

УДК 614.842

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.163591

Вплив вогнезахисного покриття на параметри горіння зразків деревини

Ю. В. Цапко, О. Ю. Цапко, О. П. Бондаренко

Проведеними дослідженнями впливу вогнезахисту деревини на займання встановлено параметри поширення полум'я та пригнічення горіння, що дає можливість впливати на цей процес. Доведено, що вони полягають у створенні на поверхні матеріалу шару, який запобігає прогріванню до критичної температури розкладу матеріалу. Експериментальними дослідженнями підтверджено, що необроблений зразок деревини під термічною дією зайнявся, що призвело до його згорання з швидкістю вигорання $18 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. З підвищенням інтенсивності горіння запальної газової суміші на 25 % швидкість втрати маси зразка збільшується в 1,4 рази, а при підвищенні інтенсивності горіння запальної газової суміші на 50 % – у 1,8 разів відповідно. У разі застосування просочення деревини за рахунок розкладання антипіренів під дією температури з виділенням негорючих газів, які гальмують процеси окиснення матеріалу та утворюють шар коксу, швидкість втрати маси знижується до $4,8 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. При обробленні деревини неорганічним покриттям на поверхні деревини утворюється термостійка керамічна плівка, яка знижує швидкість вигорання у 3,8 рази. Але з підвищенням інтенсивності горіння запальної газової суміші на 50 % зразок деревини загорівся, що відобразилося на підвищенні швидкості втрати маси. Застосування органо-мінерального покриття під дією температурного впливу приводить до утворення шару пінококсу та гальмування теплопередачі високотемпературного полум'я і зниження швидкості вигорання до $3 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Завдяки цьому стало можливим визначення умов зміни параметрів горіння та гальмування при вогнезахисті деревини шляхом утворення бар'єру для теплопровідності. Результати співставлення експериментальних даних швидкості вигорання деревини з отриманим аналітичним рівнянням показали відповідність між ними. Таким чином, 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, вогнестійкість, втрата маси, оброблення поверхні, швидкість вигорання деревини, ефективність захисту

1. 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. Підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів, де використовуються будівельні конструкції з деревини, можливо за допомогою її вогнезахисного оброблення. А саме наданні деревині здатності протистояти дії полум'я, поширенню полум'я поверх-

нею, в запобіганні вільному доступу кисню, який сприяє деструкції деревини і прискоренню процесу горіння.

Пожежі, що сталися протягом останніх років, показали підвищення небезпечних факторів пожежі, зокрема, високої температури. Оскільки в останній час розширилась номенклатура участі у пожежах різних синтетичних матеріалів, вуглеводнів, здатних при згоранні до високого тепловиділення.

Відомо, що деревина не здатна до полуменевого горіння самі по собі, лише під дією температури горять продукти її розкладу. Введення в матеріал антипіренів зменшує кількість утворення горючих летких продуктів, інгібує газофазні реакції полум'я, виключає безполуменеве горіння карбонізованого залишку та знижує швидкість втрати маси [1, 2]. Застосування покриттів дозволяє сповільнювати прогрівання матеріалу за рахунок утворення захисного шару і зберігати свої функції при пожежі протягом заданого періоду часу [3, 4].

Тому встановлення параметрів пригнічення горіння деревини за підвищених температур, дослідження швидкості вигорання деревини і впливу покриття на цей процес є невирішеною складовою забезпечення вогнестійкості. І, відповідно, визначає необхідність проведення таких досліджень.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Особливість вогнезахисту дерев'яних будівельних конструкцій полягає в створенні на поверхні елементів теплоізолюючих екранів, що витримують безпосередню дію вогню і дозволяють зберігати свої функції протягом заданого періоду часу [5, 6]. В роботі [5] показано опис поведінки вогнезахисного покриття, що є окремим і складним завданням та охоплює, як спучування покриття, так і подальший теплоперенос. Але залишаються невирішеними питання, які пов'язані з встановленням температури утворення пінококсу. Також у роботі [6] розглянуто вплив зв'язуючого на основі рослинної сировини на властивості гнучких теплоізоляційних матеріалів, однак залишається невирішеним питання, яке пов'язано з горючістю. В роботі [7] 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, викликані впливом цих факторів. Матеріали, які наведено у роботі [8] характеризуються високою вогневою стійкістю, але не показано механізм утворення коксу та температурні переходи при термічній дії.

Ефективність застосування компонентів покриття на основі органічних речовин показана в роботі [9], де за рахунок дії антипіренів на основі поліфосфорних кислот та спінювачів можливо значно впливати на формування захисного шару пінококсу. Однак постає необхідність дослідження умов утворення бар'єру для теплопровідності та встановлення ефективної дії покриття з утворенням шару коксу.

В роботі [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.

Значне підвищення стійкості, щільності і міцності захисного шару досягається внаслідок направленої формування тих чи інших добавок, які утворюють високотемпературні сполуки [11]. Однак для підтвердження цього процесу не наведені відповідні фізико-хімічні розрахунки.

Крім того, багато покриттів мають цілу низку недоліків, таких як нанесення окремих компонентів, втрати функціональних властивостей при збільшенні температури середовища [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 органічних речовин з розчином з колеманітової руди [13]. Показано, що завдяки встановленим співвідношенням стає можливим корегування вмісту компонентів для забезпечення процесу теплостійкості.

Синергічна дія поліфосфату амонію і тригідрату оксиду алюмінію в якості вогнезахисних компонентів для епоксидної композиції, армованої природними волокнами, як вогнезахисного матеріалу наведена у роботі [14]. Показано також, 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.

Тому встановлення параметрів швидкості вигорання вогнезахисних матеріалів 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.

3. Мета і задачі дослідження

Метою роботи є виявлення закономірностей горіння зразків деревини та встановлення параметрів пригнічення швидкості вигорання при вогнезахисті.

Для досягнення мети вирішувались наступні задачі:

- встановити особливості зниження швидкості вигорання деревини при температурному впливі на зразок при застосування покриття;
- дослідити співставлення експериментальних залежностей швидкості вигорання деревини з отриманими аналітичними рівняннями та встановити відповідність захисних композицій.

4. Матеріали та методи дослідження швидкості вигорання деревини

4. 1. Досліджувані матеріали, які використовувались в експерименті

Для встановлення горючості деревини використовували зразки прямошарової деревини сосни розміром 150×60×30 мм, густиною 450÷470 кг/м³, які обробляли вогнезахисними засобами (рис. 1):

- просочувальними розчинами на основі суміші сульфатів і фосфатів амонію та полімеру (вогнезахисний засіб ДСА-1);
- вогнезахисним спучуючим органо-мінеральним покриттям («Skela-w»);
- неорганічним покриттям (патент України на корисну модель № 95440).

Склади пошарово наносили на поверхню зразків деревини з витратою: вогнезахисного просочення у кількості 600 г/м^2 , неорганічного покриття у кількості 440 г/м^2 та спучуючого органо-мінерального покриття у кількості 297 г/м^2 . Після сушіння до постійної маси проводили випробування, як оброблених так і необроблених зразків деревини.

4. 2. Методика визначення показників швидкості вигорання деревини

Для проведення дослідження використовували установку з визначення групи горючості матеріалів [1], яка додатково була оснащена пристроєм для реєстрації зміни маси зразка в ході випробувань. Суть випробувань полягала у вимірюванні втрати маси зразків деревини у певні періоди часу при термічній дії та визначення швидкості вигорання.

Дослідження дії на зразки деревини температурного впливу проводили при різних значеннях, оскільки на практиці дерев'яні конструкції піддаються температурному впливу різного полум'я. А тому інтенсивність горіння запальної газової суміші збільшували на 25 % та 50 %, тобто температура виходу димових газів установки складала відповідно $200 \text{ }^\circ\text{C}$, $250 \text{ }^\circ\text{C}$ і $300 \text{ }^\circ\text{C}$.

Вимірювали втрату маси зразків деревини, на основі яких розраховували швидкість вигорання 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, м^2 .

У даному випадку площа поверхні зразка становила $0,0306 \text{ м}^2$, тобто вся поверхня зразка піддавалась термічному впливу.

5. Аналіз функціональних залежностей по горінню зразків деревини

У загальному вигляді швидкість вигорання деревини описується рівнянням [2]:

$$m = m_0 + \frac{\omega_0}{\alpha - \gamma} \cdot (e^{-\gamma\tau} - e^{-\alpha\tau}), \quad (2)$$

де τ – час горіння зразка деревини, с; α – показник розвитку полуменевого горіння, с^{-1} ; γ – показник гальмування реакцій горіння за рахунок дії вогнезахисних речовин, с^{-1} ; ω_0 – інтенсивність згоряння матеріалу в початковий момент часу, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^2)$; m_0 – початкова швидкість вигорання, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Функціональні залежності швидкості вигорання деревини з наявності вогнезахисту та без нього наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Функціональні залежності швидкості вигорання деревини

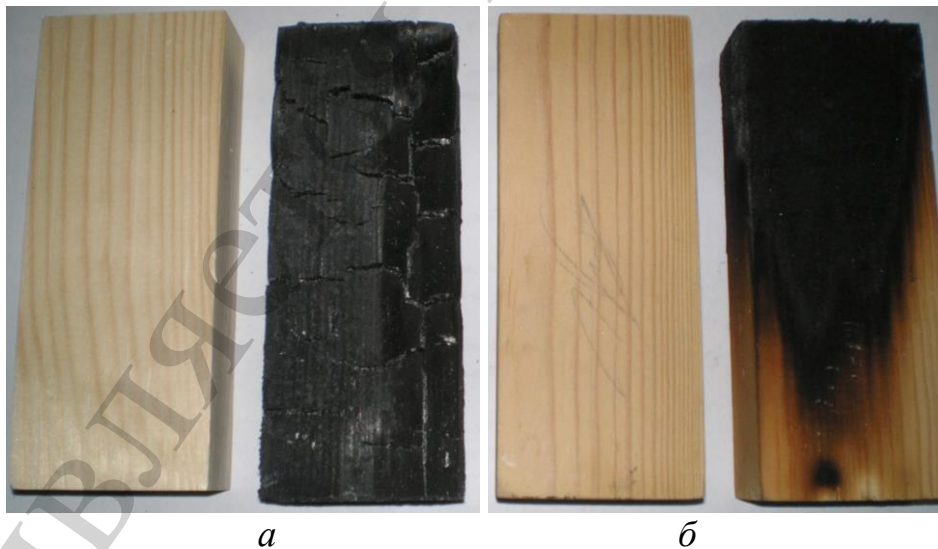
Зразок деревини	Функціональна залежність швидкості вигорання деревини
Необроблений ($\alpha \gg \gamma$ або $\gamma \rightarrow 0$)	$m_{\gamma \rightarrow 0} = m_0 + \frac{\omega_0}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \cdot \tau})$ (3)
Вогнезахищений ($\alpha \ll \gamma$ або $\alpha \rightarrow 0$)	$m_{\alpha \rightarrow 0} = m_0 - \frac{\omega_0}{\gamma} (e^{-\gamma \cdot \tau} - 1)$ (4)
Вогнезахищений ($\alpha \approx \gamma$)	$m_{\alpha \rightarrow \gamma} = m_0 + \omega_0 \cdot \tau \cdot e^{-\gamma \cdot \tau}$ (5)

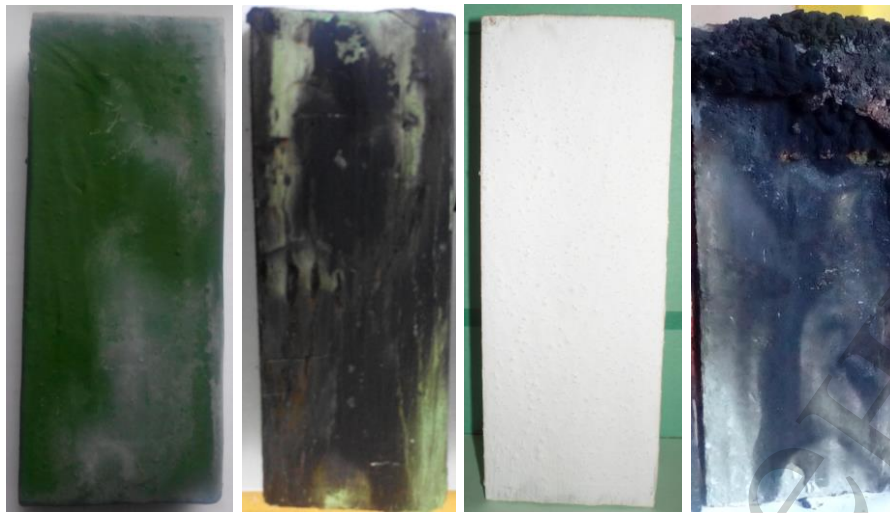
На практиці під час горіння вогнезахищеної деревини можлива втрата маси матеріалу відповідно до закономірностей приведених вище, які дозволяють визначати динаміку швидкості вигорання матеріалів в залежності від властивостей вогнезахисного покриття. Співставлення теоретичних залежностей і експериментальних даних дозволяють прогнозувати вогнезахисні якості матеріалів в залежності від фізико-хімічних властивостей покриття.

6. Результати досліджень швидкості вигорання деревини

6. 1. Втрата маси зразків при вигоранні деревини

Для встановлення швидкості вигорання деревини були проведені випробування на об'єктах, зокрема модельних зразках вогнезахищеної деревини (рис. 1).





б

г

Рис. 1. Модельні зразки вогнезахисної деревини: *а* – необроблений; *б* – оброблений вогнезахисним просоченням; *в* – оброблений вогнезахисним покриттям на неорганічній основі; *г* – оброблений вогнезахисним спучуючим органо-мінеральним покриттям

У табл. 1 наведено значення втрати маси зразків при вигоранні деревини.

Таблиця 1

Втрата маси зразків деревини під час випробувань

Час, с	Втрата маси зразків деревини (г) при інтенсивності горіння пального, %			Час, с	Втрата маси зразків деревини (г) при інтенсивності горіння пального, %		
	Необроблена				Вогнезахиснена просочувальним розчином		
	150	125	100		150	125	100
50	21,42	11,21	3,63	50	9,18	1,12	0,086
100	64,26	38,86	15,99	100	31,824	6,82	0,83
150	114,75	76,22	35,90	150	59,67	15,522	2,37
200	146,88	107,12	55,72	200	97,92	38,952	7,15
250	175,95	112,36	58,45	250	129,285	51,43	9,44
300	183,6	117,98	57,76	300	157,896	67,643	10,35
Час, с	Втрата маси зразків деревини (г) при інтенсивності горіння пального, %			Час, с	Втрата маси зразків деревини (г) при інтенсивності горіння пального, %		
	Вогнезахиснена спучуючим покриттям				Вогнезахиснена неорганічним покриттям		
	150	125	100		150	125	100
50	9,945	1,06	0,07	50	10,71	1,97	0,18
100	33,66	4,12	0,32	100	36,72	8,99	1,10
150	55,08	10,11	0,93	150	78,03	21,49	2,63
200	67,32	14,42	1,32	200	110,16	32,7	5,00

250	76,5	16,38	2,00	250	137,7	40,03	7,35
300	78,03	16,24	2,10	300	165,24	41,06	6,28

Як видно з табл. 1 на початковій стадії нагріву проходить втрата маси зразка із-за ефекту випаровування води, а потім для необробленої деревини проходить стадія інтенсивного горіння, а з підвищенням інтенсивності горіння палика вигорання підвищується у рази. Для вогнезахисної деревини притаманне випаровування води на початковій стадії, а потім проходить процес спучення покриття з втратою маси.

6. 2. Швидкість вигорання зразків деревини

На рис. 2 наведена динаміка зміни швидкості вигорання зразків необробленої деревини в ході проведення експериментальних досліджень (точки) і відповідно їй розрахована теоретична динаміка швидкості вигорання.

При випробуваннях теплової дії піддавалися зразки, які було оброблено просочувальним розчином на основі суміші сульфатів і фосфатів амонію та полімеру (вогнезахисний засіб ДСА-1), а також органо-мінеральним та неорганічним покриттям. Отримана при цьому експериментальна залежність втрати маси зразків і відповідно розрахована теоретична динаміка швидкості вигорання зразків вогнезахисної деревини наведені на рис. 2–5.

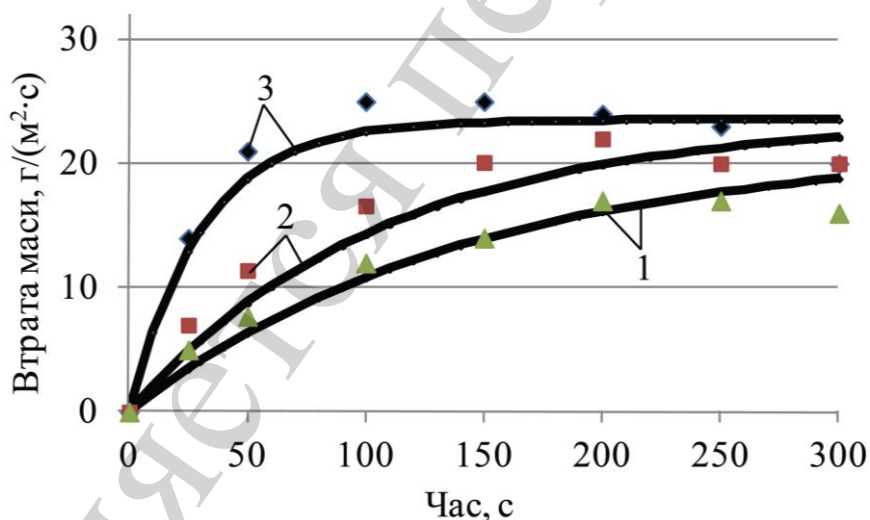


Рис. 2. Динаміка швидкості вигорання необроблених зразків деревини залежно від температури виходу димових газів: 1 – 200 °C; 2 – 250 °C; 3 – 300 °C (точками показані експериментальні дані, суцільною лінією – теоретичні значення)

У табл. 2 наведено результати оброблення експериментальних значень по горінню зразків деревини. Експериментальними дослідженнями підтверджено, що необроблений зразок деревини під термічною дією зайнявся, полум'я поширилося по всій поверхні, що призвело до його згорання з швидкістю вигорання 18 г/(м²·с). З підвищенням інтенсивності горіння запальної газової суміші на 25 %, швидкість втрати маси зразка збільшується в 1,4 рази, а при підвищенні

інтенсивності горіння запальної газової суміші на 50 % – у 1,8 разів відповідно.

У разі застосування просочення деревини за рахунок розкладанням антипіренів під дією температури з виділенням негорючих газів, які гальмують процеси окиснення матеріалу та утворюють шар коксу, швидкість втрати маси знижується до $4,8 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Отримані експериментальні дані температури виходу димових газів з установки рівної $200 \text{ }^\circ\text{C}$ описується рівнянням (3), а при підвищенні інтенсивності горіння, рівнянням (1).

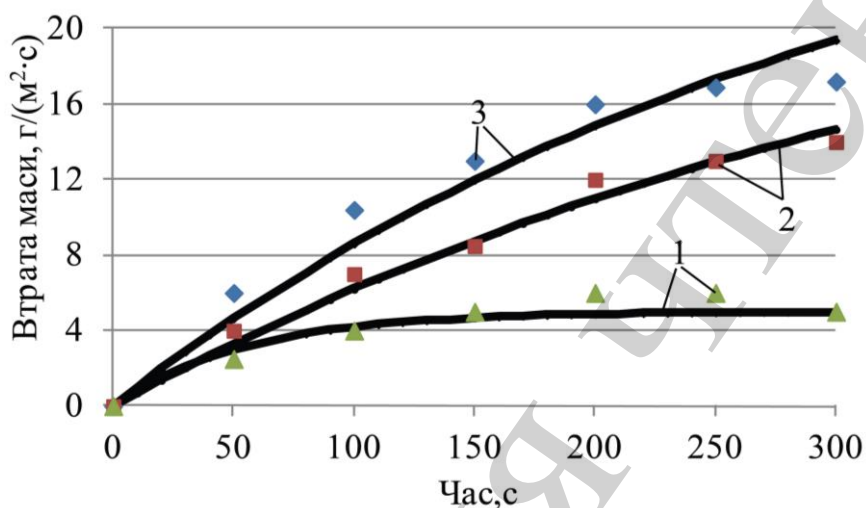


Рис. 3. Динаміка швидкості вигорання при горінні зразків деревини, оброблено просочувальним розчином, залежно від температури виходу димових газів: 1 – $200 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $250 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $300 \text{ }^\circ\text{C}$ (точками показані експериментальні дані, суцільною лінією – теоретичні значення)

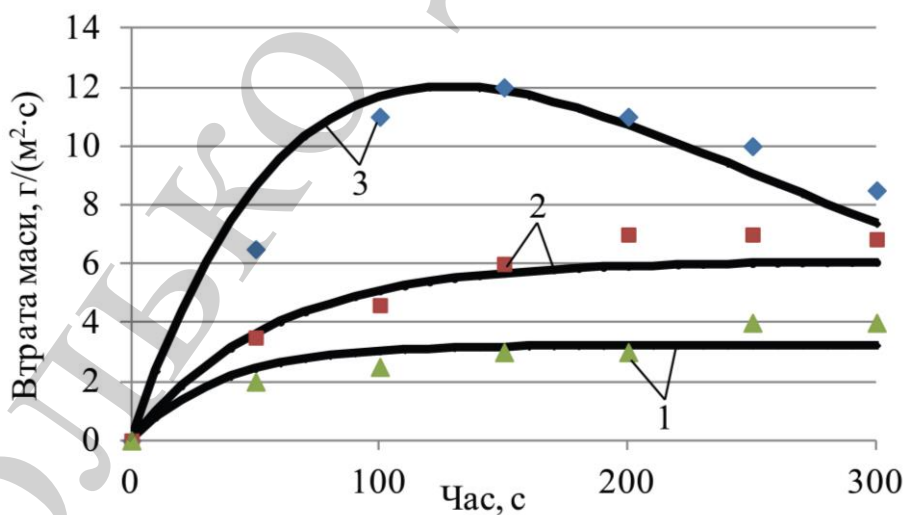


Рис. 4. Динаміка швидкості вигорання при горінні зразків деревини, покритих вогнезахисним спучуючим покриттям, залежно від температури виходу димових газів: 1 – $200 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $250 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $300 \text{ }^\circ\text{C}$ (точками показані експериментальні дані, суцільною лінією – теоретичні значення)

Застосування органо-мінерального спучуючого покриття під дією температурного впливу приводить до утворення шару пінококсу та гальмування теплопередачі високотемпературного полум'я до матеріалу і зниження швидкості вигорання до $3 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Експериментальні значення описуються рівнянням (3). При обробленні деревини неорганічним покриттям на поверхні деревини утворюється термостійка керамічна плівка, яка знижує швидкість вигорання у 3,8 рази. Але з підвищенням інтенсивності горіння запальної газової суміші на 50 % зразок деревини загорівся, що відобразилося на підвищенні швидкості втрати маси. Експериментальні криві втрати маси деревини описуються рівняннями (3) та (4) при збільшенні інтенсивності горіння горючого газу на 50 %.

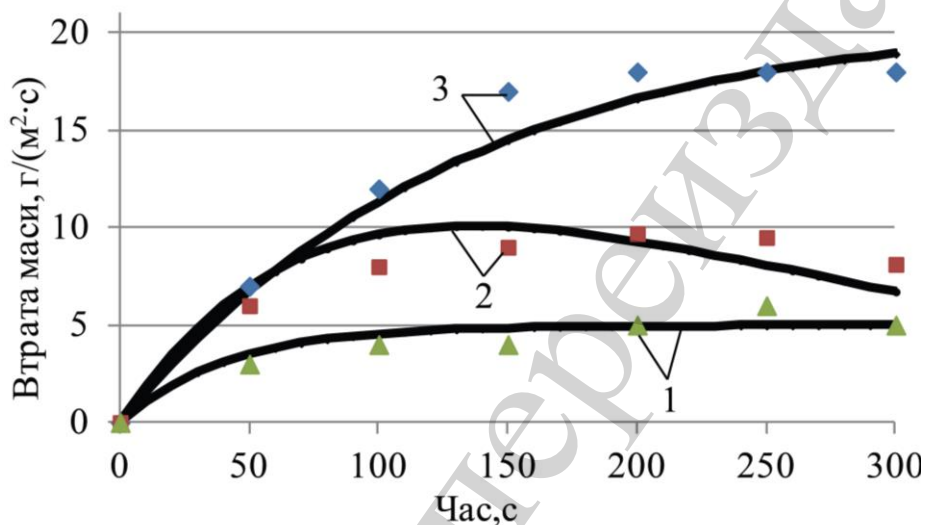


Рис. 5. Динаміка швидкості вигорання при горінні зразків деревини, покритих неорганічним покриттям, залежно від температури виходу димових газів: 1 – $200 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $250 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – $300 \text{ }^\circ\text{C}$

Таблиця 2

Результати оброблення експериментальних значень по горінню зразків деревини

Зразки обробленої деревини сосни	Температура димових газів, $^\circ\text{C}$	$\omega_0, \text{ Н}/\text{м}^3$	$\alpha \cdot 10^3, \text{ с}^{-1}$	$\gamma \cdot 10^3, \text{ с}^{-1}$
Необроблена	200	0,15	7,01	0
– " –	250	0,22	9,35	0
– " –	300	0,75	31,89	0
Просочувальним розчином	200	0,09	0	18
– " –	250	0,07	2,2	0,287
– " –	300	0,10	3,0	0,121
Органо-мінеральним покриттям	200	0,09	0	27,8
– " –	250	0,11	0	18,1
– " –	300	0,26	0	7,8

Неорганічним покриттям	200	0,12	0	24,1
– " –	250	0,20	0	7,3
– " –	300	0,16	0,29	7,1

Визначено критеріальні характеристики параметрів горіння і його припинення. Встановлено, що за наявності вогнезахисту деревини критеріальні співвідношення змінюються у оберненому порядку залежно від властивостей покриття. Так при застосуванні просочення співвідношення змінюється у 2,6 рази, неорганічного покриття – у 3,4 та органо-мінерального у 4,0 рази відповідно. При цьому виявлено зменшення швидкості вигорання зразків деревини, захищеної просоченням, – у 3,9 рази, неорганічним покриттям – у 3,3 та органічним – майже у 6 разів.

Результати співставлення експериментальних залежностей швидкості вигорання деревини з аналітичними рівняннями наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Співставлення швидкості вигорання зразків деревини під час термічної дії

Час, с	Швидкість вигорання деревини, кг/(м ² ·с)						Час, с	Швидкість вигорання деревини, кг/(м ² ·с)					
	Необроблена							Вогнезахищена просочувальним розчином					
	150		125		100			150		125		100	
	Ек	T(3)	Ек	T(3)	Ек	T(3)		Ек	T(2)	Ек	T(2)	Ек	T(4)
50	14	20,4	11,4	9,1	7,7	6,4	50	6	4,7	4	3,3	2,5	2,9
100	21	25	16,6	15	12	10,8	100	10,4	8,6	7	6,2	4	4,2
150	25	26,2	20,1	18,6	14	13,9	150	13	12	8,5	8,7	5	4,7
200	24	26,3	22	20,8	17	16,1	200	16	14,9	12	11	6	4,9
250	23	26,3	20	20,2	17	17,6	250	16,9	17,3	13	13	6	5
300	20	26,3	20	23	16	18,7	300	17,2	19,3	14	14,6	5	5
Час, с	Швидкість вигорання деревини, кг/(м ² ·с)						Час, с	Швидкість вигорання деревини, кг/(м ² ·с)					
	Вогнезахищена спучуючим покриттям							Вогнезахищена неорганічним покриттям					
	150		125		100			150		125		100	
	Ек	T(5)	Ек	T(4)	Ек	T(4)		Ек	T(2)	Ек	T(5)	Ек	T(4)
50	6,5	8,6	3,5	3,6	2	2,4	50	7	6,7	6	6,4	3	3,5
100	11	11,6	4	5	2,5	3	100	12	11,3	8	9,6	4	4,5
150	12	11,9	6	5,7	3	3,2	150	17	14,5	9	10	4	4,8
200	11	10,7	7	6	3	3,2	200	18	16,6	9,7	9,2	5	4,9
250	10	9,1	7	6	4	3,2	250	18	18	9,5	8,1	6	5
300	8,5	7,4	6,8	6,1	4	3,3	300	18	18,9	8,1	6,7	5	5

Примітка: Ек – експериментальні значення швидкості вигорання деревини; Т – теоретичне значення, яке розраховано за (2)–(5) і вказано в дужках

Результати співставлення експериментальних залежностей швидкості вигорання деревини з отриманими аналітичними рівняннями показали в основному відповідність між ними. Але окремі відхилення експериментальних та теоретичних даних, зокрема втрата маси деревини при інтенсивності горіння пального в 150 %, можна пояснити перехідним періодом до іншої залежності, що потребує інших досліджень.

6. Обговорення результатів з визначення швидкості вигорання деревини

Швидкість вигорання деревини під термічною дією високотемпературного полум'я, на що вказують результати досліджень (рис. 3, табл. 1), проходить шляхом його розкладання та характеризується втратою маси зразка. Натомість для захищеного зразка (рис. 4–6, табл. 1), за рахунок дії антипіренів, процеси займання і поширення полум'я значно уповільнюються. Такий механізм захисного засобу обумовлюється насамперед розкладом антипіренів під дією температури з поглинанням тепла та виділенням негорючих газів, зміною напрямлення розкладу матеріалу в сторону утворення важкогорючого коксового залишку. При обробленні деревини неорганічним покриттям на поверхні деревини утворюється термостійка керамічна плівка, яка знижує швидкість вигорання. Але з підвищенням температурного впливу теплопровідність підвищується до критичної температури і зразок деревини розкладається, що підтверджується підвищенням швидкості вигорання. Застосування органо-мінерального спучуючого покриття під дією температурного впливу приводить до утворення шару пінококсу та гальмування теплопередачі високотемпературного полум'я до матеріалу і зниження швидкості вигорання. Окрім того, проходять процеси розкладу покриття з виділенням газів і утворенням на поверхні деревини теплозахисного шару пінококсу. Це погоджується з даними, відомими з робіт [5, 8], автори яких теж пов'язують ефективність термічного захисту матеріалу з дією захисних речовин при додаванні антипіренів.

На відміну від результатів досліджень авторів робіт [12, 14], отримані дані щодо впливу захисних засобів на процес передавання тепла до матеріалу і зміни вогнезахисних властивостей дозволяють стверджувати наступне:

– основним регулятором процесу є не тільки формування теплозахисного шару коксу, але і розкладання антипіренів з виділенням негорючих газів. Зокрема, азоту, діоксиду вуглецю, які взаємодіють з полум'ям та гальмують процес окислення в газовій і конденсованій фазі, що відмічено у роботі [1];

– суттєвий вплив на процес захисту горючого матеріалу при застосуванні вогнезахисного покриття здійснюється у напрямку реакцій у передполум'яній області у бік утворення саже подібних продуктів на поверхні природного горючого матеріалу.

Але, як видно з досліджень, при підвищенні температурного впливу на деревину вогнезахисену просоченням, захист у значній мірі знижується, на що вказує підвищення параметрів горіння, та потребує збільшення кількості композиції. Вогнезахист неорганічним покриттям краще витримує підвищення горіння, але теж потребує вдосконалення. Для зразків деревини, оброблених

спучуючим покриттям, при підвищені температурного впливу, всі параметри, які впливають на швидкість вигорання, мають менші значення та зрівнюються.

Такі висновки можуть вважатися за доцільні з практичної точки зору, тому що дозволяють обґрунтовано підходити до визначення необхідної рецептури вогнезахисного засобу. Оброблення спучуючим покриттям більш ефективно протидіє високій температурі, на що і потрібно направити головну увагу при розробленні рецептури покриттів для деревини. З теоретичної точки зору вони дозволяють стверджувати про визначення механізму процесів вогнезахисту, що є певними перевагами даного дослідження. Результати визначення швидкості вигорання вогнезахисної деревини (табл. 1, 3) вказують на неоднозначний вплив природи засобу захисту на змінення параметрів горіння та пригнічення полум'я. Зокрема, це передбачає наявність даних, достатніх для якісного проведення процесу горіння та виявлення на його основі моменту часу, з якого починається процес пригнічення, що є новим і не дослідженим. Таке виявлення дозволить дослідити перетворення поверхні деревини під дією вогнезахисту у сторону утворення коксу й інгібування полум'я та визначити ті змінні, що суттєво впливають на початок цього процесу.

Дана робота є продовженням досліджень, наведених у [1–4], де в повній мірі приведено механізм вогнезахисту органічних природних матеріалів, утворення пінококсу, зниження втрати маси при горінні. Наведені дослідження потребують розроблення натурних методів випробування та дослідження і опису поведінки деревини.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на теоретичне та експериментальне вивчення процесів горіння деревини, встановлення взаємозв'язку між складовими і властивостями засобів захисту.

8. Висновки

1. Проведено експериментальні дослідження швидкості вигорання при займанні зразків деревини та виявлено вплив на цей параметр вогнезахисного покриття. Визначено характеристики параметрів займання та пригнічення горіння, що дозволяють одержувати зміну динаміки вигорання деревини процесу при розкладі вогнезахисного покриття. Так, для деревини вогнезахисної просоченням показник пригнічення горіння при підвищені температурного впливу знижуються до нуля, а параметр горіння підвищується з нуля до $\alpha \approx 3,0 \text{ c}^{-1}$. Натомість у деревини, захищеної покриттям з підвищенням температурного впливу, показник пригнічення горіння знизився у 3,5 рази, однак параметр горіння відсутній. При цьому встановлено зменшення швидкості вигорання зразків деревини, захищеної просоченням – у 3,9 рази, неорганічним покриттям – у 3,3 та органічним – майже у 6 разів.

2. Результати співставлення експериментальних залежностей швидкості вигорання деревини з отриманим аналітичним рівнянням показали відповідність між ними з допустимим відхиленням. Визначено критеріальні характеристики параметрів горіння і його припинення. Встановлено, що за наявності вогнезахисту для деревини критеріальні співвідношення змінюються в оберненому порядку залежно від властивостей покриття, тобто, параметр горіння відсутній, а

показник пригнічення горіння збільшується у десятки разів: при просоченні – $0,0018 \text{ с}^{-1}$, неорганічному покритті – $0,00241 \text{ с}^{-1}$ та спучую чому покритті $0,00278 \text{ с}^{-1}$. Це свідчить про утворення теплозахисного шару на поверхні деревини, який запобігає вигоранню і проходженню високої температури до матеріалу, що і підтверджується відсутністю процесу займання вогнезахищеної деревини. При підвищенні температурного впливу на вогнезахищені зразки деревини параметр горіння підвищується, а показник пригнічення горіння знижується і залежно від його значення найбільш ефективним захистом є оброблення деревини покриттями, що спучується.

Література

1. Tsapko Y., Tsapko A. Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3, Issue 10 (87). P. 50–55. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102393>
2. Цапко Ю. В. Влияние поверхностной обработки древесины на огнестойкость деревянных конструкций // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2013. Т. 5, № 5 (65). С. 11–14. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18104/15850>
3. Tsapko Y., Tsapko A., Bondarenko O. Establishment of heat-exchange process regularities at inflammation of reed samples // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1, Issue 10 (97). P. 36–42. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156644>
4. Increase of fire resistance of coating wood with adding mineral fillers / Tsapko Y., Kyrycyok V., Tsapko A., Bondarenko O., Guzii S. // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. P. 02034. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002034>
5. Neue Wege: Reaktive Brandschutzbeschichtungen für Extrembedingungen / Krüger S., Gluth G. J. G., Watolla M.-B., Morys M., Häßler D., Schartel B. // *Bautechnik*. 2016. Vol. 93, Issue 8. P. 531–542. doi: <https://doi.org/10.1002/bate.201600032>
6. Effects of Complex Flame Retardant on the Thermal Decomposition of Natural Fiber / Xiao N., Zheng X., Song S., Pu J. // *BioResources*. 2014. Vol. 9, Issue 3. P. 4924–4933. doi: <https://doi.org/10.15376/biores.9.3.4924-4933>
7. The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak (*Tectona grandis* L. f.) wood / Gaff M., Kačík F., Gašparík M., Todaro L., Jones D., Corleto R. et. al. // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 200. P. 551–558. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.106>
8. 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*. 2019. Vol. 135, Issue 6. P. 3085–3093. doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7544-9>

9. Cirpici B. K., Wang Y. C., Rogers B. Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire // *Fire Safety Journal*. 2016. Vol. 81. P. 74–84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.01.011>
10. Graphene-Borate as an Efficient Fire Retardant for Cellulosic Materials with Multiple and Synergetic Modes of Action / Nine M. J., Tran D. N. H., Tung T. T., Kabiri S., Losic D. // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017. Vol. 9, Issue 11. P. 10160–10168. doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b00572>
11. Carosio F., Alongi J. Ultra-Fast Layer-by-Layer Approach for Depositing Flame Retardant Coatings on Flexible PU Foams within Seconds // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2016. Vol. 8, Issue 10. P. 6315–6319. doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b00598>
12. An investigation into waterborne intumescent coating with different fillers for steel application / Md Nasir K., Ramli Sulong N. H., Johan M. R., Afifi A. M. // *Pigment & Resin Technology*. 2018. Vol. 47, Issue 2. P. 142–153. doi: <https://doi.org/10.1108/prt-09-2016-0089>
13. Erdoğan Y. Production of an insulation material from carpet and boron wastes // *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*. 2016. Issue 152. P. 197–202. doi: <https://doi.org/10.19111/bmre.74700>
14. Synergistic of ammonium polyphosphate and alumina trihydrate as fire retardants for natural fiber reinforced epoxy composite / Khalili P., Tshai K. Y., Hui D., Kong I. // *Composites Part B: Engineering*. 2017. Vol. 114. P. 101–110. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.049>