

**ОСОБЛИВОСТІ ВОГНЕЗАХИСТУ ТЕРМІЧНО МОДИФІКОВАНОЇ
ДЕРЕВИНИ ІНТУМЕСЦЕНТНИМ ПОКРИТТЯМ**

**FEATURES OF FIRE PROTECTION OF THERMALLY MODIFIED
WOOD WITH INTUMESCENT COATING**

^{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., ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2298-068x>,
²Каверин К.О., к.т.н., доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9086-5953>,
(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., Ph.D., associate professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8164-6473>,
^{1,2}Tsapko O.Yu., PhD, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2298-068X>,
²Kaverin K.O., Ph.D., associate professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9086-5953> (¹Ukrainian State Research Institute "Resurs", ²Kyiv National University of Construction and Architecture)

У останній час набули поширення покриття, що здатні до утворення на поверхні будівельної конструкції теплоізоляційного шару, який у значній мірі знижує процеси передачі тепла до матеріалу. Для визначення ефективності протипожежного захисту в розроблених покриттях були проведені дослідження щодо горючості термічно модифікованої деревини з точки зору втрат маси та підвищення температури димових газів, і встановлено, що при нанесенні покриттів ступінь пошкодження зразків за масою не перевищує 5,6 %, а температура димових газів не перевищує 76 °С. Результати визначення ефективності покриття для системи показали, що під впливом високотемпературного полум'я горіння матеріалу та втрати маси покриття зменшуються за рахунок утворення високотемпературних сполук, при цьому час досягнення граничної температури збільшується. Крім того, під дією високотемпературного полум'я вогневої печі інтумесцентне покриття може витримувати високі температури, ефективно запобігає проникненню тепла до матеріалу за рахунок утворення спученого шару коксу, який впливає на швидкість і глибину поглинання температури.

Recently, coatings that are capable of forming a heat-insulating layer on the surface of a building structure have become widespread, which significantly

reduces the processes of heat transfer to the material. To determine the effectiveness of fire protection in the developed coatings, studies were conducted on the flammability of thermally modified wood in terms of mass loss and increase in flue gas temperature, and it was found that when the coatings were applied, the degree of damage to the samples by weight did not exceed 5.6 %, and the flue gas temperature did not exceed 76 °C. The results of determining the effectiveness of the coating for the system showed that under the influence of a high-temperature flame, the combustion of the material and the loss of mass of the coating decreases due to the formation of high-temperature compounds, while the time to reach the limiting temperature increases. In addition, under the influence of a high-temperature flame of a fire furnace, it was shown that the intumescent coating, which can withstand high temperatures, effectively prevents heat from penetrating the material due to the formation of a swollen layer of coke, which affects the rate and depth of temperature absorption.

Ключові слова: термічно модифіковано деревина, інтумесцентне покриття, втрата маси, пінокок, обробка поверхні, ефективність захисту
thermally modified wood, intumescent coating, mass loss, foam coke, surface treatment, protection efficiency.

Вступ. Деревина, широко застосовується в будівництві й архітектурі завдяки своїм механічним та експлуатаційним властивостям, але під впливом атмосферних чинників руйнується. З метою підвищення рівня експлуатації будівельних конструкцій з деревини проводиться її термічне модифікування, суть якого полягає в наданні деревині здатності протистояти, наприклад, дії вологи та запобігати біологічній деструкції деревини, але така деревина є горючою. Зниження пожежної небезпеки будівельної деревини є завданням не лише економічним, а має соціальну та екологічну спрямованість. Вогнезахист сьогодні повинен не тільки забезпечувати нормовану вогнестійкість деревини, а також зберігати її експлуатаційні параметри. Тому важливою проблемою забезпечення життєдіяльності та безпечного функціонування об'єктів будівництва є розроблення, з економічної, технологічної та екологічної точок зору, інтумесцентних покриттів для термічно модифікованої деревини, що уможливило запобігання виникненню техногенних аварій.

Огляд останніх досліджень та публікацій. В роботі [1] показано, що термічне модифікування деревини призводить до зміни маси, змочуваності та кольору деревини, дозволяє підвищити стійкість до руйнування за рахунок хімічних перетворень складових деревини. Але залишаються невирішеними питання, які пов'язані з встановленням вогнезахисту, моделюванні та вивченні причин поліпшення властивостей модифікованої деревини. Ефективність застосування вогнезахисних покриттів на основі органічних

речовин показана в роботі [2]. За рахунок дії антипіренів на основі поліфосфорних кислот та спінювачів можливо значно впливати на формування пористого шару пінококсу. Але не сказано, для яких класів експлуатації вони належать.

Найпростіші вогнезахисті засоби на основі неорганічних в'язучих матеріалів містять у своєму складі зв'язану воду, яка під час нагрівання випаровується і блокує перенос тепла до захищеної поверхні. У якості зв'язки використовують здебільшого натрієве рідке скло, портландцемент, глиноземистий цемент, фосфатні і алюмосилікатні в'язучі [3]. Такі матеріали характеризуються незначною еластичністю, при дії температурного фактору в навколишнє довкілля виділяють тільки водяні пари [4]. Однак такі покриття є недовговічними та не ефективними, а також не забезпечують достатньої адгезійної міцності, оскільки вони мають великий температурний коефіцієнт лінійного розширення.

Опис поведінки інтумесцентних покриттів, однією із завдань якого є ув'язка експериментальних даних з наявними теоретичними моделями, присвячено роботу [5]. Це дозволяє оцінювати зроблені спрощення однак тільки щодо термічної стійкості, де розглядається теплофізична модель. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані з стійкістю даних покриттів до атмосферних коливань при застосуванні в зовнішніх умовах.

Ефективність застосування компонентів покриття на основі органічних речовин показана в роботі [6], 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 тепло- та вологопровідності і встановлення ефективної дії покриття з утворенням захисного шару.

Значне підвищення стійкості, щільності і міцності захисного шару досягається внаслідок направленою формування тих чи інших добавок, які утворюють високотемпературні сполуки [7]. Але для підтвердження цього процесу не наведені відповідні фізико-хімічні дані, щодо вимивання в процесі експлуатації.

Вплив неорганічних наповнювачів на вогнезахисне покриття на водній основі показав свою ефективність [8], однак механізм спучення покриття при цьому не вказаний та не виявлені умови експлуатації покриття. Авторами приведена аналітична модель вогнестійкості та термічної деградації пористої структури пінококсу вогнезахисного покриття, яка враховує форми пір, але дана модель не враховує, які фазові перетворення покриття відбуваються при експлуатації у вологому середовищі [9].

У роботі запропоновано математичну модель та методику чисельного дослідження кінетики стану тепла і вологості капілярно-пористого тіла, побудованого на одночасному рівнянні рішення теплопровідності та передачі вологи [10]. Однак дані дослідження притаманні для неорганічного матеріалу і віднести їх для деревини неможливо.

Проведені також дослідження захисних матеріалів, виготовлених із органічних речовин з розчином колеманітової руди [11]. Показано, що завдяки встановленим співвідношенням стає можливим корегування вмісту компонентів для забезпечення процесу теплостійкості. Проте не сказано про деградацію покриття при експлуатації.

Синергічна дія поліфосфат амонію і тригідрат оксиду алюмінію в якості вогнезахисних компонентів для епоксидної композиції, армованої природними волокнами, як вогнезахисного матеріалу наведена у роботі [12]. Де показано, що не завжди склади могли забезпечити ефективний опір полум'я при зміні температури. Оскільки проходив процес горіння з інтенсивною втратою маси, і для вирішення цього питання потрібне розроблення нових підходів, у тому числі і врахування експлуатації при підвищеній вологості та коливаннях температур.

Тому встановлення ефективності вогнезахисту термічно модифікованої деревини є невирішеною складовою забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій, що обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є визначення особливостей вогнезахисту термічно модифікованої деревини інтумесцентним покриттям.

Для досягнення мети були поставлено такі задачі:

- провести моделювання процесу теплостійкості термічно модифікованої деревини при дії високої температури на інтумесцентне покриття;
- встановити особливості прогорання термічно модифікованої деревини при її обробленні інтумесцентним покриттям.

Матеріали і методи досліджень. Для встановлення індексу горючості будівельної конструкції з термічно модифікованої деревини використовували зразки, необроблений (рис. 1) та які оброблювали вогнезахисним інтумесцентним покриттям на основі органічних та неорганічних речовин. Витрата вогнезахисного покриття, що складається з композиції (суміш карбаміду 28...30 % і фосфорних кислот 23...24 % та крохмалю 20%) з додаванням акрилової смоли 25% та поліфосфату амонію 25% становила 260 г/м².



Рис. 1. Зразок термічно модифікованої деревини:
а – необроблений; б – вогнезахиснений інтумесцентним покриттям

Виникнення горіння, наприклад деревини, відбувається внаслідок нагрівання до температури виділення летких продуктів горіння, які у разі наявності джерела запалювання здатні до займання і самостійного підтримування горіння. Застосування вогнезахисту змінює розклад компонентів під дією температури, гальмуванням процесів окиснення в газовій і конденсованій фазі.

Тому у способі визначення параметрів займання та поширення полум'я теплоізоляційних будівельних матеріалів, що включає вплив на зразок теплового потоку електричної радіаційної панелі і запалюванні зразка пальником.

Додатково визначається тепловий коефіцієнт установки, вимірюється максимальна температура продуктів горіння та час її досягнення, час займання та проходження фронтом полум'я ділянок поверхні, довжину згорілої частини зразка. Та за отриманими даними розраховується величина безрозмірного індексу горючості за коефіцієнтом I :

$$I = \sqrt{\frac{q \cdot Q}{W} \cdot \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\text{но}}} \cdot \frac{\tau_{\max} - \tau_0}{\tau_0} \cdot \left[1 + \frac{60 \cdot l_r}{l} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i} \right]}, \quad (1)$$

де q – питома теплота згорання газу пропан (23630), кДж·л⁻¹; Q – витрата газу запального пальника (0,001), л·с⁻¹; W – потужність електричної радіаційної панелі, 0,5 кВт; ΔT_{\max} – максимального приросту температури димових газів:

$$\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_0, \quad (2)$$

де T_0 – температура навколишнього середовища, °С; T_{\max} – максимальна температура димових газів, °С; $\Delta T_{\text{но}}$ – максимального приросту температури нагрівального обладнання:

$$\Delta T_{\text{но}} = T_1 - T_0, \quad (3)$$

де T_0 – температура навколишнього середовища, °С; T_1 – температура вихідного повітря при роботі нагрівального обладнання, °С; τ_0 – час займання зразка, с; τ_{\max} – час досягнення максимальної температури димових газів, с; τ_i – час проходження фронтом полум'я контрольних ділянок, с; l – довжина зразка, мм; l_r – довжина пошкодження зразка, мм.

При проведенні досліджень використано випробувальну камеру для визначення параметрів займання та поширення полум'я.

Випробувальна камера для визначення займання та поширення полум'я складається з радіаційної панелі з запальним пристроєм та утримувача зразка встановленого напроти. У витяжну труби вмонтовано термопару, якою вимірюють температуру димових газів. Радіаційна панель малої потужності забезпечує щільність теплового потоку в стаціонарному режимі для першої контрольної точки (32±3) кВт/м², що дозволяє отримувати температуру 250±10 °С на поверхні випробувального зразка на відстані 50±5 мм і імітує малокалорійне джерело займання, яке здатне запалити органічний матеріал.

Радіаційна панель разом з запальним пристроєм розташовуються напроти середини нижньої частини зразка в камері, яку виготовлено з високотемпературного теплоізоляційного матеріалу для зниження теплообміну з навколишнім середовищем.

Випробування триває до моменту припинення поширення полум'я по поверхні зразка або при досягненні 600 с у разі відсутності займання зразка.

Результати досліджень. Результати досліджень щодо термічної дії на зразок термічно модифікованої деревини наведено на рис. 2, 3.



Рис. 2. Результати досліджень процесу займання та поширення полум'я по поверхні зразка термічно модифікованої деревини: а – займання зразка; б – поширення полум'я поверхню

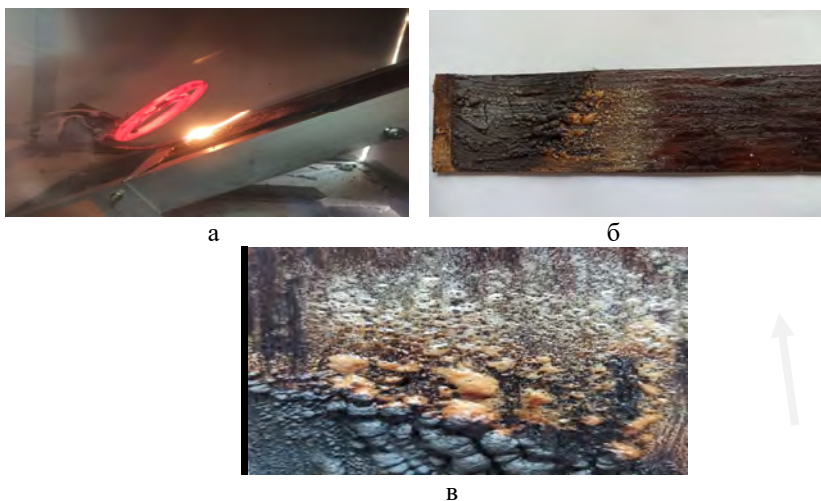


Рис. 3. Результати випробувань процесу займання та поширення полум'я вогнезахисного зразка термічно модифікованої деревини: а – термічний вплив на зразок, б – обвуглювання зразка, в – утворення шару пінококсу

Результати досліджень з визначення приросту максимальної температури газоподібних продуктів горіння (Δt , °C) та втрати маси зразків (Δm , %), проведені у лабораторних умовах, наведено на рис. 4, 5.

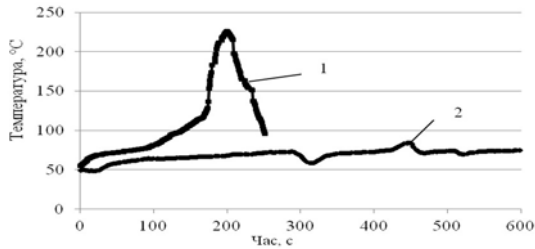


Рис 4. Динаміка наростання температури димових газів при випробуваннях термічно модифікованої деревини:
1 – необроблений; 2 – вогнезахиснений інтумесцентним покриттям

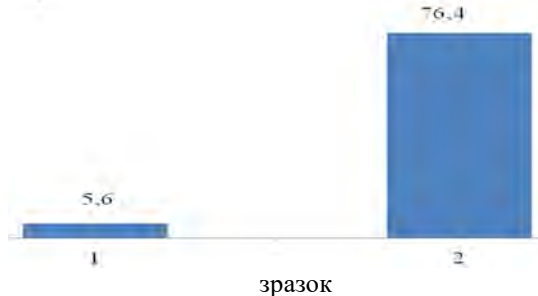


Рис. 5. Результати втрати маси зразків Δm , % термічно модифікованої деревини: 1 – вогнезахиснений інтумесцентним покриттям; 2 – необроблений

Дослідження показали (рис. 4), що деревина відноситься до горючих матеріалів. Так, зразок термічно модифікованої деревини, вогнезахиснений інтумесцентним покриттям, витримав температурний вплив і відноситься до важкогорючих матеріалів за показником втрати маси. При початковій температурі газоподібних продуктів горіння $T=52$ °C, при дії радіаційної панелі на захищений зразок (крива 2, рис. 4) температура газоподібних продуктів горіння становила $T \leq 76$ °C, а втрата маси не перевищила 5,6 %.

Під час випробувань зразків очерету було встановлено, що необроблений зразок зайнявся на 52 с, полум'я поширилося по всьому зразку протягом 100 с, натомість, зразок, вогнезахиснений інтумесцентним покриттям, а саме, у кількості 260 г/м², зайнявся на 597 с, поширення полум'я поверхнею відбулося тільки на першу ділянку, максимальна температура димових газів становила 76 °C за час, більший понад 5 разів, а індекс горючості знизився до 0,32.

Висновки. Експериментальними дослідженнями з визначення пожежонебезпечних властивостей термічно модифікованої деревини встановлено загорання необробленого зразка, натомість для вогнезахищеного – процес займання та поширення полум'я не відбувся. Гальмування процесу займання та поширення полум'я для такого зразка пов'язане з розкладом антипіренів під дією температури з поглинанням тепла та виділенням негорючих газів (азот, діоксин вуглецю), зміною напрямлення розкладу в сторону утворення негорючих газів і важкогорючого коксового залишку.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення процесів формування структури захисного шару та встановлення зв'язку між природою компонентів і такими властивостями покриттів, як формування піноутворювального коксу, а також стійкість до тепла та погоди.

1. Bruno E., Pereira H. Wood modification by heat treatment: A review / *Bioresources*. 2009. – Vol. 4 (1). – pp. 370–404. doi: 10.15376/biores.4.1.370-404.

2. Herrera R., Sandak J., Robles E., Krystofiak T., Labidi J. Weathering resistance of thermally modified wood finished with coatings of diverse formulations / *Progress in Organic Coatings*. – 2018. – Vol. 119. – pp. 145–154.

3. Benkreif R., Brahmia F.Z., Csiha C. Influence of moisture content on the contact angle and surface tension measured on birch wood surfaces / *European Journal of Wood and Wood Products*. – 2021. – 79 (4). – pp. 907–913.

4. Rekiel E., Zdziennicka A., Jańczuk B. Mutual influence of ethanol and surfactin on their wetting and adhesion properties / *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 20216. – Vol. 27. 127161.

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

6. 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*. – 2020. – Vol. 907. – 012057. doi:10.1088/1757-899X/907/1/012057.

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

8. Gaff M., Kačík F., Gašparík M., Makovická L., Osvaldová L., Čekovská H. 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* 2019. – Vol. 200. – pp. 551–558.

9. Ciripi B., Wang Y., Rogers B. Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire / *Fire Safety Journal*. – 2016. – Vol. 81. – pp. 74–84.

10. Carosio F., Alongi J. In: *Acs applied materials & Interfaces / Elettronico*. – 2016. – Vol. 8 (10). – pp. 6315–6319.

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

12. Tsapko Y., Tsapko A., Bondarenko O. Research of conditions of removal of fire protection from building construction / *Key engineering materials*. – 2020. – Vol. 864. – pp. 141–148. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.864.141.