

**ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПУЧУЮЧОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ  
ВОГНЕЗАХИСТУ ДЕРЕВ'ЯНИХ СПОРУД**

<sup>1</sup>Цапко Ю.В., д.т.н., професор,  
juriyts@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0625-0783

<sup>2</sup>Бондаренко О.П., к.т.н., доцент,  
bondolya3@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8164-6473

<sup>2,3</sup>Цапко О.Ю., к.т.н., с.н.с.,  
alekseysapko@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2298-068X

<sup>1</sup>Горбачова О.Ю., к.т.н.,  
gorbachova.sasha@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7533-5628

<sup>1</sup>Мазурчук С.М., к.т.н.,  
mazurchuk.s.m@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6008-9591

<sup>2</sup>Жеребчук Д.С., студент,  
dianazerebcuk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7174-132X

<sup>1</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України  
вул. Героїв Оборони, 12в, м. Київ, 03041, Україна

<sup>2</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури  
пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, 03037, Україна

<sup>3</sup>Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс"  
вул. Казимира Малевича, 84, м. Київ, 03150, Україна

**Анотація.** Проведено аналіз вогнезахисних матеріалів для дерев'яних будівельних конструкцій і встановлено необхідність розробки надійних засобів захисту для гальмування процесу займання та розповсюдження полум'я по поверхні будівельної конструкції. Тому постає доцільність визначення бар'єру для теплопровідності захисного шару і встановлення механізму гальмування передачі тепла до матеріалу. За експериментальними даними встановлено, що необроблений зразок зайнявся на 52 с, полум'я поширилося по всьому зразку протягом 100 с, натомість зразок, вогнезахисний просочувальним розчином БС-13, зайнявся на 570 с, поширення полум'я поверхнею відбулося тільки на першій ділянці, максимальна температура димових газів становила 86 °С, а індекс горючості склав 3,42. Для зразка вогнезахисного покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД» загорання не відбулося, оскільки на поверхні утворився захисний шар пінококсу, індекс горючості становив 0. У результаті досліджень доведено, що процес гальмування температури полягає в розкладанні антипіренів під термічною дією і виділенням легких інертних продуктів, утворенням сажоподібних продуктів на поверхні природного горючого матеріалу і теплоізолюванням дерев'яної конструкції. Завдяки цьому стало можливим визначення умов вогнезахисту деревини, шляхом утворення бар'єру для теплопровідності при розкладанні лаку на пінококс. Експериментальними дослідженнями підтверджено, що зразок деревини, вогнезахисної покриттям, витримав температурний вплив при дії теплового потоку протягом 600 с. Це дає основи твердити про перспективу цілеспрямованого контролювання процесів вогнезахисту деревини шляхом використання вогнезахисних засобів, спроможних утворювати на будівельній конструкції захисний шар, що гальмує піроліз деревини.

**Ключові слова:** захисні засоби, вогнестійкість, втрата маси, оброблення поверхні, швидкість вигорання деревини, ефективність захисту.

**Вступ.** Деревина, як будівельний матеріал, все частіше використовується у будівництві й архітектурі оскільки має значні позитивні експлуатаційні властивості. Однак, враховуючи високу горючість, є пожежонебезпечним матеріалом, що обмежує сферу її застосування, особливо у багатоповерховому дерев'яному будівництві. Збільшити ступінь безпечної

експлуатації об'єктів, де використовуються матеріали і вироби з деревини, можливо за допомогою її захисного оброблення від вогню. Суть захисту деревини полягає в наданні їй здатності протистояти дії полум'я, поширенню полум'я поверхнею, в протидії термоокислюванню деструкції та гальмуванні процесу займання.

Відомо, що деревина не здатна до полуменевого горіння сама по собі, а горять продукти її розкладу, які утворюються під дією температури. Введення в матеріал антипіренів збільшує кількість виникнення інертних летких продуктів, що флегматизують газофазні реакції полум'я, усувають тління карбонізованого залишку та зменшують інтенсивність втрати маси [1, 2]. Просочувальні вогнезахисні композиції не завжди забезпечують стійкість деревини до впливу високотемпературного розкладу, оскільки не витримують температурно вологісних коливань та втрачають захисні властивості. Застосування спучуючих покриттів дозволяє теплоізулювати матеріал за рахунок утворення термостійкого шару та зберегти несучу здатність конструкції при дії вогню певного періоду часу [3, 4].

Тому встановлення параметрів пригнічення горіння деревини при підвищеній температурі й впливу покриття на цей процес і направлене на забезпечення вогнестійкості та відповідно, визначає необхідність проведення таких досліджень.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Вогнезахист дерев'яних будівельних конструкцій полягає в створенні на поверхні теплоізулюючих екранів, що витримують безпосередню дію вогню і дозволяють деревині зберігати свої функції протягом заданого періоду часу.

В роботі [4] було виявлено, що проби кокосового волокна середньої щільності, оброблені вогнезахисними (FR) розчинами, є ефективними у протистоянні пожежам. Це дослідження показало найбільш сприятливе поєднання БР розчину для додання вогнестійкості кокосовим волокнам. Зразки хімічно обробляли розчинами FR різних комбінацій бури і борної кислоти. Оброблені зразки показали істотне поліпшення їх стійкості до горючості й часу проникнення полум'я, знижену швидкість горіння і більш високу стійкість до поширення полум'я. Було проведено регресійний аналіз для визначення співвідношення між ваговим процентним вмістом бору FR, присутнього в розчині, й характеристиками стійкості до полум'я оброблених волокнистих плит кокосового волокна, в яких передбачалося, що прогнози є точними в межах  $\pm 3\%$ . У висновку встановлено, що будь-яка різниця у ваговій частці бору FR у розчині впливає на стійкість до полум'я і розчин, який містив 35% бору, надав максимальну вогнестійкість зразків кокосового волокна.

В роботі [5] розглянуто вплив зв'язуючого з рослинної сировини на створення гнучких теплоізуляційних матеріалів, але як вирішується питання, що пов'язано з горючістю, не вказано.

В роботі [6] розглядається вплив різних температур термічної модифікації та антипіренів на вибрані характеристики горіння та хімічні компоненти деревини тика (*Tectona grandis* L. f.). Термічну модифікацію проводили при температурах 160 °C, 180 °C і 210 °C. Згодом термомодифікована деревина була оброблена натуральними (арабіногалактан) і синтетичними (фосфат амонію) антипіренами. Вплив термічної модифікації, а також антипірену було виявлено за такими характеристиками горіння, як втрата ваги, швидкість горіння, максимальна швидкість горіння, співвідношення максимальної швидкості горіння та часу досягнення максимальної швидкості горіння. Хімічні зміни, викликані впливом цих факторів, визначалися зміною вмісту целюлози, геміцелюлоз, голоцелюлози, лігніну та екстрактивних речовин. Зв'язок між характеристиками горіння та хімічними змінами в термічномодифікованій деревині аналізували за допомогою кореляції Спірмена. Результати показали, що термічна модифікація тикового дерева негативно вплинула на його властивості займання та горіння. Синтетичний антипірен мав найвищий ефект уповільнення у всіх випадках. Природний антипірен спричинив кращий ефект уповільнення термічномодифікованої деревини при температурі 180 і 210 °C. Але збільшувався відносний вміст лігніну, екстрактивних речовин і целюлози, а зменшувалася кількість холоцелюлози і особливо геміцелюлози.

Якість використання інтумесцентних покриттів на основі неорганічних та органічних речовин показана в роботі [7], де за рахунок дії антипіренів на основі полі фосфату амонію та газоутворювачів і каталізаторів можливо впливати на утворення теплоізолювального шару пінококсу. Однак, постає необхідність дослідження що саме створює бар'єр для теплопровідності та забезпечення ефективної дії покриття з утворенням шару коксу.

У роботі [8] повідомляється про новий вогнезахисний підхід із застосуванням синергетичних дій, що поєднують унікальні властивості відновленого оксиду графену (rGO) і гідратованого натрію метаборати (SMB). Розроблено одноетапну обробку целюлозних матеріалів композиційним розчином, який створює бар'єрний шар rGO/SMB на поверхні тирси, що забезпечує високоефективний вогнезахисний захист з різними способами дії. Ці характеристики розроблено з урахуванням синергії між властивостями гідратованих кристалів SMB, які працюють як хімічний радіатор для уповільнення термічної деградації целюлозних частинок і газонепроникних шарів rGO, що запобігає доступу кисню та вивільненню токсичних летючих речовин. Зовнішній шар rGO також створює термічний і фізичний бар'єр, переміщуючи вуглець між полум'ям і незгорілими частинками деревини. Вогнезахисні характеристики розробленого графен-боратного композиту та механізм їх режимів вогнезахисту продемонстровано шляхом тестування кількох різних форм целюлозних матеріалів з використанням соснової тирси, ДСП та структур на основі волокна. Результати показали їхню видатну самозатухаючу поведінку зі значною стійкістю до вивільнення токсичних і легкозаймистих летких речовин, що свідчить про те, що вони є прийнятною альтернативою для заміни звичайних токсичних галогенованих вогнезахисних матеріалів.

В роботі [9] сказано, що значне підвищення стійкості до атмосферних коливань, механічних характеристик захисного шару отримується внаслідок високотемпературних сполук при застосуванні тих чи інших добавок. Однак, для цього процесу необхідно навести відповідні речовини та фізико-хімічні розрахунки.

В роботі [10] показано, що значна кількість захисних покриттів має цілу низку недоліків, в тому числі таких, як нанесення окремих компонентів, їх експлуатація при зміні температурно-вологісних полів. При термічній дії вони втрачають свої функціональні властивості та не здатні захистити матеріали і вироби з деревини. Це означає, що не встановлено, як саме проходить процес розкладання вогнезахисного при експлуатації при підвищених температурах.

В роботі [11] наведено дослідження захисних матеріалів, створених із органічних речовин з розчином із колеманітової руди. Показано, що завдяки встановленим співвідношенням є допустимим зміна вмісту складових для обумовлення процесу теплостійкості.

В роботі [12] досліджено вплив натурального волокна (NF), поліфосфату амонію (APP), тригідрату оксиду алюмінію (ATH) та гібриду ATH/APP на горючість, термічні й механічні властивості композитів. Введення натурального волокна (NF) в чисту епоксидну матрицю зменшило загальну теплоту згоряння і забезпечило покращені властивості термічної деградації. Додавання APP підвищило вогнестійкі властивості композиту зі значно зменшеним загальним часом полум'я та нульовою крапелькою. Гібрид 10 мас.% тригідрату оксиду алюмінію (ATH) і 5 мас.% поліфосфату амонію (APP) продемонстрував найбільш багатообіцяючу вогнестійкість із властивістю самогасання, а також найнижчу валову теплоту та найбільший залишок обуглення серед різних досліджених складів. Загалом склади, що містять лише ATH, не можуть забезпечити ефективний питомий опір полум'ю, порівняно з композиціями, наповненими APP. Композиції, наповнені ATH, знижували міцність на розрив, подовження при розриві та властивості при згині, тоді як спостерігалось збільшення міцності на згин композицій, навантажених APP.

В роботі [13] показано, що графеновий наноліст (GNS) в поєднанні з традиційним шаруватим подвійним гідроксидом (LDH), шаруватим гідроксидом рідкоземельних металів (LRH) і антипіреном на основі фосфору (DOPO) використано для підвищення вогнестійкості

епоксидної смоли. Синергічний ефект затримки полум'я досягається в системах GNS/LDH і GNS/DOPO, де комбіновані GNS і LDH підвищують в'язкість розплаву епоксиду та обмежують поширення полум'я через інгібування крапель. Граничний кисневий індекс епоксиду підвищувався з 15,9 до 23,6 при додаванні 0,5 мас. % кожного з GNS і LDH. З додаванням 2,5 мас. % GNS і LDH, загальне тепловиділення епоксидної смоли також зменшилося від 33,4 МДж/м<sup>2</sup> до 24,6 МДж/м<sup>2</sup>. Синергічний ефект GNS і DOPO отримав інший механізм. Додавання 2,5 мас. % GNS і DOPO зменшили пікову швидкість тепловиділення від 1194 кВт/м<sup>2</sup> до 396 кВт/м<sup>2</sup>, а загальну швидкість тепловиділення від 72,5 МДж/м<sup>2</sup> до 48,1 МДж/м<sup>2</sup>. Синергічні механізми вогнезахисних засобів були ретельно проаналізовані та співвіднесені з вогнезахисними властивостями.

Розробка екологічно чистого та високоефективного антипірену для застосування в тонкому полімерному покритті все ще залишається серйозною проблемою. В роботі [14] розроблено композиційний антипірен з графену для скляних листів за допомогою нового рідкофазного процесу ексфоціації на місці. Коли антипірен додається до полімерного покриття, він демонструє високу вогнестійкість для горючого пластику, дерева та негорючої сталі. Граничний кисневий індекс (приблизно 32,3%) і рейтинг UL-94 V-0 ультратонкого полімерного покриття (приблизно 65 мкм) можна отримати для вогнезахисту деревини. Також спостерігається тривалий час вогнезахисна дія (55,0 хв.), яка набагато довше, ніж у звичайного полімерного покриття (1,0 хв.) для вогнезахисту сталі. Ця робота пропонує нову стратегію створення економічно ефективних тонких вогнезахисних полімерних покриттів для різного промислового застосування.

В роботі [15] досліджено, як органічні консерванти для деревини, що використовуються для її захисту від грибків і комах-шкідників, впливають на вогнестійкість і горючі властивості деревних матеріалів, які зазвичай використовуються у вітчизняній деревообробній та будівельній промисловості. З точки зору втрати несучої здатності деревини має значення лише глибина обвуглювання, оскільки її зменшення буде визначатися зменшенням поперечного перерізу деревини. Було перевірено вплив консервантів для деревини, застосованих для непошкоджених зразків сосни звичайної та ялини звичайної, кондиціонованих у нормальних кліматичних умовах. Тестові зразки пройшли повторну обробку, після чого перевірено дію різних комбінацій консервантів. З наявних на вітчизняному ринку засобів захисту деревини на основі органічних розчинників і водних засобів було вибрано сім сумішей для обробки. Експерименти з замочуванням показали, що консервуюче просочення ялини звичайної суттєво відрізняється від сосни звичайної, що вплинуло на порівняння результатів тесту. Експериментально досліджено вміст вологи, втрата маси та розраховано глибину обвуглювання. Вплив різних матеріалів для обробки було встановлено при аналізі розміру поверхневих опіків. Зразки сосни звичайної зазнали значно більшого опіку поверхні, ніж зразки ялини звичайної, незалежно від типу використаного консерванта. Більша щільність тіла, вміст смоли (1...10%) і більша початкова вологість сосни звичайної спричинили її згинання, а отже, й краще горіння.

Таким чином, дослідження впливу компонентів, які входять до складу покриттів, на процес теплоізолювання є невирішеною складовою забезпечення вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій, що і передувало умовам проведення досліджень.

**Мета дослідження.** Даною метою роботи було дослідження вогнезахисної ефективності спучуючого покриття для деревини та встановлення механізму її вогнезахисту.

**Матеріали і методи досліджень.** Для встановлення горючості деревини, використовували зразки необроблені (рис. 1), а також оброблені захисними покриттями відповідно до технологічного регламенту на вогнезахисні речовини. А оскільки вони характеризуються відповідними реологічними властивостями і поглинанням, то оброблена деревина має різні значення витрати покриття. Так, оброблення деревини проводили просоченням сумішшю «БС-13» у кількості 560 г/м<sup>2</sup>, а також покриттям «ФАСРВОЛ-ВУД» у кількості 241,1 г/м<sup>2</sup>. В таблиці 1 наведено характеристики деревини після оброблення.



Рис. 1. Модельні зразки деревини для випробувань

Таблица 1 – Порівняльна характеристика маси зразків до і після обробки

Назва антипірену	Маса зразка, г		Набір маси зразка, $\Delta m$	Набір маси зразка, %
	до обробки	після обробки		
необроблений зразок	98,8	98,8	–	–
«БС-13»	99,6	103,8	4,2	4,9
«ФАЄРВОЛ-ВУД»	156	162,5	6,5	6,7

Такий вибір покриттів пов'язаний з тим, що до сьогодення існують різні типи вогнезахисних засобів для деревини. Так, зокрема, просочувальні антипірени для деревини («БС-13») характеризуються низькою вартістю, а механізм їхньої дії пов'язаний з розкладом антипіренів під термічною дією, що супроводжується поглинанням тепла і виділенням негорючих газів та утворенням важкогорючого звугленого залишку на поверхні деревини. Такі речовини захищають деревину протягом незначного періоду часу (~600 с). Але з'являються нові покриття, що являють собою суміш каталізаторів та вуглеводнів, утворювачів газу та в'язучих речовин, які здатні при термічній дії утворювати пінококсовий спучений шар, що і запобігає проникненню високої температури до деревини. До таких покриттів відноситься і «ФАЄРВОЛ-ВУД».

Дослідження з визначення термічної стійкості вогнезахисної деревини проводили за методикою, суть якої полягала у термічній дії на зразок вогнезахисної деревини радіаційної панелі, його запалювання, вимірюванні температури летких речовин горіння та часу її настигання, часу їх займання та проходження полум'я по ділянкам поверхні, вимірювання довжини згорівшої частини зразка [5]. І за отриманими випробуваннями розраховується безрозмірний індекс горючості за коефіцієнтом  $I$ :

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

де  $q$  – питома теплота згорання газу пропан (23630), кДж·л<sup>-1</sup>;

$Q$  – витрата газу запального пальника (0,001), л·с<sup>-1</sup>;

$W$  – потужність електричної радіаційної панелі, 0,5 кВт;

$\Delta T_{\max}$  – максимального приросту температури летких продуктів горіння:

$$\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_0,$$

де  $T_0$  – температура навколишнього середовища, °С;

$T_{\max}$  – максимальна температура летких продуктів горіння, °С;

$\Delta T_{\text{но}}$  – максимального приросту температури нагрівального обладнання:

$$\Delta T_{\text{но}} = T_1 - T_0,$$

де  $T_1$  – температура вихідного повітря при роботі нагрівального обладнання, °С;

$\tau_0$  – час займання зразка, с;

$\tau_{\max}$  – час досягнення максимальної температури димових газів, с;

$\tau_i$  – час проходження фронтом полум'я контрольних ділянок, с;

$l$  – довжина зразка, мм;

$l_r$  – довжина пошкодження зразка, мм.

На рис. 2 наведено пристрій для проведення досліджень по визначенню параметрів займання та поширення полум'я у вигляді випробувальної камери об'ємом 0,125 м<sup>3</sup>.

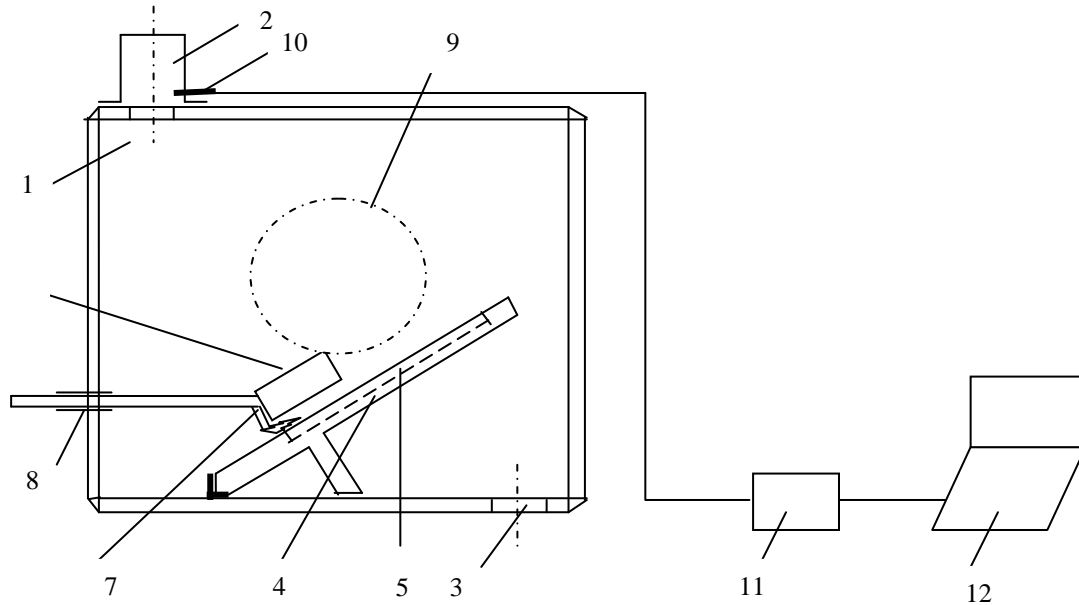


Рис. 2. Пристрій для визначення параметрів займання та поширення полум'я:

- 1 – випробувальна камера; 2 – витяжна труба; 3 – вентиляційний отвір; 4 – тримач зразка;  
 5 – зразок; 6 – радіаційна панель; 7 – запалювальний пристрій; 8 – регульовальна труба;  
 9 – оглядове скло; 10 – термопара; 11 – аналого-цифровий перетворювач; 12 – комп'ютер

Перед проведенням випробувань необхідно запалити палик 7 і відрегулювати висоту полум'я. Включити електричну радіаційну панель 6 та прилад для реєстрації температури і визначити початкову температуру димових газів термопарою 10. Підготовлений до випробувань зразок матеріалу 5 встановлюють в тримач 4, та підводять до радіаційної панелі 6. У процесі випробування визначають: час запалювання (час від початку випробування до початку проходження полум'ям нульової позначки), час проходження полум'ям  $i$ -ої ділянки по поверхні зразка, відстань, на яку поширилося полум'я, максимальну температуру летких продуктів горіння та час її досягнення.

Випробування триває до припинення горіння полум'я на поверхні зразка або при досягненні 600 с у разі відсутності займання зразка.

**Результати досліджень.** Для встановлення вогнестійкості деревини використовували запальний палик. На рис. 3 наведено процес проведення випробувань зразка необробленої деревини, на рис. 4 – зразка деревини, обробленого «БС-13», на рис. 5 – зразка деревини, обробленого покриттям «ФАСРВОЛ-ВУД».



а)



б)

Рис. 3. Процес проведення випробувань необробленої деревини:  
а – процес запалювання зразка; б – горіння зразка



а)



б)

Рис. 4. Процес проведення випробувань зразка деревини, обробленого засобом «БС-13»:  
а – запалювання зразка; б – результат випробувань

З вищенаведених експериментальних досліджень встановлено, що необроблений зразок загорівся, натомість для зразка захищеного від вогню – процес горіння та поширення полум'я пригнічується. Гальмування процесу займання та поширення полум'я для зразка вогнезахищеного «БС-13» полягає у поглинанні тепла, що пов'язане з розкладом антипіренів та виділенням негорючих газів, натомість для зразка, захищеного покриттям, відбувається утворення під термічною дією шару пінококсу, що ізолює від дії температури. Що свідчить про можливість переходу деревини при обробленні вогнезахисними засобами до матеріалів, які відносяться до важкозаймистих, що не поширюють полум'я поверхню.



а)



б)

Рис. 5. Процес проведення випробувань зразка деревини, обробленого покриттям «ФАСРВОЛ-ВУД»: а – запалювання зразка; б – утворення теплоізолювального шару коксу



Результати визначення горючості наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Час проходження фронтом полум'я контрольних точок

Зразок деревини	Температура димових газів, °С		Час займання, с	Час проходження фронтом полум'я ділянок зразка, с									Час досягнення максимальної температури димових газів, с	Довжина горіння зразка, мм	Індекс горючості
	T <sub>1</sub>	T <sub>max</sub>		1	2	3	4	5	6	7	8	9			
необроблений	61	323	52	2	8	7	10	6	8	7	6	7	101	294	177,5
вогнезахищений БС-13	60	86	570	396	8	9	–	–	–	–	–	–	586	62	3,42
вогнезахищений «ФАЄРВОЛ-ВУД»	58	84	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	600	–	0

Під час випробувань зразків деревини було встановлено, що необроблений зразок зайнявся на 52 с, полум'я поширилося по всьому зразку протягом 100 с, натомість, зразок, вогнезахищений просочувальним розчином «БС-13», зайнявся на 570 с, поширення полум'я поверхню відбулося тільки на першій ділянці, максимальна температура димових газів становила 86 °С за час більший у понад 5 разів, а індекс горючості склав 3,42 (табл. 4). Для зразка, вогнезахищеного покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД», загорання не відбулося, оскільки на поверхні утворився захисний шар пінококсу, індекс горючості становив 0.

З урахуванням того, що несучі будівельні конструкції можуть підпадати впливу температури пожежі протягом тривалого часу (понад 15 хв.), застосування просочення не раціональне, як наведено вище, оскільки не забезпечить стійкість вогнезахищеної деревини до полум'я. Тому для визначення межі поширення вогню для будівельних огорожувальних конструкцій, оброблених спучуючим покриттям, при довготривалій термічній дії, що характеризуються високотемпературним ефектом, були проведені натурні випробування [16]. У результаті досліджень встановлено, що необроблену деревину класифіковано як будівельний матеріал підвищеної горючості (Г4), а деревина, вогнезахищена спучуючим покриттям, відноситься до будівельних матеріалів низької горючості (Г1) та може використовуватись для забезпечення вогнестійкості несучих конструкцій. Стосовно довговічності приведених вище вогнезахисних засобів можна констатувати, що просочення має гарантований термін захисту деревини 3 роки, а покриття забезпечує захист протягом 8...10 років згідно регламенту.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Проведено експериментальні дослідження горючості деревини, захищеної просоченням та спучуючим покриттям при термічній дії високотемпературного полум'я. Визначено температуру на поверхні деревини, її займання та поширення полум'я поверхню, що дозволяє одержувати матеріал зі знизеним ступенем горючості. За експериментальними даними встановлено, що індекс горючості для деревини, вогнезахищеної просоченням засобом «БС-13», склав 3,42, а для деревини, обробленої покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД», індекс горючості становив 0, що показало ефективність захисту. Таким чином, проведені дослідження горючості деревини засвідчують, що механізм вогнезахисної ефективності направлений в сторону утворення на поверхні теплоізолюючого шару. Наявність теплоізолюючого шару пінококсу на зразку деревини змінює процес термічного розкладу, зменшує кількість летких продуктів горіння, які флегматизуються



великою кількістю інертних газів, що відповідно підтверджується результатами визначення індексу горючості. Найкращий результат отримано для зразка, вогнезахисного покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД», оскільки на поверхні утворився захисний шар пінококсу. Вочевидь такий механізм впливу покриття є фактором регулювання ступеня стійкості коксу та ефективності теплоізолювання матеріалу.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на встановлення взаємозв'язку між складовими та властивостями вогнезахисного просочувального розчину «БС-13» і вогнезахисного покриття «ФАЄРВОЛ-ВУД», а також їх оптимізацію.

### Література

1. Tsapko Yu., Tsapko A. Establishment of fire protective effectiveness of reed treated with an impregnating solution and coatings. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4. No 10 (94). P. 62-68. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141030>.
2. Tsapko Yu., Bondarenko O., Tsapko A. Effect of a flame-retardant coating on the burning parameters of wood samples. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. Vol. 2. No 10 (98). P. 49-54. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163591. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/163591/165012>.
3. Tsapko Yu., Tsapko A., Bondarenko O. Establishment of heat-exchange process regularities at inflammation of reed samples. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1. No 10 (97). P. 36-42. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156644. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/viewFile/156644/157209>.
4. Rejeesh C.R., Saju K.K. Relative improvements in flame resistance of coir fiberboards treated with fire-retardant solution. *Journal of Wood Science*. 2018. 64(5), C. 697-705. DOI: 10.1007/s10086-018-1747-3.
5. Xiao Na, Zheng Xue, Song Shuping, Pu Junwen. Effects of Complex Flame Retardant on the Thermal Decomposition of Natural Fiber. *BioResources*. 2014. Vol. 9. No 3. P. 4924-4933. URL: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/effects-of-complex-flame-retardant-on-the-thermal-decomposition-of-natural-fiber/>.
6. Gaff M., Kačík F., Gašparík M., Makovická Osvaldová L., Čekovská H. The effect of synthetic and natural fire-retardant on burning and chemical characteristic of thermally modified teak wood. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 200. P. 551-558. URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20193303123>.
7. Ciripi B.K., Wang Y.C., Rogers B. Assessment of the thermal conductivity of intumescent coating in fire. *Fire Safety Journal*. 2016. Vol. 81. P. 74-84. URL: [https://www.academia.edu/22046522/Assessment\\_of\\_the\\_thermal\\_conductivity\\_of\\_intumescent\\_coatings\\_in\\_fire](https://www.academia.edu/22046522/Assessment_of_the_thermal_conductivity_of_intumescent_coatings_in_fire).
8. Nine Md.J., Diana N.H. Tran, Thanh Tung Tran, Kabiri Shervin, Dusan Losic. Graphene-Borate as an Efficient Fire Retardant for Cellulosic Materials with Multiple and Synergetic Modes of Action. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2017. Vol. 9 (11). P. 10160-10168. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28244736/>.
9. Carosio F., Alongi J. Ultra-Fast Layer-by-Layer Approach for Depositing Flame Retardant Coating on Flexible PU Foams within Seconds. *Elettronico*. 2016. Vol. 10. P. 6315-6319. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26925855/>.
10. Nasir K. Md., Ramli Sulong N.H., Johan M.R., Afifi A.M. An investigation into waterborne intumescent coating with different fillers for steel application. *Pigment and Resin Technology*. 2018. Vol. 47. No 2. P. 142-153. URL: [https://www.researchgate.net/publication/323444216\\_An\\_investigation\\_into\\_waterborne\\_intumescent\\_coating\\_with\\_different\\_fillers\\_for\\_steel\\_application](https://www.researchgate.net/publication/323444216_An_investigation_into_waterborne_intumescent_coating_with_different_fillers_for_steel_application).

11. Erdoğan Y. Production of an insulation material from carpet and boron wastes. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*. 2016. No 152. P. 197-202. URL: <https://dergipark.org.tr/en/pub/bulletinofmre/article/279199>.
12. Khalili P., Tshai K.Y., Hui D., Kong I. Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy composite. *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 114. P. 101-110. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X21002517>.
13. Shan L., Zhengping F., Hong-Qiang Y., Hao W. Synergistic Flame Retardancy Effect of Graphene Nanosheets and Traditional Retardants on Epoxy Resin. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*. 2016. Vol. 89. P. 26-32. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.03.012>.
14. Kangtai Ou, Zheming Liu, Zixuan Liu, Qiang Fu, Yang Cao, Qichao Liu, Youyi Sun. Ultra-thin flame retardant polymer nanocomposite coating based on synergistic effect of graphene and glass sheets. *Materials Research Bulletin*. 2023. Vol. 164. 112247. P. 1-10. URL: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2023.112247>.
15. Lubl6y 6., T6mea M6sz6ros D., Tak6cs L., Norbert H. Examination of the fire performance of wood materials treated with different precautions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023. 33691648. P. 1-12. URL: <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12050-2>.
16. Tsapko Yu., Tsapko A., Bondarenko O., Sukhanevych M., Kobryn M. Research of the process of spread of fire on beams of wood of fire-protected intumescent coatings. IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering*. TRANSBUD-2019. Vol. 708. 012112. P. 1-6. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012112>.

### References

- [1] Yu. Tsapko, A. Tsapko, "Establishment of fire protective effectiveness of reed treated with an impregnating solution and coatings", *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*, vol. 4, no. 10 (94), pp. 62-68, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141030>.
- [2] Yu. Tsapko, O. Bondarenko, A. Tsapko, "Effect of a flame-retardant coating on the burning parameters of wood samples", *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*, vol. 2, no. 10 (98), pp. 49-54, 2019. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163591. [Online]. Available: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/163591/165012>.
- [3] Yu. Tsapko, A. Tsapko, O. Bondarenko, "Establishment of heat-exchange process regularities at inflammation of reed samples", *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*, vol. 1. no. 10 (97), pp. 36-42, 2019. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156644. [Online]. Available: <http://journals.uran.ua/eejet/article/viewFile/156644/157209>.
- [4] C.R. Rejeesh, K.K. Saju, "Relative improvements in flame resistance of coir fiberboards treated with fire-retardant solution", *Journal of Wood Science*, 64(5), pp. 697-705, 2018. DOI: 10.1007/s10086-018-1747-3.
- [5] Na Xiao, Xue Zheng, Shuping Song, Junwen Pu, "Effects of Complex Flame Retardant on the Thermal Decomposition of Natural Fiber", *BioResources*, vol. 9, no. 3, pp. 4924-4933, 2014. [Online]. Available: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/effects-of-complex-flame-retardant-on-the-thermal-decomposition-of-natural-fiber/>.
- [6] M. Gaff, F. Ka6ik, M. Ga6par6k, L. Makovick6a Osvaldov6a, H. 6ekovsk6a, "The effect of synthetic and natural fire-retardant on burning and chemical characteristic of thermally modified teak wood", *Construction and Building Materials*, vol. 200, pp. 551-558, 2019. [Online]. Available: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20193303123>.

- [7] B.K. Ciripi, Y.C. Wang, B. Rogers, "Assessment of the thermal conductivity of intumescent coating sin fire", *Fire Safety Journal*, vol. 81, pp. 74-84, 2016. [Online]. Available: [https://www.academia.edu/22046522/Assessment\\_of\\_the\\_thermal\\_conductivity\\_of\\_intumescent\\_coatings\\_in\\_fire](https://www.academia.edu/22046522/Assessment_of_the_thermal_conductivity_of_intumescent_coatings_in_fire).
- [8] Md.J. Nine, Tran Diana N.H., Tung Tran Thanh, Shervin Kabiri, Losic Dusan, "Graphene-Borateasan Efficient Fire Retardant for Cellulosic Materials with Multiple and Synergetic Modes of Action", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9 (11), pp. 10160-10168, 2017. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28244736/>.
- [9] F. Carosio, J. Alongi, "Ultra-Fast Layer-by-Layer Approach for Depositing Flame Retardant Coatings on Flexible PU Foams within Seconds", *Elettronico*, vol. 10, pp. 6315-6319, 2016. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26925855/>.
- [10] K. Md. Nasir, N.H. Ramli Sulong, M.R. Johan, A.M. Afifi, "An investigation into waterborne intumescent coating with different fillers for steel application", *Pigment and Resin Technology*, vol. 47, no. 2, pp.142-153, 2018. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/323444216\\_An\\_investigation\\_into\\_waterborne\\_intumescent\\_coating\\_with\\_different\\_fillers\\_for\\_steel\\_application](https://www.researchgate.net/publication/323444216_An_investigation_into_waterborne_intumescent_coating_with_different_fillers_for_steel_application).
- [11] Y. Erdoğan, "Production of an insulation material from carpet and boron wastes", *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, no 152, pp. 197-202, 2016. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/en/pub/bulletinofmre/article/279199>.
- [12] P. Khalili, K.Y. Tshai., D. Hui, I. Kong, "Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy composite", *Composites Part B: Engineering*, vol. 114, pp. 101-110, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X21002517>.
- [13] L. Shan, F. Zhengping, Y. Hong-Qiang, W. Hao, "Synergistic Flame Retardancy Effect of Graphene Nanosheets and Traditional Retardants on Epoxy Resin", *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, vol. 89, pp. 26-32, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.03.012>.
- [14] Ou Kangtai, Liu Zheming, Liu Zixuan, Fu Qiang, Cao Yang, Liu Qichao, Sun Youyi, "Ultra-thin flame retardant polymer nanocomposite coating based on synergistic effect of graphene and glass sheets", *Materials Research Bulletin*, vol. 164, 112247, pp. 1-10, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2023.112247>.
- [15] É. Lubl6y, D. T6mea M6sz6ros, L. Tak6cs, H. Norbert, "Examination of the fire performance of wood materials treated with different precautions", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 33691648, pp. 1-12, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12050-2>.
- [16] Yu. Tsapko, A. Tsapko, O. Bondarenko, M. Sukhanevych, M. Kobryn, "Research of the process of spread of fire on beams of wood of fire-protected intumescent coatings", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. TRANSBUD-2019*, vol. 708, 012112, pp. 1-6, 2019. [Online]. Available: <https://doi:10.1088/1757-899X/708/1/012112>.

**JUSTIFICATION OF THE EFFICIENCY OF FLOATING COATING FOR FIRE PROTECTION OF WOODEN BUILDINGS**

<sup>1</sup>**Tsapko Yu.**, Doctor of Technical Sciences,  
juriyts@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0625-0783

<sup>2</sup>**Bondarenko O.**, PhD, Associate Professor,  
bondolya3@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8164-6473

<sup>2,3</sup>**Tsapko A.**, PhD, Senior Research Fellow,  
alekseytsapko@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2298-068X

<sup>1</sup>**Gorbachova A.Yu.**, PhD,  
gorbachova.sasha@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7533-5628

<sup>1</sup>**Mazurchuk S.N.**, PhD,  
mazurchuk.s.m@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6008-9591

<sup>2</sup>**Zherebchuk D.**, student  
dianazerebcuk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7174-132X

<sup>1</sup>*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*  
Heroiv Oborony str., 15, Kyiv, 03041, Ukraine

<sup>2</sup>*Kyiv National University of Construction and Architecture*  
Povitroflotsky ave., 31, Kyiv, 03037, Ukraine

<sup>3</sup>*Ukrainian State Research Institute "Resurs"*  
Kazimyra Malevicha str., 84, Kyiv, 03150, Ukraine

**Abstract.** The analysis of fire-resistant materials for wooden building structures was carried out and the need for the development of reliable means of protection to inhibit the ignition process and the spread of flame on the surface of the building structure was established. Therefore, there is a need to determine the conditions for the formation of a barrier for thermal conductivity and to establish a mechanism for inhibiting the transfer of heat to the material. According to experimental data, it was established that the untreated sample ignited for 52 s, the flame spread throughout the sample within 100 s, on the other hand, the sample, fire-protected with the impregnation solution BS-13, ignited for 570 s, the flame spread over the surface only in the first section, the maximum temperature of flue gases was 86 °C, and the flammability index was 3.42. For the sample protected by the "FIREWALL-WOOD" coating, the fire did not occur, because a protective layer of pinocoke was formed on the surface, the flammability index was 0. As a result of research, it was proven that the process of temperature inhibition consists in the decomposition of flame retardants under the influence of temperature with the absorption of heat and the release of non-combustible gases. Formation of soot-like products on the surface of natural combustible material and thermal insulation of a wooden structure. Thanks to this, it became possible to determine the conditions of fire protection of wood, by forming a barrier for thermal conductivity during the decomposition of varnish into foam coke. Experimental studies have confirmed that a sample of wood covered with a fire-resistant coating has withstood temperature effects under the influence of heat flow for 600 seconds. This gives reason to assert the possibility of targeted regulation of wood fire protection processes through the use of fire retardant coatings capable of forming a protective layer on the surface of the material that inhibits the rate of wood burning.

**Keywords:** protective agents, fire resistance, mass loss, surface treatment, wood burning rate, protection efficiency.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2023