій полягає в створенні на поверхні теплоізолюючих екранів, що витримують безпосередню дію вогню і дозволяють деревині зберігати свої функції протягом заданого періоду часу. В роботі [9] показано опис поведінки вогнезахисного покриття, що є окремим і складним завданням та охоплює, як процес спучування покриття, так і подальший теплоперенос. Але залишаються невирішеними питання, які пов'язані з встановленням механізму утворення пінококсу.

В роботі [10] розглянуто вплив зв'язуючого з рослинної сировини на створення гнучких теплоізоляційних матеріалів, але як вирішується питання, що пов'язано з горючістю, невідомо.

В роботі [11] показано вплив термічної модифікації деревини, а також вогнезахисної здатності, які виявлено за такими характеристиками горіння, як втрата ваги, температура горіння, максимальна швидкість горіння, але не вказано хімічні зміни, викликані впливом цих факторів. Матеріали, які наведено в роботі [11], характеризуються високою вогневою стійкістю, але не показано механізм утворення коксу та температурні переходи при термічній дії.

Ефективність застосування компонентів покриття на основі органічних речовин показана в роботі [12], де за рахунок дії антипіренів на основі поліфосфорних кислот та спінювачів можливо значно впливати на формування захисного шару пінококсу. Однак, постає необхідність дослідження умов утворення бар'єру для теплопровідності та встановлення ефективної дії покриття з утворенням шару коксу.

В роботі [13] приведені найбільш перспективні вогнезахисні композиції спучуючих покриттів, які являють собою складні системи органічних і неорганічних компонентів, але залишаються невисвітленими питання щодо прояву спільної дії компонентів покриття при спіненні.

Значне підвищення стійкості, щільності і міцності захисного шару досягається внаслідок направленою формування тих чи інших добавок, які утворюють високотемпературні сполуки, що відображено в роботі [14]. Однак, для підтвердження цього процесу не наведені відповідні фізико-хімічні розрахунки.

Крім того, багато покриттів мають цілу низку недоліків, таких як нанесення окремих компонентів, втрати функціональних властивостей при збільшенні температури середовища, що показано в роботі [15]. Це означає, що не визначено, як саме протікає процес за умов температур у діапазоні розкладу вогнезахисного покриття.

Таким чином, дослідження швидкості вигорання вогнезахисних целюлозовмісних матеріалів є невирішеною складовою забезпечення вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій, що і обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

**Постановка завдання.** Метою роботи є встановлення параметрів швидкості вигорання зразків вогнезахисних целюлозовмісних матеріалів, в тому числі парусинової тканини та деревини.

**Матеріали і методи досліджень.** Для встановлення вогнезахисної ефективності текстильного матеріалу використовували зразки парусинової тканини розміром 220×170 мм. Зразки обробляли інтумесцентним покриттям, яке наносили на зразок текстильного матеріалу у кількості 137,0...140,0 г/м<sup>2</sup>. При цьому товщина вогнезахисного покриття складала близько 40 мкм.

Для випробувань деревини використовували зразки сосни розмірами 150×60×30 мм. Перед випробуванням зразки деревини кондиціонували у термошафі протягом 60±5 хв при температурі 45±5°С. Випробування проводили не пізніше ніж через 30 хв після закінчення висушування у термошафі, або до початку випробувань зразки розміщували в сухій ексикаторі.

Зразки деревини були оброблені інтумесцентною фарбою у два шари із загальною витратою в середньому 250 г/м<sup>2</sup>.

**Основна частина.** Для визначення характеристик тепловиділення матеріалів під час їхнього горіння використовується рівняння, що пов'язує швидкість тепловиділення під час горіння матеріалу з масовою швидкістю вигорання і нижчою теплою згорання [2]:

$$Q = \eta v Q_n S \quad (1)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт повноти згорання летких продуктів розкладу речовини у полум'ї;

$v$  – масова швидкість вигорання матеріалу, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$Q_n$  – нижча теплота згорання матеріалу, кДж/кг;

$S$  – площа поверхні зразка, що перебуває під дією теплового впливу, м<sup>2</sup>.

В результаті досліджень проведених в [3] встановлено, що, швидкість вигорання вогнезахисних целюлозовмісних матеріалів залежить від чотирьох параметрів, а саме параметра, який характеризує інтенсивність розвитку полуменевого горіння ( $\alpha$ , с<sup>-1</sup>), показника інтенсивності пригнічення реакцій горіння за рахунок вогнезахисту матеріалів ( $\gamma$ , с<sup>-1</sup>), інтенсивності згорання матеріалу в початковий момент часу ( $\omega_0$ , кДж/(м<sup>2</sup>·с<sup>2</sup>)), початкової швидкості вигорання ( $v_0$ , кДж/(м<sup>2</sup>·с)).

Рівняння для розрахунку швидкості вигорання вогнезахисних целюлозовмісних матеріалів представлено у наступному вигляді [2]:

$$v = v_0 + \frac{\omega_0}{\alpha - \gamma} (e^{-\gamma\tau} - e^{-\alpha\tau}) \quad (2)$$

Швидкість вигорання в початковий момент не може бути менше, ніж в подальший період, тому із (2) випливає, що  $\alpha \geq \gamma$ .

Для визначення моменту часу  $\tau$ , за якого швидкість втрати маси зразка вогнезахисного матеріалу максимальна ( $\gamma \rightarrow 0$ ,  $\alpha \rightarrow 1$ ) або мінімальна ( $\gamma \rightarrow 1$ ,  $\alpha \rightarrow 0$ ) прирівнюємо до нуля похідну функції масової швидкості вигорання (2) за часом:

$$\frac{dv}{d\tau} = -\frac{\omega_0}{\alpha - \gamma} \cdot (\gamma \cdot e^{-\gamma\tau} - \alpha \cdot e^{-\beta\tau}) = 0, \quad (3)$$

звідки

$$\tau = \frac{1}{\alpha - \gamma} \ln \frac{\alpha}{\gamma}. \quad (4)$$

Після підставлення (4) у (2) знаходимо величину максимальної масової швидкості вигорання зразка:

$$v_{max} = v_0 + \frac{\omega_0}{\alpha - \gamma} \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right)^{-\frac{\alpha}{\alpha-\gamma}} \left(\frac{\alpha}{\gamma} - 1\right) \quad (5)$$

С метою розгляду широкого діапазону визначення параметрів швидкості вигорання, введемо безрозмірні перемінні:

$$\bar{\tau} = \frac{\tau}{\bar{t}} = (\alpha - \gamma) \cdot \ln \frac{\gamma}{\alpha} \quad \text{і} \quad \bar{v} = \frac{v - v_0}{\bar{v} - v_0} \quad (6)$$

тоді (2) набуває наступного вигляду:

$$\bar{v} = \bar{\gamma}^{-\frac{\bar{\gamma}}{1-\bar{\gamma}}(1-\bar{\tau})} \cdot \frac{1 - \bar{\gamma}^{\bar{\tau}}}{1 - \bar{\gamma}} \quad (7)$$

де  $\bar{\gamma} = \gamma/\alpha$ .

В момент досягнення максимуму швидкості вигорання нові змінні приймають наступні значення  $\bar{\tau} = 1$ ;  $\bar{v} = 1$ .

На рис. 1 представлено динаміку швидкості вигорання в залежності від параметра  $\bar{\gamma}$ , який характеризує співвідношення між інтенсивністю розвитку пожежі та інтенсивністю пригнічення горіння за рахунок вогнезахисних речовин.

Отже, за ефективності вогнезахисту, що порівнюється з інтенсивністю розвитку пожежі, полуменеве горіння зразків під дією полум'я спочатку зростає, а потім, з певного моменту часу, проявляються вогнезахисні якості антипіренів й інтенсивність його зменшується.

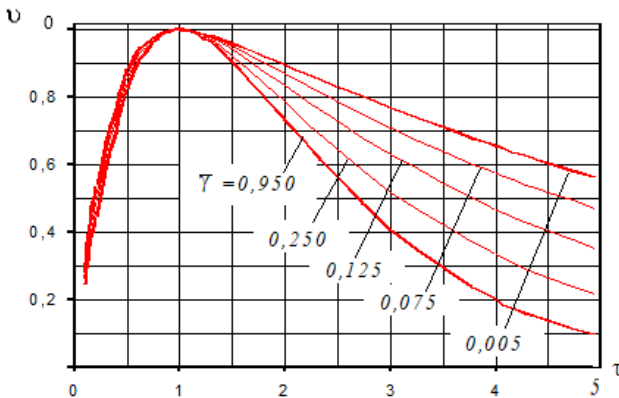


Рис. 1. Динаміка швидкості вигорання в залежності від якості вогнезахисту

Як зазначалось вище целюлозовмісні матеріали мають пористу структуру, низькі значення густини та теплової активності. Тільки утворення ізолюючої перешкоди для виходу легких продуктів і переносу тепла до фронту піролізу матеріалу в результаті перетворення її поверхні при нагріванні, може викликати такий ефект. Такою ізолюючою перешкодою є утворення модифікованого шару коксу за рахунок присутності антипіренів в целюлозовмісному матеріалі (екстремум на рис. 1).

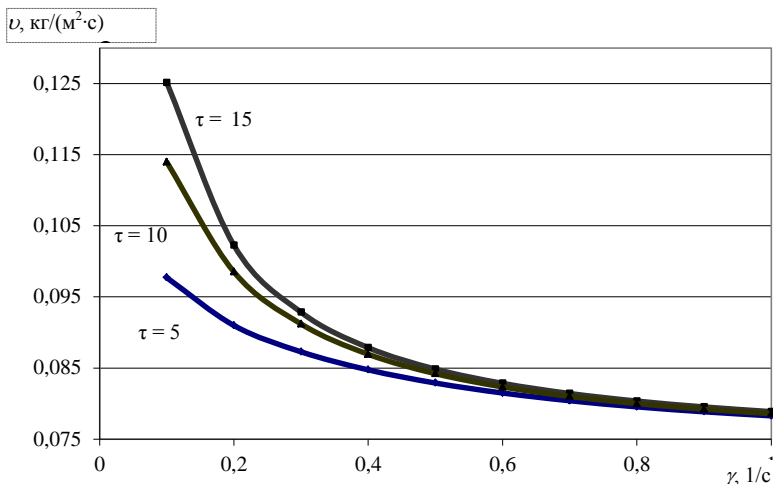


Рис. 2. Залежність масової швидкості вигорання тканини ( $v$ , кг/(м<sup>2</sup>·с)) від параметра вогнезахисту ( $\gamma$ , 1/с)

На рис. 2 наведена залежність швидкості вигорання матеріалу (бавовняної тканини) від параметра  $\gamma$ , що характеризує співвідношення між інтенсивністю розвитку пожежі й інтенсивністю пригнічення горіння вогнезахисними речовинами.

Для розрахунку приймалось [5]:  $\omega_0 = 0,005$  кг/(м<sup>2</sup>·с<sup>2</sup>);  $\alpha = 0,01$  с<sup>-1</sup>. Як видно з рис. 2, із збільшенням  $\gamma$  (підвищенням ефекту вогнезахисту) тривалість горіння скорочується. Наведені результати підтверджуються експериментальними дослідженнями [6, 7].

Розглянемо граничні випадки. Якщо зразок не оброблений вогнезахисними речовинами, то математично це означає, що або  $\alpha \gg \gamma$  або  $\gamma \rightarrow 0$ .

Тоді рівняння (2) набуває наступного вигляду:

$$v_{\gamma \rightarrow 0} = v_0 + \frac{\omega_0}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \tau}) \quad (8)$$

Це означає, що відразу після запалювання зразка починається стадія вільного розвитку пожежі й максимальна швидкість вигорання становить:

$$\hat{v}_{\gamma \rightarrow 0} = v_0 + \frac{\omega}{\alpha} \quad (9)$$

яка досягається, через нескінченно великий проміжок часу, але за допустимої похибки розрахунку  $\varepsilon$  це проходить в момент часу:

$$\hat{t}_{\gamma \rightarrow 0} = \frac{1}{\alpha} \ln \varepsilon \quad (10)$$

і потім починається період стаціонарного розвитку пожежі до повного згоряння зразка. В безрозмірних перемінних (9) запишеться у вигляді:

$$\bar{v}_{\gamma \rightarrow 0} = 1 - e^{-\bar{\tau}}, \quad (11)$$

де в нашому випадку  $\bar{\tau} = \alpha \cdot \tau$  – безрозмірний час.

У випадку ідеального вогнезахисту  $\alpha \ll \gamma$  чи при  $\alpha \rightarrow 0$  з рівняння (2) отримуємо:

$$v_{\alpha \rightarrow 0} = v_0 - \frac{\omega_0}{\gamma} (1 - e^{-\gamma \tau}), \quad (12)$$

звідки випливає, що з моменту початку впливу на зразок теплового джерела починається стадія припинення горіння. Максимальна швидкість вигорання буде  $\check{v} = v_0$ , а мінімальна  $\check{v}$  – початкова, яка знижена до рівня:

$$\check{v}_{\alpha \rightarrow 0} = v_0 - \frac{\omega_0}{\gamma}. \quad (13)$$

Після підстановки в (13) безрозмірних перемінних:

$$\bar{v}_{\alpha \rightarrow 0} = \frac{v_{\alpha \rightarrow 0} - \check{v}_{\alpha \rightarrow 0}}{v_0 - \check{v}_{\alpha \rightarrow 0}} \quad \text{і} \quad \bar{\tau} = \gamma \cdot \tau \quad (14)$$

На відміну від (11) маємо:

$$\bar{v}_{\alpha \rightarrow 0} = e^{-\bar{\tau}}. \quad (15)$$

Нарешті, якщо інтенсивність розвитку полуменевого горіння і швидкість його пригнічення приблизно однакові  $\alpha \approx \gamma$ , то:

$$v_{\alpha \rightarrow \gamma} = v_0 + \omega_0 \tau e^{-\gamma \tau} \quad (16)$$

У даному випадку мінімальною швидкістю вигорання залишається:

$$v_{\alpha \rightarrow \gamma} = v_0 \quad (17)$$

а максимальна складає:

$$v = v_0 + \frac{\omega_0}{\gamma e} \quad (18)$$

В безрозмірних змінних:

$$\bar{v}_{\alpha \rightarrow \gamma} = \frac{v_{\alpha \rightarrow \gamma} - v_0}{\hat{v} - v_0} = \gamma \cdot \tau \cdot e^{1 - \gamma \tau}. \quad (19)$$

На процес згоряння матеріалів впливають їх фізичні властивості: об'ємна вага, теплопровідність, теплоємність, а також ряд інших факторів – вологість,

співвідношення між реагуючою поверхнею та об'ємом або масою матеріалу, який займається, положення його в тепловому потоці, швидкість повітряного потоку або тяга, ступінь концентрації тепла при згорянні. Величина сприйняття матеріалом тепла може бути охарактеризована, певною мірою, добутком трьох показників його фізичних властивостей: теплопровідності, теплоємності й об'ємної маси. Відомо, що процес горіння целюлозних матеріалів носить яскраво виражений гетерогенний характер, тому розвинута поверхня горючого матеріалу має важливе значення як фактор, що сприяє прискоренню цього процесу. Важка займистість колоди або бруса великого перетину і їх уповільнене горіння пояснюється тим, що вони мають малу поверхню, яка сприймає тепло від зовнішніх джерел нагрівання, і малу поверхню теплотворення в екзотермічній стадії горіння.

Під час горіння вогнезахищеної деревини характерним є протікання процесу за недостатчі кисню. При цьому формується плоский фронт горіння, характерною особливістю якого є утворення на поверхні зразка шару модифікованого коксу, що ускладнює дифузію кисню до зони горіння.

З урахуванням вищенаведеного розраховано залежності масової швидкості вигорання вогнезахищеної деревини від фізико-хімічних властивостей композиції, які наведено на рис. 3. Для розрахунку приймалось:  $\omega_0 = 0,001 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^2)$ ,  $\alpha = 0,04 \text{ с}^{-1}$  [5].

Отримані залежності показують, що масова швидкість вигорання необробленого зразка деревини ( $\gamma = 0$ ) значно підвищується в початковий період впливу теплового потоку, а потім, в зв'язку з обугленням поверхні, уповільнюється. Наявність вогнезахисних речовин знижує масову швидкість вигорання деревини, які підтверджено і експериментальними дослідженнями [6].

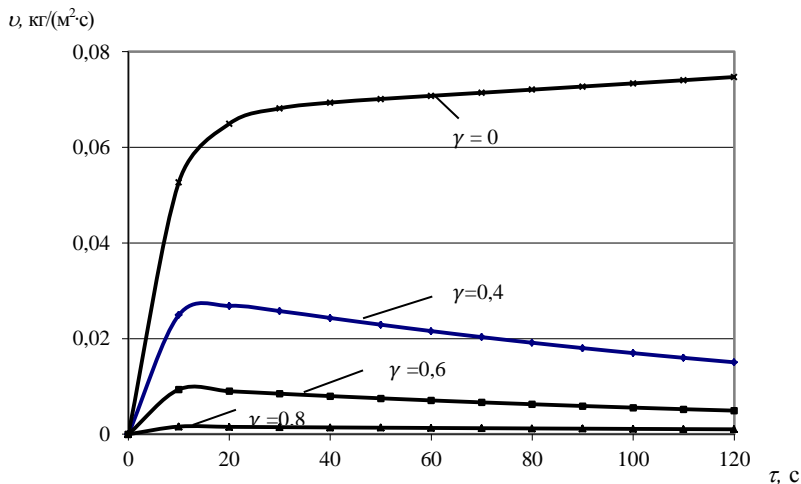


Рис. 3. Залежність масової швидкості вигорання зразка деревини  $v$  (кг/(м²·с)) від показника вогнезахисту  $\gamma$  (с<sup>-1</sup>) для різних значень  $\tau$ , с

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Таким чином, у результаті проведених досліджень отримано залежність екстремального моменту



часу  $\tau$ , в якій масова швидкість вигорання зразка вогнезахисного матеріалу мінімальна (швидкість вигорання зразків деревини, оброблених вогнезахисними засобами (порівняно з необробленими) зменшується в 3, 6 рази), що дозволяє більш ефективно встановити вплив просочувальних композицій на горіння зразків целюлозовмісних матеріалів.

Подальші дослідження будуть спрямовані на теоретичне та експериментальне вивчення процесів горіння матеріалів з деревини.

#### **Список літератури:**

1. Вінтонів І.С., Сопушинський І.М., Тайшінгер А. Деревинознавство: навч. посіб. 2-е вид., доповн. Львів: Апріорі, 2007. 312 с.
2. Цапко Ю.В., Бондаренко О.П., Цапко О.Ю. Вогнезахист виробів з текстильних матеріалів. Теорія та практика: монографія. К.: ФОП Ямчинський О.В., 2021. 139 с.
3. Бабашов В.Г., Беспалов А.С., Истомина А.В., Варрик Н.М. Теплозвукоизоляционный материал, приготовленный из растительного сырья. *Огнеупоры и техническая керамика*. 2017. 58 (2), 208–213.
4. Danilov V., Ayzenshtadt A., Makhova T. Obtaining and characterization of wood-mineral Composites. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. Vol. 18(6.1), 2018. P. 347-354.
5. Tsapko Yu., Kyryucyok V., Tsapko A., Bondarenko O., Guzii S. Increase of fire resistance of coating wood with adding mineral fillers. *MATEC Web of Conferences*, 230 (2018), 02034. P. 1-6. DOI:10.1051/mateconf/201823002034.
6. Tsapko Yu., Tsapko A. Modeling a thermal conductivity process under the action of flame on the wall of fireretardant reed. *East European Journal Enterprise Technologies*. 2018, Vol. 2, №10 (92). P. 50-56.
7. ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 78 с.
8. ДСТУ 4155-2003 Захист від пожеж. Матеріали текстильні. Метод випробування на займистість (IMO-Res. А. 471 (XII), NEQ). Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 7 с.
9. 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 (5). P. 277-284.
10. Xiao N., Zheng X., Song Sh., Pu J. Effects of Complex Flame Retardant on the Thermal Decomposition of Natural Fiber. *BioResources*. 2014, Vol. 9, Issue 3. P. 4924-4933.
11. Nine Md. J., Tran Diana N.H., Tung Tran Thanh, Kabiri Sh., Losic D. Graphene-Borate as an Efficient Fire Retardant for Cellulosic Materials with Multiple and Synergetic Modes of Action. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017, Vol. 9 (11). P. 10160-10168. DOI:10.1021/acsami.7b00572.
12. Ciripi B.K., Wang Y.C., Rogers B. Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire. *Fire Safety Journal*. 2016, Vol. 81. P. 74-84.
13. Carosio F., Kochumalayil J., Cuttica F., Camino G., Berglund L., Oriented Clay Nanopaper from Biobased Components Mechanisms for Superior Fire Protection Properties. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, 7, 10, 5847–5856. DOI:10.1021/am509058h.

14. Carosio F., Alongi J. *Ultra-Fast Layer-by-Layer Approach for Depositing Flame Retardant Coatings on Flexible PU Foams within Seconds*. *ACS applied materials & Interfaces*. 2016, Vol. 8, Issue 10. P. 6315-6319.

15. Md Nasir K., Ramli Sulong N.H., Johan M.R., Afifi A.M. An investigation into waterborne intumescent coating with different fillers for steel application. *Pigment & Resin Technology*. 2018. Vol. 47, Issue 2. P. 142–153. DOI: <https://doi.org/10.1108/prt-09-2016-0089>

### **References:**

1. Vintoniv, I.S., Sopushynskii, I.M., Tayshinger, A. (2007). “*Derevynoznavstvo*”, Lviv: Apriori, 312 p.

2. Tsapko, Y.V., Bondarenko, O.P., Tsapko, O.Y. (2021). “*Vognezakhyst vyrobiv z tekstylnykh materialiv. Teoriya ta praktyka*”, Kyiv: TOV “TSP “Komprynt”, 138 p.

3. Babashov, V.G., Bespalov, A.S., Istomin, A.V., Varrik, N.M. (2017). “Heat and Sound Insulation Material Prepared Using Plant Raw Material”, *Refractories and Industrial Ceramics*. 58 (2), 208-213.

4. Danilov, V., Ayzenshtadt, A., Makhova, T. (2018). “Obtaining and characterization of wood-mineral Composites”, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 18 (6.1), 347-354.

5. Tsapko, Yu., Kyrcyok, V., Tsapko, A., Bondarenko, O., Guzii, S. (2018) “Increase of fire resistance of coating wood with adding mineral fillers”, *MATEC Web of Conferences*, 230, 02034, 1-6. DOI: 10.1051/mateconf/201823002034.

6. Tsapko, Yu., Tsapko, A. (2018). “Modeling a thermal conductivity process under the action of flame on the wall of fire-retardant reed”, *East European Journal Enterprise Technologies*. 2, 10 (92), 50-56.

7. DSTU 8829:2019 (2020). “*Pozhezhovybukhonebezpechnist rehovyn i materialiv. Nomenklatura pokaznykiv i metody ikhnogo vyznachenya. Klasyfikatsiya*”, Kyiv: Minrehionbud Ukrainy.

8. DSTU 4155:2003 (2003). “*Fire protection. Textile materials. Flammability test method (IMO-Res. A. 471 (XII), NEQ)*”, Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy.

9. Alexandrescu, L.; Popa, M.; Georgescu, M.; Leca, M. (2013). Development of new processes intended to obtain fireproof non-asbestos textiles covered with nanodispersions based on modified polychloroprene elastomers. *Industria Textila*. Vol. 64 (5). P. 277-284.

10. Xiao, N., Zheng, X., Song, Sh., Pu, J. (2014). “Effects of Complex Flame Retardant on the Thermal Decomposition of Natural Fiber”, *BioResources*, 9, 3, 4924-4933.

11. Nine, Md J., Tran Diana, N.H., Thanh Tung, T., Kabiri, Sh., Graphene-Borate, D.L. (2017). “As an Efficient Fire Retardant for Cellulosic Materials with Multiple and Synergetic Modes of Action”, *ACS Appl. Mater. Interface*, 9 (11), 10160-10168.

12. Ciripi, B.K. Wan, Y.C., Rogers, B. (2016). “Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire”, *Fire Safety Journal*, 81, 74-84.

13. Carosio, F., Kochumalayil, J., Cuttica, F., Camino, G., Berglund, L. (2015). “Oriented Clay Nanopaper from Biobased Components Mechanisms for Superior Fire Protection Properties”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 7 (10), 5847-5856.

14. Carosio, F., Alongi, J. (2016). “Ultra-Fast Layer-by-Layer Approach for Depositing Flame Retardant Coatings on Flexible PU Foams within Seconds”, *ACS applied materials & Interfaces*, 8, 10, 6315-6319.

15. Md Nasir, K., Ramli Sulong, N.H., Johan, M.R., Afifi, A.M. (2018). An investigation into waterborne intumescent coating with different fillers for steel

application. *Pigment & Resin Technology*. Vol. 47, Issue 2. P. 142–153. DOI: 10.1108/prt-09-2016-0089

***Yu. Tsapko, O. Bondarenko, O. Tsapko, V. Apanasenko, K. Kaverin, D. Zhrebchuk  
Setting the parameters of the burnout rate of samples of flame-retardant cellulose-containing materials***

*The paper deals with the issues of fire protection of cellulose-containing materials, in particular sailcloth and wood. The combustion process of materials is influenced by their physical properties: density, thermal conductivity, heat capacity, as well as a number of other factors, such as humidity, the ratio between the reacting surface and the volume or mass of the material that is ignited, its position in the heat flow, air flow velocity or draft, and the degree of heat concentration during combustion. The description of the behavior of fire retardants and coatings, including swelling coatings, at the time of formation of the insulating structure is a separate and complex task. In general, it covers both stages of the thermal protection process: as a rule, the decomposition of flame retardants under the influence of temperature with heat absorption and the release of non-combustible gases, and subsequently the swelling of the coating formed during fire protection. Therefore, there is a need to study the conditions for the formation of a barrier to thermal conductivity and to establish the mechanism of fire protection from layer to layer of coke. In this regard, a study of the fire protection process during the operation of the fireproof coating was carried out. As a result of the research, it was found that the burnout rate of fire-retardant cellulose-containing materials depends on four parameters, namely, the parameter characterizing the intensity of flame combustion development ( $\alpha$ ,  $s^{-1}$ ), the intensity of suppression of combustion reactions due to fire protection of materials ( $\gamma$ ,  $s^{-1}$ ), the intensity of material combustion at the initial moment of time ( $\omega_0$ ,  $kg/(m^2 \cdot s^2)$ ), and the initial burnout rate ( $\nu_0$ ,  $kg/(m^2 \cdot s)$ ). The dependence of the extreme moment of time was obtained, in which the mass burnout rate of a sample of fire-protected material is minimal (the burnout rate of wood samples treated with fire-protective agents (compared to untreated ones) decreases by 3.6 times), which makes it possible to more effectively determine the effect of impregnating compositions on the burning of samples of cellulose-containing materials.*

***Keywords: fire protection, flame retardant, processing, cellulose-containing materials, wood.***

***Посилання на статтю:***

**АРА:** Tsapko, Yu., Bondarenko, O., Tsapko, O., Apanasenko, V., Kaverin, K., & Zhrebchuk, D. (2023). Setting the parameters of the burnout rate of samples of flame-retardant cellulose-containing materials. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 52(1), 90-100.

**ДСТУ:** Цапко Ю.В., Бондаренко О.П., Цапко О.Ю., Апанасенко В.Ю., Каверин К.О., Жеребчук Д.С. Встановлення параметрів швидкості вигорання зразків вогнезахисених целюлозовмісних матеріалів. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2023. № 52(1). С. 90-100.