ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ЗАПАЛЮВАННЯ ДЕРЕВНОЇ СИРОВИНИ ЗА ДІЇ ВИСОКОЇ ТЕМПЕРАТУРИ РАДІАЦІЙНОЇ ПАНЕЛІ

В. В. ЛОМАГА, аспірант*

<https://orcid.org/0000-0002-0569-9987>, e-mail: lomaga39@gmail.com

О. Ю. ЦАПКО, аспірант**

<https://orcid.org/0000-0003-2298-068X>, e-mail: alekseytsapko@gmail.com

Ю. В. ЦАПКО, доктор технічних наук, старший науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0003-0625-0783>, e-mail: juriyts@ukr.net

Національний університет біоресурсів і природокористування України

О. П. БОНДАРЕНКО, кандидат технічних наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-8164-6473>, e-mail: bondolya3@gmail.com

Київський національний університет будівництва і архітектури

Зниження пожежної небезпеки будівельної деревини є завданням не лише економічним, воно має також соціальну та екологічну спрямованість. Важливою проблемою забезпечення життєдіяльності та безпечного функціонування об'єктів будівництва є розроблення, з економічного, технологічного та екологічного поглядів, вогнезахисних покриттів для будівельних дерев'яних конструкцій. У будівництві все більш інтенсивно ведеться пошук нових високоефективних засобів вогнезахисту деревини та виробів із неї, який має не тільки забезпечувати нормовану вогнестійкість деревини, а й зберігати її експлуатаційні параметри, гарантувати екологічну безпеку і довговічність. Проведеними дослідженнями впливу радіаційної панелі на займання зразка деревини встановлено параметри часу запалювання деревного матеріалу, а оброблення вогнезахисними засобами дає можливість впливати на цей процес. Доведено, що нанесення на поверхню деревини вогнезахисного покриття створює на поверхні органічного матеріалу шар, який передбачає нагрівання до критичної температури, коли починається інтенсивний розклад матеріалу з виділенням необхідної кількості горючих газів та їх займання. Завдяки цьому можливо визначити вплив вогнезахисту та властивостей захисних композицій на процес гальмування швидкості вигорання деревини. Експериментальними дослідженнями підтверджено, що необроблений зразок деревини під термічною дією радіаційної панелі зайнявся, полум'я поширилося всією поверхнею, що призвело до його згоряння. Застосування вогнезахисного лаку під дією температурного впливу приводить до утворення шару пінококсу та гальмування теплопередачі високотемпературного полум'я до матеріалу і його загорання. Завдяки цьому стало можливим визначити умови зміни параметрів горіння та гальмування при вогнезахисті деревини, шляхом утворення бар'єра для теплопровідності. Отже, є підстави стверджувати про можливість спрямованого регулювання процесів вогнезахисту деревини шляхом застосування вогнезахисних покриттів, здатних утворювати на поверхні матеріалу захисний шар, який гальмує швидкість вигорання деревини.

Ключові слова: захисні засоби, займання, оброблення поверхні, швидкість вигорання деревини, ефективність захисту.

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор Ю. В. Цапко.

** Науковий керівник – доктор технічних наук, професор О. О. Пінчевська.

Актуальність та аналіз останніх досліджень. Деревина, як будівельний матеріал, широко застосовується у будівництві й архітектурі завдяки своїм механічним та експлуатаційним властивостям, але через підвищену горючість є пожежонебезпечним матеріалом. Підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів, де використовують будівельні конструкції з деревини, можливо за допомогою її вогнезахисного оброблення, суть якого полягає в наданні деревині здатності протистояти дії полум'я, поширенню полум'я поверхнею, у запобіганні вільному доступу кисню, який сприяє деструкції деревини і прискоренню процесу горіння. Відомо, що деревина не здатна до полуменевого горіння сама по собі, лише під дією температури горять продукти її розкладу. Введення в матеріал антипиренів зменшує кількість утворення горючих летких продуктів і запобігає їх займанню, інгібує газофазні реакції полум'я, унеможливорює безполуменеве горіння карбонізованого залишку та знижує швидкість втрати маси.

Процес горіння складається з таких стадій: 1) підсушування і нагрівання до температури початку виходу летючих речовин; 2) займання летючих речовин і їх вигорання; 3) нагрівання коксу до займання; 4) вигорання горючих речовин із коксу. На практиці ці стадії частково накладаються одна на одну, як зауважує Tsapko (2019). В роботі Gaff & Kačík (2019) досліджено вплив термічної модифікації, а також вогнезахисної здатності, виявлено за такими характеристиками горіння, як втрата ваги, швидкість горіння, максимальна швидкість горіння, але не вказано хімічні зміни, спричинені впливом цих факторів. Матеріали, які наведено у роботі Zhao & Guo (2018), характеризуються високою вогневою стійкістю, але не показано механізм утворення коксу та температурні переходи за термічної дії.

Ефективність застосування компонентів покриття на основі органічних речо-

вин показано в роботі Ciripi & Wang (2016), де за рахунок дії антипиренів на основі поліфосфорних кислот і спінювачів можливо значно впливати на формування захисного шару пінококсу. Однак постає необхідність дослідження умов утворення бар'єра для теплопровідності та встановлення ефективної дії покриття з утворенням шару коксу. Значне підвищення стійкості, щільності і міцності захисного шару досягається внаслідок направленої формування тих чи тих добавок, які утворюють високотемпературні сполуки (Carosio, 2016). Однак для підтвердження цього процесу не наведено відповідні фізико-хімічні розрахунки.

Крім того, багато покриттів мають низку недоліків, як-от нанесення окремих компонентів, втрати функціональних властивостей за збільшення температури середовища (Nasir, & Ramli Sulong, 2018). Тобто не визначено, як саме перебігає процес за умов температур у діапазоні розкладу вогнезахисного покриття. Проведено також дослідження захисних матеріалів, виготовлених із органічних речовин із розчином із колеманітової руди (Erdoğan, 2016). Показано, що завдяки встановленим співвідношенням стає можливим корегування вмісту компонентів для забезпечення процесу теплостійкості, однак не завжди неармовані склади забезпечують ефективний опір полум'я за зміни температури. Як результат, проходив процес горіння з інтенсивною втратою маси, і вирішення цього питання потребує розроблення нових підходів. Це й зумовило необхідність проведення досліджень у цьому напрямку.

Мета дослідження – виявлення закономірностей займання зразків деревини та встановлення часових параметрів процесу загорання при вогнезахисті.

Для досягнення мети вирішували такі завдання:

- встановити особливості загорання деревини за температурного впливу на зразок радіаційної панелі;

Рис. 1. Модельні зразки деревини для випробувань

Рис. 2. Випробувальна камера для визначення параметрів займання та поширення полум'я: 1 – випробувальна камера, 2 – витяжна труба, 3 – вентиляційний отвір, 4 – тримач зразка, 5 – зразок, 6 – радіаційна панель, 7 – запалювальний пристрій, 8 – регулювальна труба, 9 – оглядове скло, 10 – термопара, 11 – аналого-цифровий перетворювач, 12 – комп'ютер

- дослідити процес пригнічення швидкості загорання деревини при застосуванні захисних композицій.

Матеріали і методи дослідження. Для встановлення горючості деревини використовували зразки прямошарової деревини сосни розміром (Д×Ш×Т) 320×140×6 мм, щільністю 450÷470 кг/м³, які обробляли спучувальним вогнезахисним лаком (СВЛ) (рис. 1). в кількості по два зразки обробленої СВЛ і необробленої деревини, що зумовлено методикою дослідження.

Спучувальний вогнезахисний лак (СВЛ) пошарово наносили на поверхню зразків деревини з витратою вогнезахисного покриття у кількості 270 г/м². Після сушіння до постійної маси проводили випробування, як оброблених, так і необроблених зразків деревини. Дослідження з визначення часу запалювання деревної сировини проводили з застосуванням

пристрою (рис. 2), висвітлено у статті (Tsapko, & Tsapko, (2018).

Суть методики випробувань полягала у впливі на зразок радіаційної панелі та його запалювання, вимірюванні температури продуктів горіння та часу її досягнення, часу займання зразка (рис. 2).

Моделювання процесу запалювання деревинної сировини. У загальному вигляді математична модель займання деревини описується системою рівнянь Tsapko & Sokolenko (2005):

$$\left. \begin{aligned} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} &= \rho \frac{\partial q}{\partial t} + \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\eta}{x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial q}{\partial t} &= k_0 \cdot C_i^u \cdot Q \cdot \left(1 - \frac{q}{Q} \right)^v \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \\ T(x, 0) &= T_i; \quad q(x, 0) = 0; \\ \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} &= 0; \quad -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=H} = \alpha \cdot (T - T_i) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де ρ – щільність матеріалу, кг/м³;

c_p – теплоємність матеріалу, Дж/(кг·К);
 T – температура матеріалу, К;
 t – час, від моменту надходження матеріалу в камеру, с;

$q-i$ – частина теплоти реакції окислювання, що витрачається на згоряння матеріалу (глибина проникнення реакції), що залежить від швидкості вигорання матеріалу, Дж/кг;

λ – теплопровідність матеріалу, Вт/(м·К);

x – просторова координата, відлічувана від геометричного центра об'єму матеріалу до поверхні розподілу з навколишнім середовищем, м;

η – коефіцієнт форми об'єму: плоско-паралельна ($\eta = 0$), циліндрична ($\eta = 1$), сферична ($\eta = 2$);

k_0 – передекспоненціальний множник реакції окислювання 1/с;

C_o – об'ємна частка кисню у навколишньому середовищі;

μ – порядок реакції за киснем;

Q – тепловий ефект реакції окислювання, Дж/кг;

ν – порядок реакції;

E – енергія активації, Дж/моль;

R – універсальна газова стала, $R = 8,2314$ Дж (моль·К);

T_s – початкова температура матеріалу, К;

L – характерний лінійний розмір об'єму матеріалу, м;

α – коефіцієнт теплообміну між поверхнею матеріалу й навколишнім середовищем, Вт/(м²·К);

T_o – температура навколишнього середовища, К.

Для вирішення системи (1) введено безрозмірні змінні та параметри:

$$\theta = E(T - T_o) / (R \cdot T_s^2), \quad \xi = \frac{x}{x^*}, \quad \tau = \frac{t}{t^*},$$

$$A = E(T_s - T_o) / (R \cdot T_s^2), \quad \varepsilon = e^{-A}, \quad (2)$$

де
$$x^* = \frac{1}{\sqrt{\frac{Q \cdot E \cdot k_0}{\lambda \cdot R \cdot T_s^2} \cdot e^{\frac{E}{R \cdot T_s}}}}, \quad t^* = \frac{c \rho \cdot R T_s^2}{Q \cdot E \cdot k_0} e^{\frac{E}{R \cdot T_s}}.$$

Тоді система (1) набуває такого типу з початковими і граничними умовами:

при $0 < \xi < \infty, 0 < \tau < \infty$,

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + \varepsilon \cdot (e^\theta - 1) = 0, \quad (3)$$

з граничними умовами:

$$\Theta|_{\xi=0} = A = \text{const}, \quad \Theta|_{\xi=\infty} = 0, \quad \Theta|_{\tau=0} = 0, \quad (4)$$

Використовуючи метод Janna (2010), можна (3) представити як прогрів напів-обмеженої області зі змінними фізичними параметрами:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - \alpha(x, t) \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \beta(x, t) \frac{\partial}{\partial x} + \gamma(x, t) \right] T = 0, \quad (5)$$

і приймаючи значення:

$$\alpha = 1, \quad \beta = 0, \quad \gamma = -\varepsilon(e^\theta - 1)/\Theta, \quad (6)$$

Зв'язок безрозмірної температури $\Theta_s = A$ і її похідної $q_s = \Theta'|_{\xi=0}$, біля поверхні рішення системи (3) наведено у вигляді ряду по степені параметра ε :

$$q_s(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon^n \cdot q_n(\tau), \quad (7)$$

Найдені рекурентні співвідношення, що послідовно визначають значення q_n у вигляді рівняння Churikov (2010):

$$q_s = -\frac{A}{\sqrt{\pi \cdot \tau}} + \frac{\sqrt{\pi \cdot \tau}}{A} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\sqrt{\pi \cdot \tau}}{A} \right)^3 + \left(\frac{\sqrt{\pi \cdot \tau}}{A} \right)^5 \right]. \quad (8)$$

Звідси, використовуючи перетворення Rubtsov & Seplyarskiy (2019), знаходимо час займання за умови $q_s = 0$:

$$\tau = 0,2068 \cdot A^2. \quad (9)$$

Відповідно час займання деревини становитиме:

$$t = \frac{c \rho \cdot R T_s^2}{Q \cdot E \cdot k_0} e^{\frac{E}{R \cdot T_s}} \cdot \tau. \quad (10)$$

Результати дослідження та їх обговорення. На рис. 3 наведено результати визначення параметрів займистості деревини за заданих рівнях впливу на поверхню зразків теплового потоку та полум'я від джерела запалювання.

Рис. 3. Залежність часу спалахування τ від поверхневої густини теплового потоку q :
1 – необроблений зразок деревини

Встановлено, що під час дії теплового потоку з критичною поверхневою густиною 20 кВт/м², що відповідає значенню температури на поверхні деревини 230°C, відбувалось займання необроблених зразків деревини протягом 204 с. Зі збільшенням значення теплового потоку час спалахування зменшується (крива 1 на рис. 3). Займання захищених СВЛ зразків деревини за значення поверхневої густини теплового потоку 35 кВт/м² протягом 600 с не відбувалось.

У результаті проведених досліджень Tsapko (2011) встановлено, що температура розкладу деревини починається за температури понад 220÷235 °С. Енергія активації при розкладу деревини становить близько 44,230 кДж/моль.

Застосування вогнезахисту на основі спучувального покриття призводить до утворення теплоізоляційного шару пінококсу за температури, нижчої від температури розкладу деревини, а значення енергії активації відповідає значенню 21,87 кДж/моль, як зауважує Tsapko (2019).

Розрахований за рівнянням (10) час займання деревини при дії теплового потоку в 20 кВт/м² становитиме 233 с, натомість для вогнезахищеної деревини за рахунок утворення теплоізоляційного шару пінококсу час займання зміщується у великі часові терміни.

Із метою встановлення відповідності вогнезахисних властивостей деревини,

обробленої СВЛ, проведено експериментальні дослідження для визначення групи горючості деревини необробленої та вогнезахищеної спучувальним лаком (рис. 4).

Суть методу випробувань експериментального визначення групи важкогорючих і горючих твердих речовин і матеріалів полягає у впливі на зразок, розташований у керамічній трубі установки ОТМ, полум'я пальника з заданими параметрами (температура газоподібних продуктів горіння на виході з керамічної труби становить 200°C ± 5 °С). Під час проведення експериментальних досліджень фіксують максимальний приріст температури газоподібних продуктів горіння (Δt) та втрату маси зразка (Δm).

Максимальний приріст температури ($\Delta t_{\max}$) розраховують за формулою:

$$\Delta t_{\max} = t_{\max} - t_0, \quad (11)$$

де $t_{\max}$ – максимальна температура газоподібних продуктів горіння матеріалу, який досліджується, °С;

t_0 – початкова температура (200°C).

Втрату маси зразка (Δm) у відсотках розраховують за формулою:

$$\Delta m = \frac{m_n - m_k}{m_n} \cdot 100, \quad (12)$$

де m_n – маса зразка до випробувань, г;

m_k – маса зразка після випробувань, г.

Рис. 4. Модельні зразки вогнезахищеної деревини:
а – до випробувань, б – після випробувань

За результатами випробувань матеріали класифікують як:

важкогорючі – $\Delta t < 60^\circ\text{C}$ та $\Delta m < 60\%$;
горючі – $\Delta t \geq 60^\circ\text{C}$ чи $\Delta m \geq 60\%$.

Горючі матеріали поділяють залежності від часу (τ) досягнення максимальної температури газоподібних продуктів горіння на:

важкозаймисті – $\tau > 240$ с;
середньої займистості – $30 \text{ с} \leq \tau \leq 240$ с;
легкозаймисті – $\tau < 30$ с.

Результати досліджень із визначення втрати маси зразків та температури димових газів необробленої деревини та вогнезахищеної спучувальним лаком наведено на рисунках 5 і 6.

Результати досліджень (рис. 5) із визначення ефективності вогнезахисту деревини показали незначну втрату маси для вогнезахищеної деревини та незначну динаміку наростання температури димових газів, порівняно з деревиною без вогнезахисту.

Рис. 5. Втрата маси зразків (Δm , %) при випробуваннях: зразків необробленої деревини (1), вогнезахищеної спучувальним лаком (2) та з додаванням загусника (3)

Рис. 6. Динаміка наростання температури димових газів при випробуваннях: зразків необробленої деревини (1), вогнезахисної спучувальним лаком (2) та з додаванням загусника (3)

За значенням втрати маси зразків після вогневих випробувань, максимальної температури димових газів встановлено, що оброблення деревини вогнезахисним лаком переводить її до важкогорючих матеріалів.

Висновки і перспективи. Проведено експериментальні дослідження процесу займання зразків деревини та виявлено вплив на цей параметр вогнезахисного покриття. Визначено характеристики параметрів займання та пригнічення горіння, що дають змогу одержувати зміну динаміки горіння при розкладі вогнезахисного покриття. При цьому встановлено зміщення процесу займання зразків деревини у більші часові терміни.

Результати зіставлення експериментальних залежностей швидкості займання деревини з отриманими теоретичними значеннями показали відповідність між ними за допустимого відхилення. Визначено критеріальні характеристики параметрів горіння і припинення та встановлено, що за наявності вогнезахисту за цих часових і температурних впливів займання немає. Це свідчить про утворення теплоізоляційного шару на поверхні деревини, що запобігає вигоранню і проходженню високої температури до матеріалу.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення процесів структуроутворення захисного шару, встановлення взаємозв'язку між складовими і властивостями покриттів та оптимізації складу.

Список літератури

- 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. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b00598>
- Churikov, V. A. (2010). *Additional chapters of analysis. Fractional Integration and Fractional Differentiation Based on the d-Operator*. Tomsk [in Russian].
- Ciripi, B. K., Wang, Y. C., & Rogers, B. (2016). Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire. *Fire Safety Journal*, 81, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.01.011>
- Erdoğan, Y. (2016). Production of an insulation material from carpet and boron wastes. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 152, 197–202.
- Gaff, M., Kačík F., Gašparík M., Makovická Osvaldová, L., & Čekovská, H. (2019). The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak (*Tectona grandis* L. f.) wood. *Construction and Building Materials*, 200, 551–558. <https://doi.org/10.15376/biores.12.4.8451-8467>

- Janna, W. S. (2010). *Engineering Heat Transfer*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Nasir, K. Md., 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*, 47 (2), 142–153. <https://doi.org/10.1108/PRT-09-2016-0089>
- Rubtsov, N. M., Seplyarskiy, B. S., & Alymov, M. I. (2006). *Critical phenomena and dimensional effects in autowave waves with exothermic*. Saratov [in Russian].
- Tsapko, A. (2017). Installation of fire fighting efficiency of processed processing solution and coverage. *East European Journal Enterprise Technologies*, 4/10 (94), 62–68.
- Tsapko, Yu. V. (2011). Research of kinetic parameters at pyrolysis of wood of fire protection by impregnating means *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, 19, 163–169 [in Ukrainian].
- Tsapko, Yu., Bondarenko, O., & Tsapko, A. (2019). Effect of a flame-retardant coating on the burning parameters of wood samples. *East European Journal Enterprise Technologies*, 2/10 (98), 49–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.163591>
- Tsapko, Yu. V., Sokolenko, K. I., & Hudovych, O. D. (2005) Modeling of the process of formation of a layer of modified coke on the surface of fire-retardant wood. *Scientific bulletin of NULES of Ukraine*, 2 (12), 5–11 [in Ukrainian].
- Tsapko, Yu. V., & Tsapko, O. Yu. (2019). Influence of high temperature fillers on activation energy of coating for wood protection. *Ukrainian journal of forest and wood science*, 10 (3), 98–105 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31548/forest2019.03.098>
- Zhao, P., Guo, C., & Li, L. (2018). Flame retardancy and thermal degradation properties of polypropylene/wood flour composite modified with aluminum hypophosphite/melamine cyanurate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135, 3085–3093. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7544-9>

Lomaha, V. V., Tsapko, Yu. V., Tsapko, O. Yu., Bondarenko, O. P. (2020). Determination of the time of ignition of plant raw under the high temperature of the radiation panel. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 11 (3), 77–84. <https://doi.org/10.31548/forest2020.03.008>

Reducing the fire prevention of timber is not only an economic task, but also has a social and environmental focus. From economic, technological and environmental perspective, an important problem in ensuring the viability and safe operation of construction sites is the development of fire-retardant coatings for wooden structures. The construction is increasingly looking for new highly effective means of fire protection of wood and wood products which should not only ensure the standardized fire resistance of wood, but also to maintain its operational parameters to solve environmental safety and durability. Studies of the effect of the radiation panel on the ignition of the wood sample have set the parameters of the flame ignition, which makes it possible to influence this process. It is proved that they consist in the formation of a layer of organic material on the surface, which provides heating to a critical temperature, when the intensive decomposition of the material begins with the release of the required amount of combustible gases and their ignition. This makes it possible to determine the effect of fire protection and the properties of protective compositions on the process of slowing down the rate of burning of wood. Experimental studies have confirmed that the untreated sample of wood, under the thermal action of the radiation panel has taken up, the flames spread over the entire surface, which led to its combustion. The application of a fire retardant varnish under the influence of temperature leads to a layer of foam coke and inhibition of heat transfer of high-temperature flame to the material and its ignition. Thanks to this, it became possible to determine the conditions for changing the parameters of combustion and braking during fire protection of wood, by forming a barrier for thermal conductivity. Thus, there is reason to argue for the possibility of directional control of the processes of fire protection of wood by the use of fireproof coatings that can form a protective layer on the surface of the material, which slows down the rate of burning of wood.

Key words: protective equipment, ignition, surface treatment, wood burning rate, protection efficiency.

Отримано: 2020-09-18