

Юрій ЦАПКО¹,

д-р техн. наук, професор

ORCID: 0000-0003-0625-0783

Олексій ЦАПКО¹,

PhD, старш. досл., доцент

ORCID: 0000-0003-2298-068X

Ольга БОНДАРЕНКО¹,

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-8164-6473

Наталія ЛЯЛІНА¹,

д-р техн. наук, професор

ORCID: 0000-0002-9364-0925

Дмитро АНОПКО¹,

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-2585-2512

Аліна ЮЩЕНКО¹,

студентка

ORCID: 0009-0002-0936-5789

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОРГАНІЧНОЇ ОБОЛОНКИ НА ВИМИВАННЯ ЗАХИСНИХ КОМПОЗИЦІЙ З ДЕРЕВИНИ, ЗАХИЩЕНОЇ ВІД ДІЇ ВОГНЮ

На сьогоднішній день існують різні способи вогнезахисту деревини. При зволоженні деревини антипірени розчиняються у вологому середовищі і поступово вимиваються на поверхню, після чого вогнезахисний ефект з часом зменшується. Засоби на основі кислот не мають значної проблеми вимивання через зміну вологості деревини, але, проникаючи глибоко в структуру деревини й взаємодіючи з целюлозою, вони знижують показники міцності. Інший спосіб полягає в нанесенні на поверхню деревини покриття на основі органічних або неорганічних сполучних речовин. Засоби на основі органічних сполучних мають підвищене димоутворення та токсичні речовини, тому їх використання є небезпечним. Тому проведено аналіз захисних матеріалів для дерев'яних будівельних конструкцій і встановлено необхідність розробки надійних методів дослідження процесу вимивання антипіренів, необхідних для створення нових типів вогнезахисних матеріалів. Виникає необхідність визначення умов утворення бар'єру для вимивання антипіренів і встановлення механізму гальмування передачі вологи до матеріалу. У зв'язку з цим розроблена математична модель процесу вимивання захисних речовин із деревини після її просочення антипіренами при застосуванні полімерної оболонки з органічного матеріалу в якості покриття, що дозволяє оцінити ефективність полімерної оболонки за кількістю поглинутої води. Результати розрахунку природу маси зразка під час впливу води вказують на неоднозначний вплив природи захисту на водопоглинання. 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. Таким чином, є підстави

стверджувати про можливість спрямованого регулювання процесів захисту деревини шляхом застосування полімерних покриттів, здатних утворювати на поверхні матеріалу захисний шар, який гальмує швидкість поглинання води.

Ключові слова: *деревина, вогнезахист, органічна оболонка, антипірен, модифікація деревини, вимивання.*

Актуальність теми дослідження. Одним з показників ефективності вогнезахисту деревини є її експлуатаційна надійність. Після надавання деревині захисних властивостей суттєвим чинником є здатність просочувальних засобів утримуватися в її структурі протягом тривалого проміжку часу за умов коливання як температури, так і вологості в широких межах, у зв'язку з чим актуальним є питання визначення терміну зберігання ефективності захисту деревини. Тому останнім часом широкого розповсюдження набули покриття, здатні утворювати на поверхні будівельної конструкції теплоізоляційний шар, який значно зменшує процеси передачі тепла до матеріалу.

Постановка проблеми. Будівництво об'єктів, як цивільного так і промислового призначення, поєднано з застосуванням деревини, яка дуже чутлива до впливу високої температури та спроможна зберігати свої властивості при експлуатації.

Враховуючи це були прийняті нормативні документи, які вимагають при проектуванні конструкції з деревини брати до уваги стійкість до горіння та проводити вогнезахисне оброблення конструкцій спеціальними засобами. Сутність захисту деревини тлумачиться в гальмуванні процесів термічного розкладу компонентів, зниженні константи швидкості реакції та енергії активації, ізолюванні від дії полум'я і доступу кисню [1, 2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Технології, як сказано у дослідженні [3], що використовуються для захисту якості та довговічності деревини від біологічного пошкодження та впливу води, температури та радіації, які впливають на його фізичні та механічні властивості. У цій роботі розглядаються доступні методи лікування, оцінюються їх переваги та недоліки, а також визначаються критерії їх використання. Тема була розділена на два розділи: (I) реагенти, що руйнують деревину, і (II) класифікація технологій захисту, яка включала як традиційні методи, так і новітні підходи, такі як нанотехнології. Висновки, отримані за допомогою цього підходу, вказують на те, що кілька традиційних хімічних обробок суттєво зменшують біологічні пошкодження та поглинання вологи деревиною. Однак слід враховувати потенційний вплив на здоров'я та навколишнє середовище. З іншого боку, стабільність розмірів деревини покращується завдяки використанню термічної обробки. Використання нанометричних композитів для захисту деревини є дуже перспективною технікою, яка знаходиться в стадії розвитку. Однак, це технологія, яка вимагає особливої обережності, оскільки наноматеріали мають бути токсичними для агентів, що викликають біологічне погіршення, але нешкідливими або менш небезпечними для людини та навколишнього середовища.

У статті [4] представлено дослідження водонепроникності водорозчинного біологічного покриття, нанесеного на ялину (*Picea abies*), дослідження міцності адгезії такого ж покриття, нанесеного на ялину (*Picea abies*), бук (*Fagus sylvatica* L.) і букової фанери, а також дослідження міцності зчеплення на ялині після випробування на водонепроникність. Випробування проводились відповідно до

EN 927-5:2006 та EN ISO 4624:2016. Параметри шорсткості вимірювали до і після тесту на водонепроникність. Було встановлено, що покриття є гідрофобним, але також водонепроникним. Найбільший показник адгезійної міцності спостерігався для поверхні бука, найменший – для ялини. Зміни профілів поверхні після випробування на водонепроникність незначні. Відповідно до критеріїв водопоглинання, цю систему покриття можна наносити лише на зовнішню деревину, призначену для таких категорій кінцевого використання, як обшивка перекриттями, огорожі, садові сараї, відкрита обшивка та вентилярована дощова сітка. Однак не визначена довговічність такого покриття.

У роботі [5] дослідження спрямоване на дослідження потенціалу покращення взаємодії муква/полілактид (муква/PLA) за допомогою економічної та екологічної модифікації поверхні перероблених деревних волокон муква за допомогою лужно-лаказної модифікації. Виготовлені біокompозити, призначені для виготовлення міцних стовпів для ферм для напівпосушливих умов Південної Африки, були охарактеризовані через водопоглинання, хімічну стійкість, розбухання по товщині, твердість і термічні властивості. На композитах лужно-лаказа/PLA було виявлено менше набухання по товщині та водопоглинення. Композити з меншою щільністю ($1,09 \text{ г/см}^3$), оброблені лугом і лакказою, продемонстрували кращу хімічну стійкість. Значне набухання композитів спостерігалось на 40% азотній кислоті (HNO_3), тоді як 60% NaOH стиснув композити та PLA на <3,5%. Біокompозит лакказа/PLA продемонстрував максимальну термічну стабільність 733 °C. Енергія активації (E_a), оптимізована на композиті лакказа/PLA з найвищим значенням $104 \text{ кДж моль}^{-1}$. Максимальна кристалічність 45,8% була досягнута на необроблених/PLA композитах. Лужно-лакказна модифікація максимізувала твердість композитів із 35,45 HV на лужно-лакказній/PLA. Однак спосіб приготування має значний вплив на властивості плівки покриття, але характеризується технологічно складністю.

У роботі [7] було протестовано шість різних комерційних покриттів, які використовувалися для обробки зразків ялини (*Picea Abies L. Karst.*) і сосни (*Pinus Sylvestris L.*). Ефективність різних покривних речовин оцінювали за допомогою двох модифікованих методів випробувань відповідно до стандартів EN 382-2 (1994) та EN 927-5 (2006), визначаючи водопоглинання поверхні після занурення у воду на 24 години та динаміку води поглинання клеєного бруса протягом 696 год., витриманого у воді. У результаті дослідження було встановлено, що комерційні покриття на основі органічних розчинників є більш ефективними проти короткочасного та тривалого водопоглинання деревини порівняно з покриттями на масляній основі. Але залишається невирішеним питання стійкості їх до вмивання.

Дослідження, що наведено у [6], мало на меті вивчити вплив параметрів лляної олії, модифікованої кремнійорганічними сполуками, на корисні властивості деревини. Силілювання лляної олії кремнійорганічною сполукою, що містить винільну групу (вінілтриметоксисилан), дозволило синтезувати продукти, що характеризуються високою стабільністю при зберіганні. Просочення деревини цими отриманими продуктами сприяло підвищенню стійкості захищеної деревини до впливу води порівняно з незахищеною деревиною або деревиною, захищеною полімеризованою олією, яка не була піддана реакції силілювання. Захищена деревина характеризується нижчим рівнем поглинання води як у рідині, так і в парах, що містяться у вологому повітрі. Ця властивість одразу призвела до

підвищення стійкості деревини до Basidiomycota. Втрата маси *Pinus sylvestris* L. (соснова деревина) під впливом *Coniophora puteana* становила приблизно 3%. Цей параметр не покращився, коли деревину піддали процесу миття (втрата маси приблизно 3,6%). Але не встановлена стійкістю даних покриттів до атмосферних коливань при застосуванні в зовнішніх умовах.

У статті [8] сказано, що тунгова олія зазвичай використовується для захисту покриття дерев'яних виробів, часто привертаючи увагу своїм зовнішнім виглядом, антимікробними властивостями та покриттям, стійким до комах. Однак його погані механічні властивості та погана стійкість до атмосферних впливів виникають через надмірне самозшивання надлишкових кон'югованих подвійних зв'язків і молекулярних ланцюгів, що призводить до слабкого зморщування плівки. Таким чином, у цьому дослідженні введено натуральний каучук за допомогою реакції Дільса-Альдера для споживання залишкових подвійних зв'язків у тунговій олії, що призводить до створення композитних покриттів тунгової олії/натурального каучуку (NRTO) з чудовими механічними властивостями та стійкістю до погодних умов. Результати показують, що NRTO демонструє відмінні механічні властивості, включаючи високе подовження (32%) і міцну адгезію (4,55 МПа). Крім того, NRTO демонструє видатну кислотостійкість і стійкість до старіння під впливом УФ-променів. Зважаючи на численні переваги, плівка NRTO є багатообіцяючим кандидатом для значного захисту дерев'яних поверхонь у складних умовах. Однак не вказана екологічність покриття.

Дослідження [9] було спрямоване на покращення таких властивостей деревини, як щільність у приміщенні та на повітрі, а також водопоглинання (WA) від фізичних властивостей. Нові епоксидно-амінні (ЕП) покриття на біологічній основі віддавали перевагу над матеріалом, а їхні нанокompозитні похідні покриття, включаючи фулерени, графен і вуглецеві нанотрубки, були отримані за допомогою реакції епоксидно-функціоналізованого тунгу. Зразки, покриті епоксидними нанокompозитами, показали більшу водостійкість, ніж контрольна група. При дослідженні поверхневих властивостей зразків з епоксидним нанокompозитним покриттям після атмосферних впливів спостерігалася більш стабільна зміна кольору порівняно з контрольною групою. Крім того, у той час як глина зразків з епоксидним нанокompозитним покриттям зменшився більше, ніж у контрольній групі, їх шорсткість збільшилася більше. Міцність на стиск зразків з епоксидним покриттям дещо збільшилася порівняно з контрольною групою, але статистичної різниці виявлено не було.

Робота [10] зосереджена на двовимірному (2-D) гігротермічному моделюванні поведінки змочування та висихання перехресно-ламінованої деревини (CLT) (без будь-якого захисту) та валідації за допомогою вимірювань під час польового випробування, наголошуючи на впливі властивостей матеріалу. Робота показує, що функція накопичення вологи вище RH 95%, яка включає вміст насиченої води, про яку повідомляється в різній літературі, має значний вплив на результати гігротермічного моделювання; тим часом призначення різних коефіцієнтів водопоглинання для поперечного та поздовжнього напрямків деревини значно підвищує точність гігротермічної моделі, створеної для імітації проникнення дощової води в панель CLT. У цій статті надано рекомендації щодо того, як правильно моделювати панелі CLT, які піддаються впливу дощової води, яка часто виникає під час будівництва.

У статті [11] сказано, що полідиметилсилоксан (PDMS) і гідрофобні наночастинки діоксиду кремнію (HSNP) були застосовані для покриття дерев'яних поверхонь, щоб зменшити виділення бору з деревини, обробленої DOT (тетраграт динатрію октаборату). Потім зразки з модифікованою поверхнею піддавали 14-денному курсу вилугування з подальшим випробуванням на стійкість до цвілі, водопоглинання, стабільність розмірів і кут контакту з водою в лабораторних умовах. Згідно з тестами на вилугування, зразки, оброблені DOT і PDMS, продемонстрували найвищу ефективність проти плісняви навіть після тестів на вилугування; однак повний захист не був досягнутий як у зразках, оброблених DOT + HSNP, так і в зразках, оброблених лише DOT. Зразки деревини, вкриті PDMS та HSNPs, показали контактні кути води 114° та 172° відповідно. Порівняння хімічних, змочувальних і структурних характеристик модифікованих зразків деревини до і після вилугування показало подібну поведінку. Проте для кращого розуміння механізмів взаємодії між PDMS/HSNP і дерев'яними поверхнями необхідні більш детальні дослідження.

У роботі [12] був використаний простий підхід модифікації просочення для створення супергідрофобних покриттів із силіконової смоли на дерев'яних поверхнях. Коротко кажучи, використовуючи гідрофторсиліконову олію (HFSO), тетраметилтетравінілцикло-тетрасилоксан (V4) і гідрофобний SiO_2 з промислового виробництва як сировину, супергідрофобні зразки деревини (кут контакту з водою $\sim 160,8^\circ$, кут ковзання $\sim 3,6^\circ$) можна отримати, просто занурюючи деревини в розчинах модифікатора HFSO/V4/ SiO_2 . У результаті супергідрофобне покриття з силіконової смоли, нанесене на поверхню деревини, все ще має хороші водовідштовхувальні властивості після дотику пальцями, відшарування стрічки та стирання наждачним папером. Коли масове співвідношення HFSO до V4 становить 2:1, водопоглинання отриманої деревини після замочування у воді протягом 24 годин становить лише 29,2%. Крім того, отримана супергідрофобна деревина демонструє відмінні властивості проти обростання. Проте як метод модифікації, просочення може бути застосований для захисту целюлозних субстратів.

У дослідженні [13] на деревину ясеня та модрини наносили проникаючі та плівкоутворюючі покриття, а потім піддавали впливу рідкої води та водяної пари. Під час впливу рідкої води та водяної пари вимірювали масу зразків і вміст вологи в зразках. Результати показали, що проникаючі покриття забезпечували певний захист від поглинання рідкої води, але дуже слабкий захист від водяної пари, особливо на деревині ясеня. Крім того, ефективність захисту від вологи швидко знижується під час впливу високої вологості та залежно від породи деревини та систем покриття, однак не визначені умови використання.

У роботі [14] нове супергідрофобне покриття з вулканізованої силіконової гуми при кімнатній температурі (RTVSR) було нанесено на поверхню деревини за допомогою наночастинок SiO_2 . Супергідрофобне покриття RTVSR/ SiO_2 складалося з полі(метилгідроген)силоксану (PMHS), полідиметилсилоксану з вініловими кінцями (Vi-PDMS) і наночастинок SiO_2 . Детально наведено механізм утворення супергідрофобного покриття RTVSR/ SiO_2 . У результаті модифікована деревина мала контактний кут з водою (WCA) $164,4^\circ$ і кут ковзання (SA) 5° . Крім того, супергідрофобне покриття на поверхні деревини має чудову стійкість як до високих, так і до низьких температур, ультрафіолетового випромінювання, впливу води та має властивість самоочищення. Рівень водопоглинання знизився з 45,9%

до 28,1% після нанесення на деревину супергідрофобного покриття RTVSR/SiO₂. Супергідрофобне покриття RTVSR/SiO₂ може бути застосовано для захисту гідроксилвмісних субстратів, особливо деревини, у зовнішньому середовищі. Але, залишилися невирішеними питання, які пов'язані з стійкістю покриттів до атмосферних коливань при застосуванні в зовнішніх умовах.

Таким чином, встановлено, що вогнезахисні покриття здатні утворювати на поверхні деревини захисний теплоізоляційний шар від впливу вогню при її експлуатації, але не визначені параметри, які забезпечують ефективність вогнезахисту деревини водовідштовхувальною сумішшю до дії полум'я пожежі. Тому дослідження параметрів вогнезахисту деревини і впливу покриттів на вогнезахист обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

Постановка завдання. Метою даної роботи є встановлення параметрів пригнічення процесу поглинання води деревиною при захисті вогнезахисною деревини водовідштовхувальною сумішшю. Це дає можливість обґрунтувати застосування гідрофобованої деревини на об'єктах різного призначення.

Матеріали і методи досліджень. Для побудови математичної моделі процесу вимивання введемо просторову координату x , яка співпадає з вектором внутрішньої нормалі до поверхні зразка (рис. 1). Вважаємо, що матеріали оболонки і зразка однорідні, а капілярно-пористий матеріал зразка просочений сольовим розчином антипірену рівномірно. За таких припущень задача стає симетричною відносно геометричної осі зразка.

Механізм вимивання антипірену або антисептика з деревини у період експлуатації є таким: при зволоженні деревини кристали захисних речовин розчиняються у вологому середовищі і по макрокапілярах (судини і трахеїди) уздовж чи поперек волокон, а також через мікрокапіляри, поступово, за рахунок різних факторів масопереносу переміщуються на поверхню деревини, де після випаровування води питома вага утворених кристалів зменшується під дією зовнішніх сил.

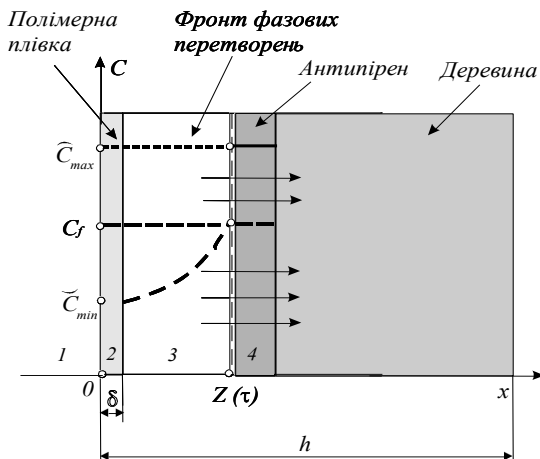


Рис. 1. Розрахунково-аналітична схема процесу вимивання антипірену з деревини

Основна частина. Розглянемо чотири області розрахунково-аналітичної схеми процесу вимивання антипірену з деревини: 1 – зовнішнє середовище, $x < 0$; 2 – оболонка, $0 \leq x \leq \delta$ (δ – товщина оболонки, м); 3 – область зразка з розчиненою речовиною, $\delta < x \leq Z(\tau)$ (Z – координата фронту фазового перетворення, м); 4 – матеріал зразка з твердою речовиною, $\delta \leq x \leq \delta + h$ (h – половина товщини зразка, м).

Диференціальне рівняння дифузії, яке описує процес вимивання, має такий вигляд:

$$\frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - \frac{1}{D_i} \frac{\partial C_i}{\partial \tau} = 0, \quad (1)$$

де C_i – концентрація речовини в i -ої області, кг/м^3 ;

D_i – коефіцієнт дифузії речовини в i -ої області, $\text{м}^2/\text{с}$;

τ – час перебування зразка в середовищі після просочення, с.

Для розв'язання рівняння (1) сформулюємо початкові і граничні умови.

У початковий момент часу ($\tau = 0$) вміст просочувальної речовини в зовнішньому середовищі й на поверхні покриття зразка мінімальний \check{C}_{min} , а в матеріалі зразка – максимальний \hat{C}_{max} , фронт розчинення відсутній, а тому в аналітичному вигляді початкові та граничні умови можна записати таким чином:

$$Z(0) = 0; \quad C_i(x, 0) = \check{C}_{min}, \quad i = 1 \dots 3, \quad (2)$$

$$C_i(x, 0) = \hat{C}_{max} \quad \text{або} \quad C(x, 0) = \begin{cases} \check{C}_{min}, & x \leq \delta; \\ \hat{C}_{max}, & x > \delta, \end{cases} \quad (3)$$

Крім того, на границі оболонки і зовнішнього середовища задається гранична умова третього роду [10]:

$$D_2 \left. \frac{\partial C_2}{\partial x} \right|_{x=0} = \beta(C_2 - C_1)|_{x=0}, \quad (4)$$

де β – коефіцієнт масообміну між поверхнею оболонки і зовнішнім середовищем, м/с.

Враховуючи неперервність полів концентрації і дифузійних потоків речовини на границі оболонки та матеріалу зразка концентрації речовини і масові потоки речовини збігаються (умови четвертого роду):

$$C_2(\delta, \tau) = C_3(\delta, \tau); \quad D_2 \left. \frac{\partial C_2}{\partial x} \right|_{x=\delta} = D_3 \left. \frac{\partial C_3}{\partial x} \right|_{x=\delta}. \quad (5)$$

Аналогічно на фронті розчинення:

$$C_3[Z(\tau), \tau] = C_4[Z(\tau), \tau] = C_f. \quad (6)$$

Аналітичний розв'язок рівняння (1) з початковими і граничними умовами (2) – (6) можливий лише в окремих випадках. Значимо, що такий розв'язок представляється в інтегральному вигляді або нескінченними рядами, що вимагає проведення великого обсягу обчислень. Тому для розв'язання задачі (1) – (6) розроблено комп'ютерну програму на базі числових методів з явною схемою. Для цього систему рівнянь (1) – (6) подано у безрозмірних змінних:

$$\bar{x} = \frac{x}{2h}; \quad F_{0_i} = \frac{D_i \tau}{x}; \quad \bar{Z} = \frac{Z}{2h}; \quad \bar{C} = \frac{C}{\hat{C}_{max}}, \quad (7)$$

де F_0 – дифузійне число Фур'є.

У результаті вихідне рівняння (1) перетворюється на систему алгебраїчних рівнянь і сіткові значення безрозмірних залежних змінних стали функціями сіткових значень чисел Фур'є $F = \Delta F_0 / \Delta \bar{x}^2$ і Нуссельта $N = D_2 / (\beta \Delta \bar{x})$.

В табл. 1 представлено один із варіантів моделювання процесу зміни вмісту вогнезахисних речовин у зразку деревини з полімерною оболонкою антисептика. У цьому випадку початковий вміст антипірену на поверхні оболонки антисептика було прийнято рівним 20% від його початкового вмісту в деревині. Подібні варіанти розрахунків виконувалися для зразків з різною товщиною оболонки (аж до її відсутності) і при різних значеннях коефіцієнтів дифузії в оболонці і деревині.

Таблиця 1

Розподіл концентрації антипірену в окремих шарах зразка

Перетин зразка	Ітерації						
	10	20	30	40	50	60	70
На поверхні оболонки	0,184	0,328	0,388	0,420	0,442	0,444	0,404
В середині оболонки	0,350	0,429	0,455	0,468	0,476	0,468	0,421
На глибині чверті товщини зразка	0,561	0,535	0,523	0,516	0,511	0,491	0,433
На глибині половини товщини зразка	1,000	0,987	0,924	0,845	0,757	0,652	0,545

Як видно з табл. 1, на початку експлуатації модифікованої деревини, за постійної інтенсивності дифузійного виносу вогнезахисної речовини – швидкість просування фронту фазових перетворень знижується, що відповідає повному розчиненню просочувального засобу у зразку, після чого починається процес поступового його виходу в навколишнє середовище.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, запропонована математична модель і метод її числової реалізації дають можливість визначати параметри процесу висолювання вогнезахисних речовин з деревини через оболонку в оточуюче середовище залежно від фізико-хімічних властивостей композиції, її первісного розподілу у модифікованій деревині, а також від умов навколишнього середовища.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення різних видів наповнювачів, їх властивостей і впливу на вогнезахисну ефективність деревини у вогнезахисних органо-мінеральних покриттях.

Список літератури:

1. 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.
2. Цапко Ю.В., Ломага В.В., Цапко О.Ю. Вогнезахист деревини органо-неорганічними композиціями: монографія. Київ: ФОП Ямчинський О.В. 2023. 160 с.

3. Núñez-Retana V.D., González-Tagle M.A., González-Rodríguez H., Yáñez-Díaz M.I., Himmelsbach W. Prominent wood protection methods. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 2024. Vol. 15 (84). P. 155-175. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i84.1441>
4. Atanasova K., Angelski D. Water Permeability and Adhesion Strength of Bio-based Coating Applied on Wood. *Drvna Industrija*. 2024. Vol. 75 (1). P. 43-48. <https://doi.org/10.5552/drvind.2024.0118>
5. Setswalo K., Oladijo O.P., Namoshe M., et al. The Water Absorption and Thermal Properties of Green *Pterocarpus Angolensis* (Mukwa) – Polylactide Composites. *Journal of Natural Fibers*. 2023. Vol. 20 (1). P. 12-29. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2124217>
6. Iejavs J., Ruļuks O., Laiveniece L., Liše S., Spulle U. The efficiency of different wood coatings against water surface absorption. *Rural Sustainability Research*. 2021. Vol. 45 (340). P. 28-37. DOI: 10.2478/plua-2021-0005
7. Perdoch W., Depczyńska E., Tomkowiak K., Kurczak M., Mazela B. The Impact of Vinylotrimethoxysilane-modified Linseed Oil on Selected Properties of Impregnated Wood. *Forests*. 2022, 13(8), 1265. <https://doi.org/10.3390/f13081265>.
8. Zhang Z., Ye D., Li Y., Yang Y., Liao Y. Enhancing weatherability and mechanical properties of tung oil wood finishes through natural rubber modification via the Diels-Alder reaction. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024, 272(2), 132602. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.132602
9. Altay Ç., Babahan-Bircan İ., Toker H. et al. Physical, mechanical, and surface properties of Oriental beech coated with bio-based epoxide nano-coatings after weathering. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2024, 21, 2023-2034.
10. Wang L., Ge H., Wang J. Model validation and 2-D hygrothermal simulations of wetting and drying behavior of cross-laminated timber. *Journal of Building Physics*. 2023. Vol. 46 (6). P. 737-761. DOI: 10.1177/17442591231165987
11. Soytürk E.E., Kartal S.N., Onses M.S., Celik N. Preliminary evaluation of polydimethylsiloxane and hydrophobic silica nanoparticles to improve water repellency and boron leachability in wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2023. Vol. 81 (1). P. 89-98. DOI: 10.1007/s00107-022-01883-7
12. Ding Z., Lin W., Yang W., Chen H., Zhang X. A Silicone Resin Coating with Water-Repellency and Anti-Fouling Properties for Wood Protection. *Polymers*. 2022. Vol. 14 (15):3062. DOI: 10.3390/polym14153062.
13. Miklečić J., Jirouš-Rajković V. Effectiveness of finishes in protecting wood from liquid water and water vapor. *Journal of Building Engineering*. 2021, 43, 102621. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102621
14. Yue D., Lin S., Cao M., Lin W., Zhang X. Fabrication of transparent and durable superhydrophobic polysiloxane / SiO₂ coating on the wood surface. *Cellulose*. 2021. Vol. 28 (6). P. 3745-3758. DOI: 10.1007/s10570-021-03758-1

References:

1. Tsapko, Yu., Tsapko, A., & Bondarenko, O. (2019). Establishment of heat-exchange process regularities at inflammation of reed samples. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*, 1, 10 (97), 36-42. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156644.

2. Tsapko, Yu.V., Lomaga, V.V., & Tsapko, O.Yu. (2023). Vognezakhyst derevyny organo-neorganichnymy kompozytsiyamy: monografiya. Kyiv: FOP Yamchynskii O.V.
3. Núñez-Retana, V.D., González-Tagle, M.A., González-Rodríguez, H., Yáñez-Díaz, M.I., Himmelsbach, W. (2024). Prominent wood protection methods. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15 (84), 155-175. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i84.1441>
4. Angelski, D., & Atanasova, K. (2024). Water Permeability and Adhesion Strength of Bio-based Coating Applied on Wood. *Drvna Industrija*, 75 (1), 43-48. <https://doi.org/10.5552/drvind.2024.0118>
5. Setswalo, K., Oladijo, O.P., Namoshe, M., Siengchin, S., Srisuk, R. (2023). The Water Absorption and Thermal Properties of Green Pterocarpus Angolensis (Mukwa)-Poly lactide Composites. *Journal of Natural Fibers*, Vol. 20 (1), 12-29. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2124217>
6. Iejavs, J., Ruļuks, O., Laiveniece, L., Liše, S., Spulle, U. (2021). The efficiency of different wood coatings against water surface absorption. *Rural Sustainability Research*, 45 (340), 28-37. DOI: 10.2478/plua-2021-0005
7. Perdoch, W., Depczyńska, E., Tomkowiak, K., Kurczak, M., Mazela, B. (2022). The Impact of Vinyltrimethoxysilane-modified Linseed Oil on Selected Properties of Impregnated Wood. *Forests*, 13 (8), 1265. <https://doi.org/10.3390/f13081265>
8. Zhang, Z., Ye, D., Li, Y., Yang, Y., Liao, Y. (2024). Enhancing weatherability and mechanical properties of tung oil wood finishes through natural rubber modification via the Diels-Alder reaction. *International Journal of Biological Macromolecules*, 272, 132602. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.132602
9. Altay, Ç., Babahan-Bircan, İ., Toker, H. et al. (2024). Physical, mechanical, and surface properties of Oriental beech coated with bio-based epoxide nano-coatings after weathering. *Journal of Coatings Technology and Research*, 21, 2023-2034.
10. Wang, L., Ge, H., Wang, J. (2023). Model validation and 2-D hygrothermal simulations of wetting and drying behavior of cross-laminated timber. *Journal of Building Physics*, 46 (6), 737-761. DOI: 10.1177/17442591231165987
11. Soytürk, E.E., Kartal, S.N., Onses, M.S., Celik, N. (2023). Preliminary evaluation of polydimethylsiloxane and hydrophobic silica nanoparticles to improve water repellency and boron leachability in wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 81 (1), 89-98. DOI: 10.1007/s00107-022-01883-7
12. Ding, Z., Lin, W., Yang, W., Chen, H., Zhang, X. (2022). A Silicone Resin Coating with Water-Repellency and Anti-Fouling Properties for Wood Protection. *Polymers*, 14 (15), 3062. DOI: 10.3390/polym14153062.
13. Miklečić, J., Jirouš-Rajković, V. (2021). Effectiveness of finishes in protecting wood from liquid water and water vapor. *Journal of Building Engineering*, 43, 102621. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102621
14. Yue, D., Lin, S., Cao, M., Lin, W., Zhang, X. (2021). Fabrication of transparent and durable superhydrophobic polysiloxane / SiO₂ coating on the wood surface. *Cellulose*, 28 (6), 3745-3758. DOI: 10.1007/s10570-021-03758-1

Yuriy TSAPKO, Aleksii TSAPKO, Olga BONDARENKO, Natalia LIALINA, Dmitriy ANOPKO, Alina YUSHCHENKO

Study of the effect of organic shell on the leaching of protective compositions from wood protected from fire

Today, there are various ways to fireproof wood. When wood is moistened, flame-retardants dissolve in a humid environment and gradually wash out to the surface, after which the fire protection effect decreases over time. Acid-based products do not have a significant leaching problem due to changes in wood moisture, but by penetrating deep into the wood structure and interacting with cellulose, they reduce strength characteristics. Another method is to apply a coating based on organic or inorganic binders to the wood surface. Products based on organic binders have increased smoke generation and toxic substances, so their use is dangerous. Therefore, an analysis of protective materials for wooden building structures was carried out and the need to develop reliable methods for studying the leaching of flame-retardants necessary for the creation of new types of fire protection materials was established. There is a need to determine the conditions for the formation of a barrier to the leaching of flame-retardants and to establish a mechanism for inhibiting the transfer of moisture to the material. In this regard, a mathematical model of the process of leaching protective substances from wood after its impregnation with flame-retardants when using a polymeric shell made of organic material as a coating was developed, which allows us to evaluate the effectiveness of the polymeric shell by the amount of water absorbed. The results of calculating the weight gain of the sample during exposure to water indicate an ambiguous effect of the nature of the protection on water absorption. In particular, this implies the availability of data sufficient for the qualitative process of inhibiting moisture diffusion and identifying, on its basis, the time point from which the decrease in coating efficiency begins. Thus, there is reason to believe that it is possible to regulate the processes of wood protection in a targeted manner by using polymer coatings that can form a protective layer on the surface of the material that inhibits the rate of water absorption.

Keywords: wood, fire protection, organic shell, flame retardant, wood modification, leaching.