

**ВСТАНОВЛЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХИСТУ ДЕРЕВИНИ ВІД ДІЇ
ВОГНЮ ПРОСОЧУВАЛЬНИМИ КОМПОЗИЦІЯМИ**

**ESTABLISHING THE EFFECTIVENESS OF FIRE PROTECTION OF
WOOD WITH IMPREGNATING COMPOSITIONS**

^{1,2}Цапко Ю.В., д.т.н., проф., ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0625-0783>,
²Бондаренко О.П., к.т.н., доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8164-6473>,
^{1,2}Цапко О.Ю., PhD, доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2298-068x>,
²Марціх А.С., к.т.н., доцент, ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-8339-2607>,
(¹Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс",
²Київський національний університет будівництва і архітектури)

¹Tsapko Yu.V., Doctor of Technical Sciences, professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0625-0783>,
²Bondarenko O.P., PhD., associate professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8164-6473>,
^{1,2}Tsapko O.Yu., PhD, associate professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2298-068X>,
²Martsikh A.S., PhD., associate professor, ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-8339-2607>
(¹Ukrainian State Research Institute "Resurs",
²Kyiv National University of Construction and Architecture)

Наведено результати досліджень параметрів горіння деревини та вплив на них вогнезахисних речовин. У результаті досліджень доведено, що процес тепло ізолювання дерев'яної конструкції полягає в утворенні сажоподібних продуктів на поверхні природного горючого матеріалу. При дії полум'я пального на захищений зразок, оброблений просочувальними розчинами на основі суміш фосфату амонію з антисептиком, температура газоподібних продуктів горіння становила 230 °С, а втрата маси не перевищила 9 %, натомість деревина, що оброблена композицією з карбаміду, фосфорних кислот та крохмалю, показала температуру 160 °С з втратою маси 3,6 %. Показано, що при дії високої температури покриття забезпечує значний коефіцієнт спучення, сприяє утворенню теплоізолювального шару коксу, що запобігає вигоранню деревини і проходженню високої температури до матеріалу. Встановлено, що вогнезахист покриттями забезпечує низьку швидкість вигорання зразків деревини і при підвищенні температурного впливу та переводить її у важкогорючий матеріал, який не поширює полум'я поверхню.

The results of studies of wood combustion parameters and the effect of fire retardants on them are presented. As a result of the studies, it was proved that

the process of thermal insulation of a wooden structure consists in the formation of soot-like products on the surface of a natural combustible material. When the burner flame was exposed to a protected sample treated with impregnating solutions based on a mixture of ammonium phosphate and an antiseptic, the temperature of gaseous combustion products was 230 °C and the mass loss did not exceed 9 %, while the wood treated with a composition of urea, phosphoric acids and starch showed a temperature of 160 °C with a mass loss of 3.6 %. It is shown that under high temperature, the coating provides a significant coefficient of swelling, promotes the formation of a heat-insulating layer of coke, which prevents the burning of wood and the passage of high temperature to the material. It has been established that fire protection by coatings provides a low burnout rate of wood samples even with increasing temperature exposure and converts it into a highly combustible material that does not spread flame over the surface.

Ключові слова: захисні засоби, вогнестійкість, втрата маси, оброблення поверхні, швидкість вигорання деревини, ефективність захисту protective agents, fire resistance, weight loss, surface treatment, wood burning rate, protection efficiency.

Вступ. Деревина, як будівельний матеріал, широко застосовується в будівництві й архітектурі завдяки своїм механічним та експлуатаційним властивостям, але у зв'язку з підвищеною горючістю є пожежонебезпечним матеріалом [1, 2]. Підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів, де використовуються 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, в запобіганні вільному доступу кисню, який сприяє деструкції деревини й прискоренню процесу горіння [3, 4].

Огляд останніх досліджень та публікацій. Вогнезахист дерев'яних будівельних конструкцій полягає в створенні на поверхні теплоізолюючих екранів, що витримують безпосередню дію вогню і дозволяють зберігати свої функції протягом заданого періоду часу. В роботі [5] показано роботу вогнезахисного покриття, що охоплює спучування покриття і теплоперенос. Але залишаються невирішеними питання, які пов'язані з механізмом утворення пінококсу. Крім того у роботі [6] розглянуто вплив зв'язуючого на основі рослинної сировини на утворення теплоізоляційних матеріалів, однак залишається невирішеним питання, яке пов'язано з вогнестійкістю. В роботі [7] досліджено вогнезахисну здатність за такими характеристиками горіння, як втрата ваги, швидкість горіння, максимальна швидкість горіння, але не вказано хімічні зміни, викликані впливом цих факторів. Матеріали, які наведено у роботі [8] характеризуються високою вогневою стійкістю, але не показано температурні переходи при термічній дії.

Ефективність застосування композицій на основі органічних речовин описано в роботі [9], де за рахунок дії антипіренів на основі поліфосфорних кислот та спінювачів можливо значно впливати на формування захисного шару пінококсу. Однак постає необхідність дослідження зміни теплопровідності та встановлення ефективної дії покриття з утворенням шару коксу.

В роботі [10] 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. Крім того не враховується зміна поверхні покриття.

Значне підвищення стійкості, щільності і міцності захисного шару досягається внаслідок направленою формування тих чи інших добавок, які утворюють високотемпературні сполуки [11]. Однак більшість композицій змінюють колір поверхні та не забезпечують первинний вигляд матеріалу.

Крім того, багато покриттів мають цілу низку недоліків, таких як нанесення окремих компонентів, втрати функціональних властивостей при збільшенні температури середовища [12]. Це означає, що не визначено, як саме протікає процес за умов температур у діапазоні розкладу вогнезахисного покриття.

Проведені також дослідження захисних матеріалів, виготовлених із застосуванням рідкого скла [13]. Отримані результати, спрямовані на розвиток технології та матеріалів, що поєднують вогнестійкість, низьку теплопровідність та технологічність виробів та захисних покриттів. Однак не визначена життєдіяльність покриття.

Синергічна дія вогнезахисних компонентів для епоксидної композиції, армованої природними волокнами, як вогнезахисного матеріалу наведена у роботі [14], але показано що не завжди неармовані склади не могли забезпечити ефективний опір полум'я при зміні температури. А тому проходив процес горіння з інтенсивною втратою маси, і для вирішення цього питання потребує розроблення нових підходів.

В роботі [15] описано композити епоксидної смоли, підсилені та уповільнені від вогню поверхнево обробленими вуглецевими волокнами. Однак такі покриття мають темний колір і при обробленні змінюють поверхню дерев'яного виробу.

Тому встановлення параметрів вогнезахисту деревини і впливу компонентів, які входять до їх складу, на цей процес є невирішеною складовою забезпечення вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій. Це і обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є дослідження ефективності вогнезахисту деревини просочувальними композиціями на основі фосфорно-амонійних солей з додаванням полімерних плівкоутворюючих речовин.

Матеріали і методи досліджень. Для встановлення горючості деревини, використовували зразки сосни деревини, необроблений та які оброблювали (рис. 1):

– просочувальним розчинами на основі суміш фосфату амонію з антисептиком “Гембар”;

– композицією з карбаміду і фосфорних кислот та крохмалю.

Склади пошарово наносили на поверхню зразків деревини сосни ($\rho = 450 \dots 470 \text{ кг/м}^3$) з витратою $240 \dots 260 \text{ г/м}^2$. Після сушки до постійної маси проводили випробування, як оброблених так і для порівняння необроблених зразків деревини.

Для проведення дослідження використовували установку з визначення групи горючості матеріалів [10], яка додатково була оснащена пристроєм для реєстрації зміни маси зразка в ході випробувань і виміру температури димових газів за допомогою термопар (рис. 2).

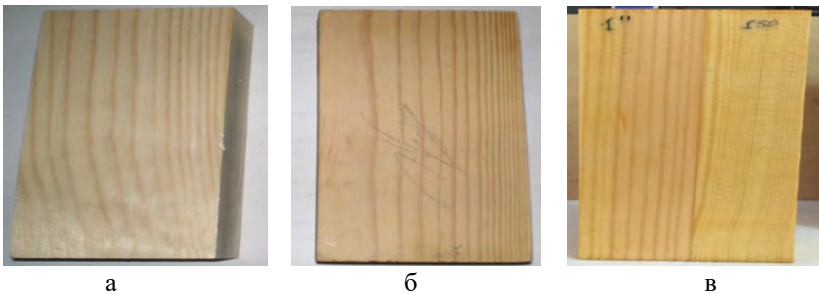


Рис. 1. Модельні зразки вогнезахисної деревини:

а – необроблений, б – оброблений просочувальними розчинами на основі суміш фосфату амонію з антисептиком “Гембар”;

в – оброблений композицією з карбаміду і фосфорних кислот та крохмалем

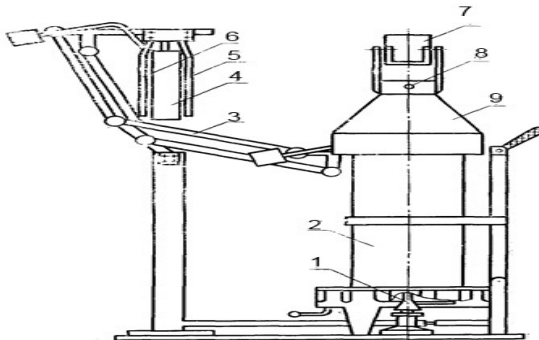


Рис. 2. Установка для визначення горючості деревини:

1 – газовий пальник; 2 – керамічний короб; 3 – пристрій подачі зразка;

4 – зразок; 5, 6 – держак зразка; 7 – дзеркало; 8 – термоелектричний перетворювач;
9 – верхній патрубок зонта

Суть методу випробувань експериментального визначення групи важкогорючої деревини полягає у впливі на зразок, що розташований в установці, полум'я пальника або радіаційної панелі з заданими параметрами та вимірюванні втрати маси у певні періоди часу та розрахунку швидкості вигорання зразків деревини за рівнянням:

$$m_i = \frac{\Delta m}{\tau \cdot S}, \quad (1)$$

де Δm – втрата маси зразка в процесі випробувань, кг;

τ – час випробування, с;

S – площа поверхні зразка, м².

Під час проведення експериментальних досліджень з визначення групи горючості фіксується максимальний приріст температури газоподібних продуктів горіння (Δt) та втрата маси зразка (Δm).

За результатами випробувань матеріали класифікуються як:

– важкогорючі – $\Delta t < 60$ °C та $\Delta m < 60$ %;

– горючі – $\Delta t \geq 60$ °C чи $\Delta m \geq 60$ %.

Результати досліджень. Для встановленні вогнезахисної ефективності при дослідженні просочувального розчину і покриттів були проведені дослідження щодо визначення групи горючості деревини при обробленні зазначеними композиціями. На рис. 3, 4 показано результати випробувань.



Рис. 3. Результати визначення горючості деревини:

а – необроблена, б – зразок, оброблений просочувальними розчинами на основі суміш фосфату амонію з антисептиком “Гембар”

Як видно з рис. 3 після впливу полум'я пальника зразок загорівсь, що привело до його вигорання та значного обуглювання. При термічній дії на зразки деревини обробленої просочувальними розчинами на основі суміш фосфату амонію з антисептиком “Гембар” показали, що зразок під дією полум'я зуглився, але значне вигорання не відбулося.

Дослідження показали (рис. 3, 4), що деревина відноситься до горючих матеріалів, просочена деревина витримала температурний вплив і відноситься до важкогорючих матеріалів за показником втрати маси. При початковій температурі газоподібних продуктів горіння $T=200$ °С, при дії полум'я пальника на захищений зразок оброблений просочувальними розчинами на основі суміш фосфату амонію з антисептиком “Гембар”, температура газоподібних продуктів горіння становила $T \leq 260$ °С, а втрата маси не перевищила 9 %. Ще більшу ефективність показали зразки, які було оброблено оброблений композицією з карбаміду і фосфорних кислот та крохмалем крива 3 з втратою маси 3,6 %.



Рис. 4. Результати визначення горючості деревини:

а – пристрій для випробувань, б – зразок, оброблений композицією з карбаміду і фосфорних кислот та крохмалем

Оцінювання характеристик горіння матеріалів після випробування на займистість проведено по коефіцієнту ефективності:

$$K_m = \frac{v_n}{v_m} \cdot \left(1 - \frac{T_{\max}^m}{T_{\max}^n} \right), \quad (2)$$

де T_{\max}^n , T_{\max}^m – температура димових газів при випробуваннях необроблених та вогнезахищених зразків, відповідно;

v_n , v_m – масова швидкість вигорання необроблених та вогнезахищених зразків, яку розраховують за формулою:

$$v_{n(m)} = \frac{\Delta m}{\tau \cdot S}, \quad (3)$$

де Δm – втрата маси зразка після випробувань;

τ – час випробування;

S – площа пошкодження зразка.

Встановлено, що швидкість вигорання зразків деревини, оброблених просочувальними засобами та покриттями порівняно з необробленими

зменшується в 3,1...7,1 рази (табл. 1). Розраховані коефіцієнти ефективності вогнезахисту (K_T) при горінні деревини, які наведено у табл. 2.

Таблиця 1

Швидкість вигорання зразків деревини

| Зразки деревини | Втрата маси $\Delta m \cdot 10^3$, кг | Час випробування τ , с | Площа пошкодження зразка S , m^2 | Швидкість вигорання зразка v , $kg/(m^2 \cdot c)$ |
|---|--|-----------------------------|--------------------------------------|---|
| необроблений | 91,23 | 300 | 0,0024 | 0,128 |
| оброблений сумішшю фосфатів та сульфатів амонію і антисептиком “Гембар” | 19,20 | 300 | 0,001 | 0,041 |
| оброблений композицією з карбаміду і фосфорних кислот та крохмалю | 5,15 | 300 | 0,00095 | 0,018 |

Таблиця 2

Коефіцієнти ефективності вогнезахисту деревини

| Зразки деревини | Максимальна температура димових газів, $^{\circ}C$ | Коефіцієнт ефективності, K_T |
|---|--|--------------------------------|
| необроблений | 360 | — |
| оброблений сумішшю фосфатів та сульфатів амонію і антисептиком “Гембар” | 235 | 1,08 |
| оброблений композицією з карбаміду і фосфорних кислот та крохмалю | 160 | 3,95 |

Як видно з табл. 1 за однаковий час випробування площа пошкодження зразка та швидкість вигорання вогнезахисчених зразків значно нижче порівняно з необробленою, особливо це проявляється для деревини оброблений композицією з карбаміду і фосфорних кислот та крохмалем. Дана композиція утворює на поверхні деревини спучений шар пінококсу, який ефективно протидіє температурі, що підтверджується коефіцієнтом ефективності.

Висновки. У результаті проведених досліджень встановлено ефективність вогнезахисту деревини просочувальним засобом та композицією спучувального типу на основі карбаміду і фосфорних кислот та крохмалем, зокрема, випробування на модельних зразках вогнезахисненої деревини показали, що просочення характеризується розкладом антипіренів під дією температури з поглинанням тепла та виділенням негорючих газів, гальмування окислення в газовій і конденсованій фазі. Натомість покриття при дії високої температури утворює значний коефіцієнт спучення, сприяє

утворенню теплоізолювального шару коксу, що запобігає вигоранню деревини і проходженню високої температури до матеріалу.

1. Tsapko Yu., Zaviolov D., Bondarenko O., Pinchevs'ka O., Marchenko N., Guzii, S. Design of fire-resistant heat- and soundproofing wood wool panels / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – Vol. 3 (10-99). – 2019. – P. 24-31. doi: 10.15587/1729-4061.2019.166375.

2. Shi X.-H., Chen L., Zhao Q., Li Y.-M., Wang Y.-Z. Epoxy resin composites reinforced and fire-retarded by surficially-treated carbon fibers via a tunable and facile process / *Composites, Science and Technology*. – Vol. 187. – 2020. – 107945.

3. Tsapko Yu., Tsapko A., Bondarenko O. Modeling of thermal conductivity of reed products / *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Innovative Technology in Architecture and Design*. – Vol. 907. – 2020. – 012057. doi:10.1088/1757-899X/907/1/012057.

4. Tsapko Yu.V., Tsapko A.Yu., Bondarenko O.P., Sukhanevych M.V., Kobryn M.V. Research of the process of spread of fire on beams of wood of fire-protected intumescent coatings / *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – Vol. 708. – 2019. – 012112. doi:10.1088/1757-899X/708/1/012112.

5. Tsapko Yu., Lomaha V., Bondarenko O., Sukhanevych M. Research of mechanism of fire protection with wood lacquer / *Materials Science Forum*. – Vol. 1006. – 2020. – P. 32-40. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.32.

6. Krüger S., Gluth G.J.G., Watolla M.B., Morys M., Häßler D., Schartel B. Neue Wege: Reaktive Brandschutzbeschichtungen für Extrembedingungen / *Berlin, Bautechnik*. – Vol. 93 (8). – 2016. – P. 531-542.

7. Xiao N., Zheng X., Song S., Pu J. Effects of Complex Flame Retardant on the Thermal Decomposition of Natural Fiber / *United States: BioResources*. – Vol. 9 (3). – 2014. – 4924-4933.

8. Gaff M., Kačík F., Gašparík M., Makovická Osvaldová L., Čekovská H. The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak / *Construction and Building Materials*. – Vol. 200 (1). – 2019. – P. 551-558.

9. Zhao P., Guo C., Li L. Flame retardancy and thermal degradation properties of polypropylene/wood flour composite modified with aluminum hypophosphite/melamine cyanurate / *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2018. – P. 1-9.

10. Ciriipi B.K., Wang Y.C., Rogers B. Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire / *Fire Safety Journal*. – Vol. 81 (1). – 2016. – 74-84.

11. Nine J., Tran D. N. H., Thanh Tung T., Kabiri Sh., Losic D. Graphene-Borate as an Efficient Fire Retardant for Cellulosic Materials with Multiple and Synergetic Modes of Action / *School of Chemical Engineering*. – Vol. 9 (11). – 2017. – P. 10160-10168.

12. 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*. – Vol. 8 (10) – 2016. – P. 6315-6319.

13. 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*. – Vol. 47 (2). – 2018. – P. 142-153.

14. Erdoan Y. Production of an insulation material from carpet and boron wastes / *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*. – Vol. 152. – 2016. – P. 197-202.

15. Khalili P., Tshai K.Y., Hui D., Kong I. Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy composites / *Composites, Part B: Engineering*. – Vol. 114. – 2017. – P. 101-110.