УДК 614.842
DOI: 10.15587/1729-4061.2021.229458

Закономірності вимивання водорозчинних фосфорно-амонійних солей вогнезахисного покриття деревини через поліуретанову оболонку

Ю. В. Цапко, Р. Д. Василишин, О. М. Мельник, В. В. Ломага, О. Ю. Цапко, О. П. Бондаренко

Проведено аналіз вогнезахисних матеріалів для дерев'яних будівельних конструкцій і встановлено необхідність розробки надійних методів дослідження процесу вимивання антипіренів з поверхні будівельної конструкції, необхідних для створення нових типів вогнезахисних матеріалів. Тому виникає необхідність визначення умов утворення бар'єру для вимивання і встановлення механізму гальмування передачі вологи до матеріалу. У зв'язку з цим розроблена математична модель вимивання антипіренів, при застосуванні полімерної оболонки з органічного матеріалу в якості покриття, що дозволяє оцінити ефективність полімерної оболонки за кількістю вимитого антипірену. За експериментальними даними та теоретичними залежностями розраховано динаміку виходу антипіренів з вогнезахищеного шару покриття, що не перевищує 1,0 %, та відповідно забезпечує вогнезахист деревини. Результати визначення втрати маси зразка під час впливу води вказують на неоднозначний вплив природи захисту на вимивання. Зокрема, це передбачає наявність даних, достатніх для якісного проведення процесу гальмування дифузії вологи та виявлення на його основі моменту часу, з якого починається падіння ефективності покриття. Експериментальними дослідженнями підтверджено, що зразок вогнезахищеної деревини після експозиції води протягом 30 діб витримав вплив теплового потоку. Зокрема втрата маси деревини після температурного впливу становила менше 6 %, а температура димових газів не перевищила 185 °С. Таким чином, є підстави стверджувати про можливість спрямованого регулювання процесів вогнезахисту деревини шляхом застосування полімерних покриттів, здатних утворювати на поверхні вогнезахищеного матеріалу захисний шар, який гальмує швидкість вимивання антипіренів.

Ключові слова: захисні засоби, втрата маси, оброблення поверхні деревини, вимивання антипірену, полімерна оболонка.

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. З огляду на той факт, що саме цей матеріал чутливий до впливу високої температури, підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів, де використовуються будівельні конструкції з деревини, можливо за допомогою їх вогнезахисного оброблення.

Експлуатаційна надійність і ефективність вогнезахисту деревини залежить від якості та реакційної здатності вогнезахисного засобу, а також від класу умов

Ноу-хау

експлуатації об’єкта, де застосовуються ці матеріали. Інколи при експлуатації вогнезахищеної деревини в умовах коливання температурно-вологісних полів у широких межах, водорозчинні композиції вимиваються, що приводить до займання горючих конструкцій при дії високотемпературного полум’я. Прикладом є пожежа, яка виникла у 2010 році у виробничій будові підприємства «ВЕРКОН», м. Київ (Україна) під час ремонту покрівлі та світлоаераційних ліхтарів, дерев’яні конструкції яких втратили вогнезахисну здатність і при використанні газових пальників загорілись.

Необхідність вогнезахисту необхідна і для об’єктів масового перебування людей, які виготовлені з дерев’яних конструкцій і експлуатуються без опалення, періодично, оскільки вогнезахист вимивається з деревини, та осипається під дією гравітаційних сил. Прикладом є пожежа у дитячому таборі «Вікторія», м. Одеса (Україна).

Тому дослідження, що направлені на визначення закономірностей гальмування процесу вимивання водорозчинних антипіренів з вогнезахищеної деревини через оболонку водостійкого поліуретанового покриття, є актуальними.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [1] показано, що реактивні протипожежні покриття дуже ефективно підвищують вогнестійкість дерев’яних конструкцій. Однак покриття і випробування на вогнестійкість мають бути адаптовані і доопрацьовані для все більш складних застосувань, у тому числі і при зміні температури і вологості. Поточні дослідження зосереджені на розробці нових матеріалів (наприклад, геополімерів, керамічних покриттів, покриттів на основі силікону) для сценаріїв екстремального загоряння (екстремальні температури, тривалий час впливу) і реалізації складних функцій (складна геометрія, зміни умов експлуатації). Але не сказано, для яких класів експлуатації вони належать.

Значення впливу гігроскопічності до стійкості вимивання впливає на показники вогнезахисних речовин [2]. Для підвищення вогнезахисту було додано золь нано-SiO_2 до різних азотно-фосфорно-борних антипіренів для отримання чотирьох нових сполук для просочення, названих: (1) дигідрофосфат амонію+тетрагідрат октаборат динатрію (AD), (2) дигідрофосфат амонію+тетрагідрат октаборат динатрію+золь нано-SiO_2 (ADS), (3) дигідрофосфат амонію фосфат+борна кислота (АВ) та (4) дигідроген амонію фосфат+борна кислота+золь нано-SiO_2 (АБС). Після цього вивчили гігроскопічність, стійкість до вимивання та термостійкість за допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM), енергетично-дисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDX), термогравіметричного (TG) та інфрачервоного спектрометра з перетворенням Фур'є (FTIR) та оптимального складного вогню ретардант – АБС. Результати показують, що додавання золю нано-SiO_2 може не тільки ефективно знизити гігроскопічність вогнезахисних матеріалів понад 20 %, але й покращити його стійкість до вимивання. Але для підтвердження цього процесу не наведені відповідні фізико-хімічні дані, щодо вимивання в процесі експлуатації.

Опис поведінки деревини [3], що просочена гуанілсечовинним фосфатом, борною кислотою та меламінформальдегідною смолою, виявляла значно під-

For reading only

вищену стійкість до вилуговування, зберігаючи при цьому чудову вогнестійкість, як перевірено методом граничного індексу кисню. Було виявлено, що фосфат гуанін сечовини добре затримується у структурі деревини, про що свідчить спектроскопія FTIR. Втрати ефективності вогнезахисної речовини на 7,4 % була досягнута після надмірного вимивання обробленої деревини. Але залишаються невирішеними питання, які пов'язані з механізмом утворення пінококсу. Причиною цього можуть бути тонкощі щодо утворення захисного шару, що відповідно робить такі дослідження складними.

У дослідженні [4] було спрямовано на обговорення методу оцінки показників реакції вогню деревини, обробленої антипіреном на основі фосфороганічних речовин, яка використовувалася в якості фасадів будівель з урахуванням погіршення старіння. Були досліджені характеристики вогнестійкості деревини та встановлено, що початкові показники погіршились під час випробування на реакцію на вогонь понад 12 %.

Ефективність застосування компонентів покриття показана в роботі [5], що стосується ефектів комбінованої обробки деревини азотно-фосфорною вогнезахисною та термообробкою, яка піддавалась гігроскопічності, вимиванню, термостійкістю, дослідженням інфрачервоними (FTIR) спектрами перетворення Фур'є, та рентгенівськими дифракційними властивостями. Зразки деревини просочували 10 % -вим розчином антипірену і піддавали термічній дії при 140–160 °C протягом 30 хв. Термічно оброблена деревина зменшила поглинання вологи на 5 % та підвищив стійкість вимивання антипіренів до 10 % та покращила термічну стабільність понад 3 %. Встановлено, що термообробка розкладає антипірен, а кислотність цих продуктів розпаду має дегідратаційний ефект на полісахариди деревини, а кількість гідроксильних груп у деревині значно зменшилася. Низькотемпературна термообробка посилила фіксацію антипірену та гідрофобність деревини, обробленої антипіреном. Проте виконання даних робіт потребує спеціального устаткування на стадії виготовлення матеріалів.

В роботі [6] за метою було дослідити вплив антипіренів на основі бору та навантаження волокна на механічні, пожежні та теплові показники просоченої деревини, наповненого поліетиленовими композитами високої щільності. Для цього деревину просочували розчином борної кислоти, бури та їх суміші та сушили перед виготовленням композитів. Також досліджували вплив вимивання на граничні рівні кисневого індексу (LOI) вогнезахищених зразків та встановлено, зразки з бурою забезпечували кращі механічні властивості порівняно із зразками з борною кислотою та демонстрували 19 % поліпшення модуля розтягування при навантаженні волокна на 40 % порівняно з контрольними зразками. Крім того, вогнезахищені зразки бурою збільшували рівень LOI та обвуглення, а також зменшували швидкість горіння на 50 %. Наявність борної кислоти у композиції після вимивання дещо знизили ефективність захисту до 5 %.

Проведені дослідження для вивчення функціональності деревини, обробленої антитардантами [7]. Силікат натрію проникав у деревину, наступні засоби, такі як борна кислота, борат амонію, фосфат діамонію, обробляли для фіксації антипірену. Як результати опір вимивання був покращений на 10 %. Вогнезахисна комбі-

Not a reprint

нація, така як силікат натрію, борна кислота та фосфат діамонію, показала високі гігроскопічні властивості та корозійну ефективність до металів. Однак не сказано про вплив зміни середовища на покриття, його руйнування в часі.

У роботі [8] досліджені гіпофосфіт алюмінію і ціанурат меламіну, що використовувалися в якості антипірену в композиті з поліпропілен і деревного борошна. Займистість композитів була перевірена за допомогою граничного кисневого індексу (LOI), випробування на вертикальне горіння і тесту конічного калориметр. Коли в композит було завантажено 20 % антипірену, LOI був збільшений до 29,5 %. Крім того, міцність на вигин збільшилася приблизно на 11,0 %. Результати випробування на калориметрі показали, що швидкість тепловиділення і пік швидкості тепловиділення композиту були значно знижені. Механізм термічної деструкції композитів був досліджений методами термогравіметричного аналізу, інфрачервоної спектрометрії з перетворенням Фур'є, та встановлено, що антипірени мають ефект уповільнення горіння в газовій фазі і конденсованої фазі під термічного руйнування композиту, однак не сказано про водостійкість даної композиції.

Вплив неорганічних наповнювачів на вогнезахисне покриття на водній основі проведено в роботі [9]. Результати показують, що комбінація покриття з наповнювачем $CaCO_3$ значно поліпшила протипожежні характеристики через утворений шар пінококсу і рівноважної температури, рівної 264 °C. Шар вугілля показав однорідну щільну структуру піни на мікрофотографії, і цей склад мав адгезійну міцність 2,13 МПа, що вказує на ефективність адгезії до підкладки. І навпаки, комбінація покриття з $Al(OH)_3$ показала найвищий кисневий індекс, рівний 35 %, що призвело до стійкості до займання. Однак механізм спучення покриття при цьому не вказаний та не виявлені умови експлуатації покриття.

У роботі запропоновано математичну модель та методику чисельного дослідження кінетики стану тепло 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.

Таким чином, з літературних джерел встановлено, що вогнезахисні покриття здатні вимиватися з поверхні деревини при експлуатації та не визначені параметри, які забезпечують стійкість до втрати деревиною вогнезахисту, а також що впливає на цей процес. Мізерність математичних моделей для пояснення і опису процесу вимивання антипіренів, нехтування застосуванням органічних речовин для гальмування їх виходу призводить до загорання дерев’яних конструкцій під дією полум’я. Тому встановлення протидії вимивання антипіренів з вогнезахищеної деревини і впливу компонентів на цей процес, і обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

3. Мета і задачі досліджень

Метою роботи є виявлення закономірностей вимивання водорозчинних солей через поліуретанову оболонку з вогнезахищеної деревини. Це дає можливість обґрунтувати застосування вогнезахисного покриття на об’єктах з підвищеною вологістю.

Ознайомчий опт

Для досягнення мети вирішувались наступні задачі:

– провести моделювання процесу вимивання водорозчинних солей через поліуретанову оболонку з вогнезахищеної деревини;

– встановити ефективність вогнезахисту деревини після вимивання водорозчинних солей через поліуретанову оболонку під впливом води.

4. Матеріали і методи досліджень

4. 1. Досліджувані матеріали, які використовувались в експерименті. Дослідження протидії вимиванню захисного засобу з деревини, обробленою вогнезахисною композицією, проводили на зразках прямошарової деревини [11] розміром 150×60×30 мм (рис. 1).

а *б* *в*

Рис. 1. Модельні зразки деревини для випробувань: *а* – сосна; *б* – смерека; *в* – бук

Зразки обробляли покрівельним просочувальним розчином «Skela-i» (суміш карбаміду 28…30 % і фосфорних кислот 23…24 % та крохмалю 20 %) у кількості 270,2 г/м^2, при цьому товщина вогнезахисного покриття склала близько 100 мкм [12]. За для підвищення стійкості проти дії води зразки покривали полімерними сумішами на основі поліуретанових органічних покриттів виробництва України у кількості 100 г/м^2 [13]. Товщина відповідно склала близько 40 мкм.

4. 2. Методика визначення показників вимивання водорозчинних фосфорно-амонійних солей вогнезахисного покриття деревини через поліуретанову оболонку

Для одержання значень масопереносу антипірену з деревини розроблено і виготовлено спеціальне обладнання (рис. 2).

Зразки оброблені вогнезахисною композицією та нанесеним захисним шаром з обробленими парафіном торцями (товщиною 2 мм), поміщали й закріплювали в кюветі з дистильованою водою об’ємом 100 см^3 (рис. 2). Через певний

Not a reprint

проміжок часу, перемішавши розчин скляною паличкою, за допомогою піпетки відбирали 5 см^3 води та визначали в ній концентрацію антипірену [14].

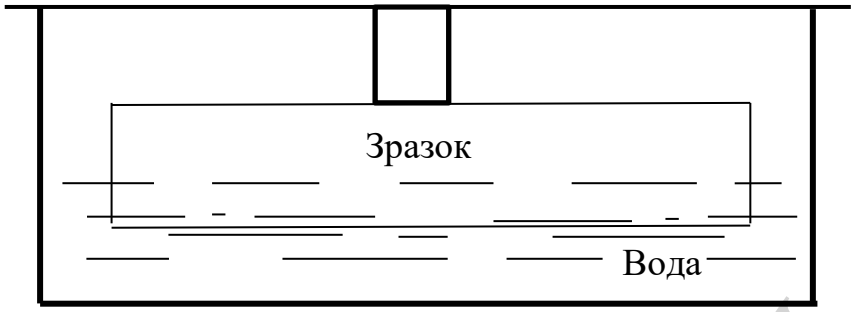


Рис. 2. Пристрій для випробувань на вимивання вогнезахисних засобів

Дослідження з визначення горючості деревини після експозиції води проводили методом термічного впливу.

Суть методу випробувань експериментального визначення групи горючості вогнезахищеної деревини полягає у впливі на зразок, що розташований в установці, полум'я пальника або радіаційної панелі з заданими параметрами.

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 – Δt<60 °С та Δm<60 %;

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

5. Результати дослідження процесу вимивання водорозчинних фосфорно-амонійних солей вогнезахисного покриття деревини через поліуретанову оболонку

5. 1. Моделювання процесу вимивання водорозчинних фосфорно-амонійних солей вогнезахисного покриття деревини через поліуретанову оболонку

Механізм вимивання захисного покриття з деревини у період експлуатації є таким: при зволоженні деревини антипірени захисних речовин розчиняються і поступово переміщуються на поверхню деревини, де їхня концентрація з часом зменшується (рис. 3). Наявність полімерної оболонки на поверхні зразка уповільнює процес вимивання.

Розглядаються чотири області:

1 – зовнішнє середовище, $x<0$;

2 – полімерна оболонка товщиною δ, мм, $0 \leq x \leq \delta$;

3 – частина покриття з розчиненою речовиною, $\delta < x \leq Z(\tau)$ (Z – координата розчинення, м);

4 – матеріал покриття з твердою речовиною, $\delta \leq x \leq \delta + R$ (R – товщина вогнезахисного покриття, м).

For reading only

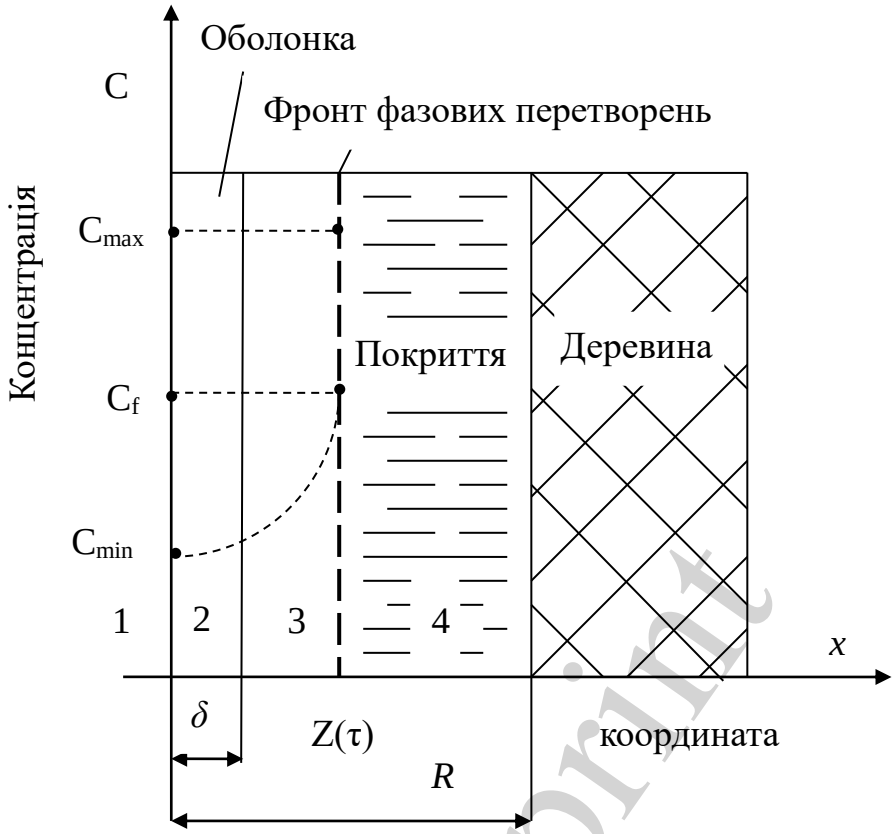


Рис. 3. Розрахунково-аналітична схема процесу вимивання покриття з деревини

Диференціальне рівняння дифузії, що описує процес вимивання, має такий вигляд [15]:

$$\frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} = \frac{1}{\phi_i^2}\frac{\partial C_i}{\partial \tau}, \tag{1}$$

де C – концентрація речовини в i-й області, кг/м^3; $\phi_i = \sqrt{D_i}$; D_i – коефіцієнт дифузії речовини в i-й області, м^2/с; τ – час перебування зразка у вологому середовищі, с.

Початкові й граничні умови:

– при $x<\delta$, $\tau=0$

$$C_1(x,0) = C_{\min}, Z(0)=0; \tag{2}$$

– при $x>\delta$

$$C_3(x,0) = C_{\max}. \tag{3}$$

На межі полімерної плівки і навколишнього середовища задається гранична умова третього роду:

Not a reprint

$$\phi^2 \frac{\partial C_2}{\partial x}\bigg|_{x=0} = \beta\left(C_2 - C_1\right)\big|_{x=0}, \qquad (4)$$

де β – коефіцієнт масообміну між поверхнею плівки покриття і навколишнім середовищем, м/с.

При розчинені покриття і дифузії компонентів захисного покриття, задаються граничні умови четвертого роду:

при $x>\delta$, $\tau>0$ на межі розподілу

$$C_2(\delta,\tau) = C_3(\delta,\tau), \qquad (5)$$

на фронті розчинення покриття

$$C_3\left[Z(\tau),\tau\right] = C_4\left[Z(\tau),\tau\right] = C_f. \qquad (6)$$

Розв'язок рівняння (1) представляється в інтегральному вигляді або нескінченними рядами, що вимагає проведення значної кількості обчислень, а тому було застосовано числові методи аналізу. Для цього було введено безрозмірні змінні:

$$\bar{x} = \frac{x}{R};\ \mathrm{Fo} = \frac{\phi^2 \cdot \tau}{\bar{x}^2};\ \bar{Z} = \frac{Z}{R};\ \bar{C} = \frac{C}{C_{\max}}, \qquad (7)$$

де Fo – дифузійне число Фур'є; R – товщина покриття, мм.

Для одномірної задачі маємо наступну розрахункову залежність [16]:

$$\bar{C}_{i,n+1} = (1 - 2\Delta Fo)\bar{C}_{i,n} + \Delta Fo\left(\bar{C}_{i-1,n} + \bar{C}_{i+1,n}\right). \qquad (8)$$

Розрахункова сітка представлена вузлами по простору $i = 0...100$, які отримано шляхом умовного поділу зразка перерізами із кроком $\Delta\bar{x}$ і на тимчасові шари n із кроком ΔFo за умови

$$\beta = \Delta\mathrm{Fo}/\Delta\bar{x}^2 = 1/6, \qquad (9)$$

що забезпечує стійкість явної схеми при розрахунку, то з рівняння (8) отримуємо:

$$\bar{C}_i^{n+1} = \frac{1}{6}\left(\bar{C}_{i+1}^n + 4\bar{C}_i^n + \bar{C}_{i-1}^n\right). \qquad (10)$$

Розрахункова схема для залежності (10) представлена рис. 4.

For reading only

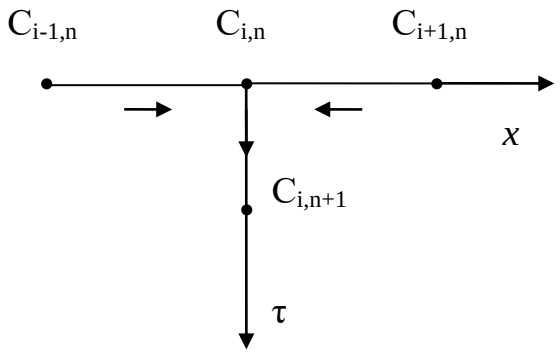


Рис. 4. Схема розрахунку концентрації

У результаті застосування наведеної схеми рівняння (1) перетворюється на комплекс рівнянь, а сіткові значення стають функціями сіткових значень чисел Фур'є:

$$F = \frac{\Delta \mathrm{Fo}}{\Delta \bar{x}^2}, \tag{11}$$

а на границі полімерної плівки і навколишнього середовища – Нусельта:

$$N = \frac{\phi_2^2}{\beta \cdot \Delta \bar{x}}. \tag{12}$$

У разі застосування полімерного покриття вміст антипірену на поверхні полімерної оболонки було прийнято рівним 1 % від його початкового вмісту в деревині при F=0,0001 і N=0,0001. Таке значення антипірену задавалось попередньо для розрахунку, оскільки пов'язано з методикою виготовлення зразків, а саме занесення антипірену в поліуретанову оболонку при оброблені деревини. Результати розрахунку динаміки вимивання антипірену за рівнянням (10) наведені в табл. 1.

На рис. 5 показано залежності значення концентрації антипірену в об'ємі зразка зі зміною товщини полімерної оболонки.

Як видно з рис. 5, значення концентрації при впливі води зменшується в часі, оскільки критерій *Fo* представляє собою безрозмірний час нестаціонарного процесу вимивання антипіренів. При цьому критерій *Nu* збільшився, оскільки характеризує міру співвідношення швидкостей масопереносу за рахунок віддачі концентрації до міжфазної поверхні, тобто оболонки. Тому можна спрогнозувати, що поліуретанова оболонка, за розрахованих параметрів табл. 1, не зруйнувалася. При руйнуванні захисної оболонки потоки вимивання (*Fo*) і потоки гальмування (*Nu*) збігаються [16].

Таким чином, запропонована математична модель і метод її числової реалізації дають можливість визначати параметри процесу вимивання антипіренів з деревини через полімерну оболонку в оточуюче водне середовище. Ця модель описує зазначені процеси залежно від фізико-хімічних властивостей компози-

Not a reprint

ції, її первісного розподілу в обробленій деревині, а також від умов навколишнього середовища.

Таблиця 1

Розподіл концентрації антипірену в шарах вогнезахисного покриття при застосуванні полімерної оболонки отриманої за рівнянням (10)

Перетин зразка	Ітерації									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
На поверхні зразка	0,08	0,1	0,11	0,09	0,06	0,036	0,011	0,0	0,0	0,00
На межі поділу полімерної оболонки і покриття	0,115	0,117	0,131	0,148	0,163	0,175	0,185	0,193	0,201	0,209
На глибині ¼ товщини покриття	0,991	0,950	0,899	0,856	0,822	0,795	0,775	0,762	0,754	0,749
На глибині ½ товщини покриття	1,000	0,999	0,998	0,995	0,989	0,983	0,976	0,971	0,966	0,960

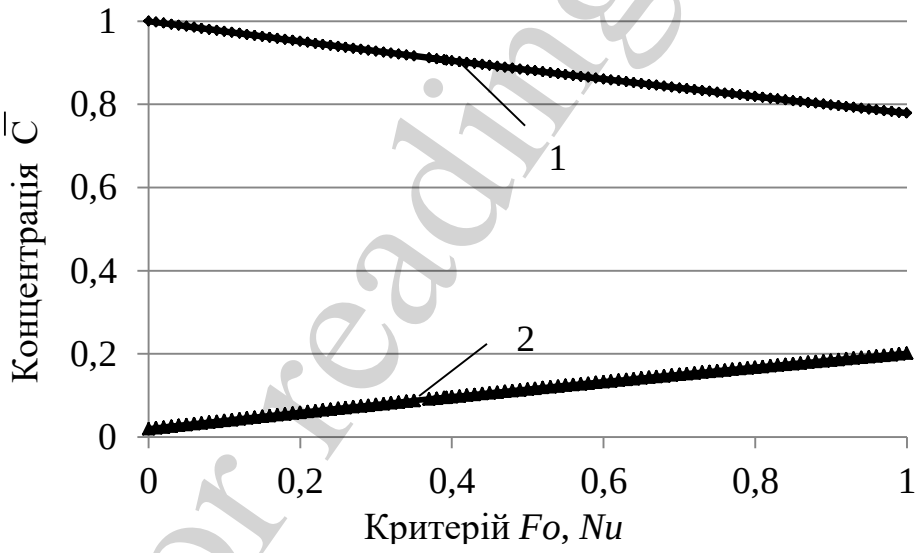


Рис. 5. Зміна концентрації захисної речовини $\bar{C}$ в деревині залежно від *Fo* (1) та *Nu* (2)

5. 2. Результати експериментального дослідження процесу вимивання водорозчинних фосфорно-амонійних солей через поліуретанову оболонку при експозиції поверхні вогнезахищеного зразка деревини у воді

Вплив на гальмування процесу вимивання антипіренів з вогнезахищеної деревини за наявності полімерної оболонки ґрунтувалось на проведені дослідження (рис. 6).

Результати досліджень з визначення тривалості індукційного часу виходу антипірена з вогнезахищеної деревини через шар полімерної оболонки наведено в табл. 2.

For reading only

Рис. 6. Процес вимивання антипіренів водою із зразка деревини

Таблиця 2

Результати досліджень з визначення кількості вимитого антипірену у воді

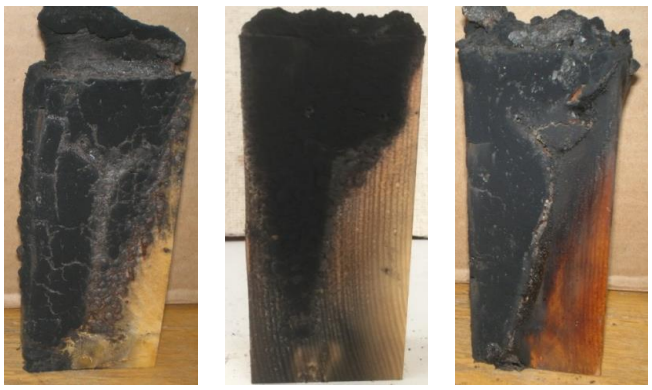
Час експозиції, діб	Кількість вимитого антипірену у воді, мг		
	Деревина		
	Сосна	Смерека	Бук
0,5	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено
1	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено
6	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено
12	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено
18	Сліди	Сліди	Сліди
24	0,01	0,03	0,02
30	0,18	0,16	0,15

Як видно з табл. 2, при дії води на зразки деревини полімерна оболонка витримала вплив вологи, а незначну кількість вимитого антипірену зафіксували після 30 доби експозиції водою деревини, що не перевищує 3,0 %.

Таким чином, результати експериментального визначення кількості вимитих солей у воді (табл. 2) збігаються з результатами теоретичних досліджень зміни концентрації антипірену (табл. 1) та характеризуються зниженням до 3,0 %. Для більш повного підтвердження стійкості до вимивання водорозчинних солей даної композиції проведені дослідження по визначенню групи горючості вогнезахищеної деревини після експозиції водою.

Після експозиції у воді зразки були висушені і піддані термічній дії на визначення групи горючості. На рис. 7 показано результати дії високотемпературного полум’я, на рис. 8 наведено втрату маси зразків після випробувань, а на рис. 9 – температура димових газів.

Not a reprint



а *б* *в*

Рис. 7. Зразки після вогневих випробувань виготовлених з деревини: *а* – сосна; *б* – смерека; *в*– бук

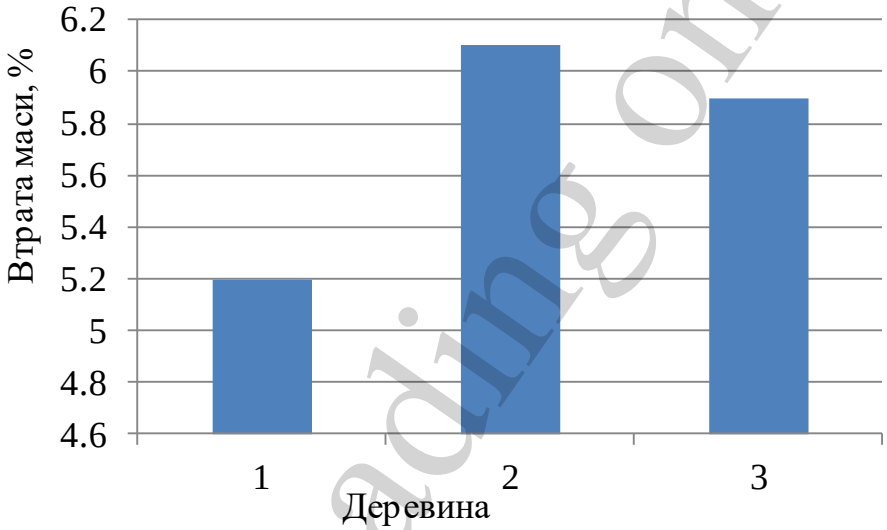


Рис. 8. Результати втрати маси зразків Δm, % вогнезахищеної деревини: 1 – сосна; 2 – смерека; 3 – бук

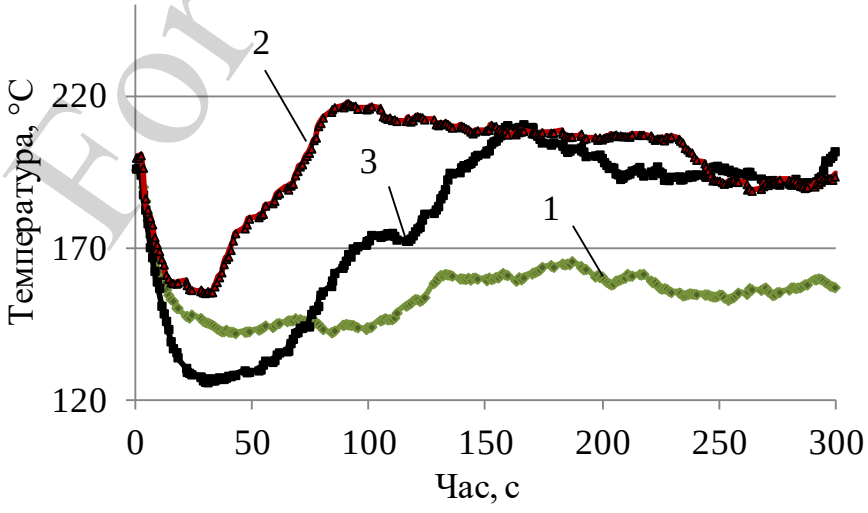


Рис. 9. Динаміка наростання температури димових газів при випробуваннях вогнезахищеної деревини: 1 – сосна; 2 – смерека; 3 – бук

For reading only

У результаті досліджень встановлено, що зразки, які пройшли експозицію води протягом 30 діб, після термічної дії втратили масу не більше 6,2 %, а температура димових газів при горінні склала не більше 220 °С. За цими результатами вогнезахищені зразки відносяться до важкогорючих матеріалів.

Таким чином, отримані дослідження з визначення групи горючості вогнезахищеної деревини відповідають властивостям утворення теплостійкого шару піно коксу під дією високотемпературного полум'я, а значить показують стійкість полімерної оболонки до вимивання водорозчинних антипіренів під впливом води, що підтверджують результати теоретичних досліджень

6. Обговорення результатів дослідження процесу вимивання водорозчинних фосфорно-амонійних солей вогнезахисного покриття деревини через поліуретанову оболонку

При дослідженні процесу вимивання водорозчинних фосфорно-амонійних солей вогнезахисного покриття деревини через поліуретанову оболонку, як витікає з отриманих результатів (табл. 1, 2), закономірним є продовження часу руйнування полімерної оболонки і виходу антипіренів. Це обумовлено стійкістю поліуретанового покриття та утворення заслону на поверхні вогнезахищеної деревини, які уповільнюють процеси дифузії водорозчинних антипіренів.

Слід зазначити, що присутність поліуретанової оболонки призводить до закупорки поверхні деревини від проникнення вологи. Вочевидь такий механізм впливу поліуретанової оболонки є тим фактором регулювання процесу, завдяки якому вогнестійкість деревини зберігається. В цьому сенсі має інтерпретація результатів визначення важкогорючості деревини після експозиції води, а саме втрати маси зразків при термічному впливі та температури димових газів при горінні. Оскільки втрата маси не перевищила 6,2 %, а температура склала не більше 220 °С. Це свідчить про утворення заслону для виходу антипіренів, який можливо ідентифікувати за методом термічного впливу на дослідженні зразки.

Це означає, що врахування даного факту відкриває можливість для ефективного регулювання властивостями вогнезахищеної деревини безпосередньо в умовах серійного промислового виробництва.

Зіставлення експериментальних досліджень вимивання водорозчинних антипіренів та теоретичних досліджень переносу маси антипірену через поліуретанову оболонку свідчить про гальмування процесів вимивання антипіренів, оскільки вимилося не більше 3 %.

Це не розходиться з практичними даними, добре відомими з робіт [5, 6], автори яких, до речі, теж пов'язують стійкість до вимивання з утворенням у складі композицій стійких сполук до вимивання. Але, на відміну від результатів досліджень, опублікованих в [5, 6], отримані дані щодо впливу поліуретанової оболонки та комплексного антипірену на процес гальмування вимивання водорозчинних солей, дозволяють стверджувати наступне:

– основним регулятором процесу є не стільки формування значної кількості водо нерозчинних комплексів, оскільки окремі вогнезахисні покриття руйнуються під впливом дії вологи;

Not a reprint

– суттєвий вплив на процес захисту природного горючого матеріалу при застосуванні вогнезахисного покриття здійснюється у напрямку водоізолювання поверхні деревини полімерною оболонкою стійкою до руйнування під дією вологи.

Такі висновки можуть вважатися за доцільні з практичної точки зору, тому що дозволяють обґрунтовано підходити до визначення необхідної кількості полімерної оболонки. З теоретичної точки зору вони дозволяють стверджувати про визначення механізму процесів гальмування виходу антипіренів, що є певними перевагами даного дослідження. Однак неможливо не відмітити, що результати визначення (рис. 2) вказують на неоднозначний вплив полімерної оболонки на змінення вогнезахисної ефективності. Це проявляється, в першу чергу, в температури димових газів при випробуваннях вогнезахищеної деревини. Така невизначеність накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися як недоліки даного дослідження. Неможливість зняти названі обмеження в рамках даного дослідження породжує потенційно цікавий напрям подальших досліджень. Вони, зокрема, можуть бути орієнтовані на виявлення моменту часу, з якого починається падіння вогнезахисних властивостей до загорання деревини під впливом високої температури. Таке виявлення дозволить дослідити структурні перетворення оболонки, що починають відбуватися в цей час, та визначити вхідні змінні процесу, що суттєво впливають на початок такого перетворення.

7. Висновки

1. За розрахунковою схемою досліджено динаміку виходу водорозчинних антипіренів з вогнезахищеного шару деревини при застосуванні поліуретанової оболонки. Визначено вплив оболонки на стійкість до дії води та отримані критеріальні співвідношення, що дозволяють одержувати зміну антипіренів на поверхні деревини, тобто значення концентрації вимитих антипіренів при впливі води в часі, що характеризується критерієм *Fo*. При цьому обґрунтовано критерій *Nu*, який характеризує масоперенос за рахунок віддачі концентрації до міжфазної поверхні, тобто оболонки, що утримує антипірен. Розраховано динаміку виходу антипіренів з вогнезахищеного шару покриття, що не перевищує 3,0 % та підтверджується експериментально і, відповідно, забезпечує вогнезахист деревини.

2. Особливості гальмування процесу виходу антипіренів з деревини при дії води полягають в ізолюванні поверхні вогнезахищеної деревини полімерною оболонкою. Так, зразок вогнезахищеної деревини після експозиції води протягом 30 діб витримав температурний вплив дії теплового потоку. Зокрема втрата маси деревини після температурного впливу не перевищила 6,2 %, а температура димових газів не перевищила 220 °С.

Подяка

Автори висловлюють подяку за фінансову підтримку роботи, виконаної в рамках бюджету фінансування № 0121U001007, а також на розробку наукових тем у програмі наукового співробітництва COST Action FP 1407 «Розуміння модифікації деревини за допомогою інтегрованого наукового та екологічного підходу» в рамках програми Європейського Союзу HORIZON2020.

For reading only

Література

1. Krüger, S., Gluth, G. J. G., Watolla, M.-B., Morys, M., Häßler, D., Schartel, B. (2016). Neue Wege: Reaktive Brandschutzbeschichtungen für Extrembedingungen. Bautechnik, 93 (8), 531–542. doi: https://doi.org/10.1002/bate.201600032
2. Zhou, Z., Du, C., Yu, H., Yao, X., Huang, Q. (2020). Promotion effect of nano-SiO2 on hygroscopicity, leaching resistance and thermal stability of bamboo strips treated by nitrogen-phosphorus-boron fire retardants. Wood Research, 65 (5), 693–704. doi: https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/65.5.693704
3. Lin, C.-F., Karlsson, O., Mantanis, G. I., Sandberg, D. (2019). Fire performance and leach resistance of pine wood impregnated with guanyl-urea phosphate/boric acid and a melamine-formaldehyde resin. European Journal of Wood and Wood Products, 78 (1), 107–111. doi: https://doi.org/10.1007/s00107-019-01483-y
4. Nakamura, M., Kanematsu, M., Nishio, Y., Yoshioka, H., Hagihara, S., Sugita, T. et. al. (2019). Evaluation of durability of reaction-to-fire performance of fire-retardant treated wooden facades by accelerated weathering test. AIJ Journal of Technology and Design, 25 (60), 709–714. doi: https://doi.org/10.3130/aijt.25.709
5. Chu, D., Mu, J., Zhang, L., Li, Y. (2017). Promotion effect of NP fire retardant pre-treatment on heat-treated poplar wood. Part 2: hygroscopicity, leaching resistance, and thermal stability. Holzforschung, 71 (3), 217–223. doi: https://doi.org/10.1515/hf-2016-0213
6. Donmez Cavdar, A., Mengeloğlu, F., Karakus, K. (2015). Effect of boric acid and borax on mechanical, fire and thermal properties of wood flour filled high density polyethylene composites. Measurement, 60, 6–12. doi: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.078
7. Son, D. W., Kang, M. R., Hwang, W. J., Lee, H. M., Park, S. B. (2014). Hygroscopic Property, Leaching Resistance and Metal Corrosive Efficacy of Wood Treated with Fire Retardants. Journal of the Korean Wood Science and Technology, 42 (2), 157–162. doi: https://doi.org/10.5658/wood.2014.42.2.157
8. Zhao, P., Guo, C., Li, L. (2018). Flame retardancy and thermal degradation properties of polypropylene/wood flour composite modified with aluminum hypophosphite/melamine cyanurate. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 135 (6), 3085–3093. doi: https://doi.org/10.1007/s10973-018-7544-9
9. Md Nasir, K., Ramli Sulong, N. H., Johan, M. R., Afifi, A. M. (2018). An investigation into waterborne intumescent coating with different fillers for steel application. Pigment & Resin Technology, 47 (2), 142–153. doi: https://doi.org/10.1108/prt-09-2016-0089
10. Kovalnogov, V. N., Karpukhina, T. V., Korotkov, E. A. (2016). Mathematic modeling of the kinetics of heat-and-humidity state of capillary-porous bodies under convection drying. AIP Conference Proceedings, 1738. doi: https://doi.org/10.1063/1.4952241
11. Tsapko, Y., Tsapko, A. (2017). Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (10 (87)), 50–55. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.102393

Nova reprint

12. Tsapko, Y., Tsapko, A., Bondarenko, O. P. (2020). Research of Conditions of Removal of Fire Protection from Building Construction. Key Engineering Materials, 864, 141–148. doi: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.141

13. Tsapko, Y., Lomaha, V., Bondarenko, O. P., Sukhanevych, M. (2020). Research of Mechanism of Fire Protection with Wood Lacquer. Materials Science Forum, 1006, 32–40. doi: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1006.32

14. Patnaik, P. (2004). Dean's Analytical Chemistry Handbook. McGraw-Hill Professional, 1280.

15. Potter, M. C. (2019). Engineering analysis. Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91683-5

16. Франк-Каменецкий, Д. А. (1987). Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 502. e, 21

For reading only