

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-76>

УДК 614.841

БАЛАНЮК ВОЛОДИМИР

Львівський державний університет
безпеки життєдіяльності

<https://orcid.org/0000-0003-0853-4229>

e-mail: Bagr9111@Gmail.com

ПИКУС ВІКТОР

ТзОВ Євростандарт

<https://orcid.org/0000-0002-8850-9068>

e-mail: v.pykus@Gmail.com

МЕХАНІЗМ ТА МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРОБЛЕННЯ ПОЛІМЕРНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ АМІНОФОРМАЛЬДЕГІДНИХ СМОЛ, ДЛЯ ВОГНЕЗАХИСТУ ДЕРЕВИНИ

У статті розглядаються механізми розвитку горіння деревних матеріалів та шляхи їх ефективного гальмування, що є критично важливим для підвищення пожежної та екологічної безпеки будівельних конструкцій. Проаналізовано фізико-хімічні процеси, які відбуваються при взаємодії деревини з вогнем, включно з термічним розкладанням целюлози, утворенням вільних радикалів та продуктів горіння.

Ключові слова: вогнезахист деревини, антипірени, горіння деревних матеріалів, рецептури антипіренів, механізми гальмування горіння, екологічні антипірени.

BALANYUK VOLODYMYR

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

PIKUS VICTOR

Eurostandard LLC

MECHANISM AND METHODOLOGY OF DEVELOPMENT OF POLYMER SYSTEM BASED ON AMINOFORMALDEHYDE RESINS FOR FIRE PROTECTION OF WOOD

The article examines the mechanisms of combustion development in wood-based materials and the methods of effectively inhibiting this process, which are critically important for enhancing the fire safety and environmental security of building structures. The study analyzes the physico-chemical processes that occur during the interaction of wood with fire, including the thermal decomposition of cellulose, the formation of free radicals, and combustion products. Particular attention is given to factors influencing the rate and intensity of burning, such as moisture content, porosity, and wood density.

The paper also reviews the main approaches to improving the efficiency of fire retardants for wood materials and slowing down combustion at different stages. Formulations aimed at ensuring maximum resistance of wood to ignition without compromising its mechanical properties are considered. The effectiveness and mechanisms of action of commonly used fire retardants are analyzed from the perspective of both fire safety and environmental protection. Based on the analysis of literature data and experimental studies, practical recommendations are formulated regarding the selection of compositions and treatment technologies to achieve high fire-protection efficiency.

The proposed experimental composition combines the functions of a thermosetting impregnating polymer, a fire-retardant additive, and a biopolymer modifier, making it a promising basis for the development of effective fire-protective coatings and impregnations for wood.

The study presents the mechanism and methodology for designing an environmentally safe polymer system based on amino-formaldehyde resins modified with orthophosphoric acid and starch. During polycondensation, a spatially cross-linked phosphorus-nitrogen-containing matrix is formed, which, under thermal exposure, generates a thermally stable char layer that insulates the wood from flame and high temperatures. The combination of acid catalysis, biopolymer modification, and nitrogen-containing fire retardants ensures the potential of this composition for creating effective and environmentally safe fire-protective impregnations and coatings for wood.

Keywords: wood fire protection, flame retardants, combustion of wood materials, flame retardant formulations, combustion inhibition mechanisms.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.12.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.01.2026

Опубліковано / Published 29.01.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Баланюк Володимир, Пікус Віктор

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Одним із основних застосувань деревини та деревних матеріалів є будівельна промисловість. Деревина використовується не лише для будівництва мостів, зовнішнього та внутрішнього оздоблення, але й у конструкційних та неконструкційних системах як у житлових, так і в нежитлових будівлях як екологічно чистий безпечний для довкілля матеріал. Одним із ключових викликів використання деревини є її низька вогнестійкість [1].

Деревина складається з целюлози, геміцелюлози, лігніну, ексудатів та екстрактивних речовин. Згідно з дослідженнями, приблизно при 100 °C вода, поглинена будь-яким зразком деревини, починає випаровуватися, після чого відбувається процес термічного розм'якшення між 180 та приблизно 300 °C, а згодом – термічне руйнування окремих складових [2].

Для підвищення вогнестійкості та відповідно безпечності для довкілля деревини та дотримання вимог безпеки було впроваджено кілька заходів, зокрема обробку антипіренами. Вони можуть вводитися під час виготовлення деревних матеріалів, застосовуватися після виробництва за допомогою високотискового просочування, наноситися як поверхневі покриття. Ці речовини контролюють піроліз, займання, виділення тепла та поширення полум'я деревини [3]. Варто зазначити, що сучасний попит на деревину не відповідає

розвитку антипіренів для підвищення її вогнестійкості. Традиційні антипірени, такі як сполуки бору та фосфору, які негативно впливають на розмірну стабільність і гігроскопічні властивості деревини, досі використовуються. Антипірени для деревини повинні не лише покращувати вогнестійкі властивості матеріалу, а й залишатися відносно дешевими та зручними у використанні. Тому потрібно досліджувати нові і ефективні рецептури засобів вогнезахисту.

Останні дослідження у сфері вогнезахисту деревини зосереджені на розробці нових антипіренів та методів обробки, що підвищують стійкість матеріалу до займання і поширення полум'я. Екологічні покриття показують ефективність у гальмуванні горіння, зменшенні димоутворення та збереженні механічних властивостей деревини. Комбіновані методи, що поєднують антипірени з біозахисними засобами, забезпечують додаткову стійкість до високих температур та зберігають форму і стійкість дерева після обробки.

Разом із тим, дослідження вказують на низку проблем, що залишаються відкритими. Більшість експериментальних даних отримані в лабораторних умовах і потребують перевірки за реальних пожежних сценаріїв. Крім того, деякі антипірени можуть впливати на довговічність і експлуатаційні характеристики деревини, а комплексні покриття потребують оптимізації для забезпечення одночасної ефективності, екологічності та практичної придатності у виробництві та будівництві.

Аналіз досліджень та публікацій

Вогнезахист деревини як один із ключових напрямів підвищення пожежної та екологічної безпеки будівельних конструкцій посідає важливе місце у сучасних наукових дослідженнях, з огляду на широке використання деревних матеріалів у житловому та промисловому будівництві. У працях, присвячених вивченню процесів горіння деревини, вона розглядається як складна багатокомпонентна система органічної природи, поведінка якої при тепловому впливі визначається взаємопов'язаними фізичними та хімічними процесами, зокрема термічним розкладом целюлози, геміцелюлози та лігніну, утворенням летких горючих продуктів і формуванням вуглецевого залишку. Дослідження показують, що розвиток горіння деревини має багатостадійний характер і супроводжується інтенсивним тепло- та масообміном, що суттєво ускладнює прогнозування пожежної поведінки матеріалу та вимагає застосування спеціалізованих засобів гальмування горіння.

У науковій літературі підкреслюється, що на відміну від неорганічних будівельних матеріалів, деревина характеризується високою горючістю та здатністю до швидкого поширення полум'я, а тому її використання без відповідного вогнезахисту створює підвищені ризики для конструктивної цілісності будівель і безпеки людей. З цієї причини значна кількість досліджень присвячена розробці та вдосконаленню антипіренів, які здатні впливати на ключові стадії процесу горіння, знижуючи швидкість піролізу, тепловиділення та утворення горючих газів. Встановлено, що найбільш ефективними є системи, які поєднують декілька механізмів дії, зокрема флегматизацію газової фази, інгібування ланцюгових реакцій окиснення та формування теплоізолюючого шару на поверхні деревини.

Окремий науковий інтерес становлять фосфор- та азотовмісні антипірени, дія яких пов'язана зі зміною механізму термічного розкладання деревного комплексу та каталізом дегідратаційних процесів, що сприяє збільшенню виходу вуглистого залишку і зменшенню кількості горючих летких продуктів. Разом із тим дослідження наголошують, що традиційні неорганічні антипірени часто мають низку недоліків, зокрема негативний вплив на гігроскопічні та механічні властивості деревини, обмежену стійкість до вимивання та потенційні екологічні ризики. У зв'язку з цим у сучасних роботах все більшої уваги надається розробці полімерно-реакційних систем, здатних одночасно виконувати функції просочувального матеріалу, антипіренової добавки та структуроутворювального компонента.

У рамках таких досліджень перспективним напрямом вважається використання аміноформальдегідних смол, модифікованих фосфорвмісними та біополімерними компонентами, які забезпечують формування просторово зшитої фосфорно-азотовмісної матриці. При термічному впливі такі системи здатні переходити у коксований шар з високою термостійкістю, що ефективно ізолює деревину від дії полум'я та високих температур. Наукові публікації також підкреслюють важливість урахування технологічних аспектів нанесення вогнезахисних композицій, їх сумісності з деревиною та здатності забезпечувати довготривалий захист без погіршення експлуатаційних характеристик матеріалу. Таким чином, аналіз сучасних досліджень свідчить про необхідність подальшого розвитку методологічних підходів до створення екологічно безпечних, ресурсоефективних та високоефективних полімерних систем вогнезахисту деревини, що поєднують хімічну активність, структурну стабільність і технологічну доцільність застосування.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є встановлення механізму та розробка методології розроблення полімерної системи на основі аміноформальдегідних смол для нового складу вогнезахисного покриття з підвищеною ефективністю гальмування горіння та збереженням механічних властивостей матеріалу, для вогнезахисту деревини.

Виклад основного матеріалу

Горіння дерева та целюлозовмісних матеріалів є складним фізико-хімічним процесом, що включає термічний розклад, виділення летких речовин, їх займання та подальше поширення полум'я. Завдяки високій органічній природі та пористій структурі деревина належить до легкозаймистих матеріалів, а тому потребує особливої уваги під час оцінки пожежної безпеки конструкцій. Розуміння механізмів розвитку горіння дає змогу визначити ключові фактори, які впливають на інтенсивність тепловиділення, швидкість поширення

вогню та стійкість матеріалу до високих температур. Це, у свою чергу, відкриває можливості для застосування результативних методів гальмування пожежонебезпечних процесів та розробки ефективних рецептур вогнезахисних засобів.

Рослинні матеріали по відношенню до вологи відносяться до капілярно-пористих колоїдних тіл (стіни капілярів еластичні і при поглинанні вологи набухають). Їх максимальна гігроскопічна вогкість знаходиться в межах 26 - 40 %. Для деревини всіх порід точка насичення волокон відповідає вогкості приблизно 30 % [3]. Процес горіння дерева поетапно описують автори статті у роботі [5]. Гіпотетично вони протікають в такій послідовності: під безпосереднім впливом теплового потоку відбувається інтенсивний прогрів і сушка деревини з високою міграцією газів, випаровуванням вологи під впливом внутрішнього надлишкового тиску пари і градієнта температури; акумулювання тепла деревиною призводить до розриву зв'язків і розкладання матеріалу з утворенням летючих речовин газоповітряної суміші; займання, а потім горіння деревини з утворенням полум'я і рухомої зони горіння.

Так автори [5] проводили експериментальні дослідження у реакційній камері. Автори стверджують, що тільки в початковий період часу відсутній процес горіння. Втрата маси за рахунок обуглювання рівне нулю, втрата маси за рахунок горіння становить 0,5-1,5% і відображає не вигорілу частину деревини, а частину вологи, яка випарувалася. З підвищенням температури до 210 °C і вище від джерела вогню спалахують горючі леткі речовини (CH₄, H₂, CO), які виділилися і процес переходить в полум'яне гомогенне горіння газової фази з виділенням тепла. З підвищенням температури до 260-360 °C виникає стійке горіння деревини. Деревина в залежності від умов може горіти як в режимі тління, так і в режимі полум'яного горіння. Але в основному, мабуть, переважає змішаний процес горіння, який характеризується високою інтенсивністю. На 40-50 с швидкість горіння досягає 12,1% мас. за хв.[5]. Це веде до значної втрати маси за рахунок вигорання і обуглювання (тг=8,5%; тоб=3,6%) і підйому температури. Через 2,5-3 хв встановлюється метастабільний процес горіння (швидкість втрати маси 15,0-15,1% / хв), а температура досягає 900- 925 °C [5]. До цього часу втрата маси складає m=60%, тобто згорає велика частина деревини. На 5-6 хв і до закінчення горіння спостерігається зниження швидкості вигорання і обуглювання деревини і температури в камері за рахунок зменшення горючих частини деревини. Як стверджують автори [5], з отриманих даних в процесі горіння дерев'яних зразків без покриття в реакційній камері спостерігається така закономірність: втрата маси за рахунок вигорання (тг) більш значима, ніж за рахунок обуглювання (тоб), їх співвідношення становить тг/тоб=2,1-2,4 і відображає співвідношення відкритого і прихованого горіння в гомогенно-гетерогенному процесі горіння. Втрата маси за рахунок вигорання (тг) становить до 68% маси за рахунок обуглювання (тоб) - до 32%. Переважання того чи іншого режиму горіння обумовлено, перш за все, кількістю що надходить до горючих матеріалів кисню повітря і його співвідношенням з горючою фазою.

Таким чином беручи до уваги аналіз результатів робіт авторів наведених вище, можемо зазначити, що найбільш ефективним буде дія вогнезахисного складу який буде створювати на поверхні щільний шар антипірену, що буде забезпечувати обмеження дії на поверхню деревини атмосферних чинників, ультрафіолетового та інших видів випромінювання, та впливу агресивних середовищ.

Відомо [4], що для повного згорання 1 кг деревини вогкостю 7 % потрібно 5,4 кг або 4,18 м³ повітря, в результаті горіння виділяється 4,4...4,9 м³ диму, утворюються вуглекислий газ, вода і азот, при неповному згоранні — додатково оксид вуглецю і вуглець (сажа).

Таким чином, інтенсивне фізичне руйнування починається на поверхні обугленої в процесі розкладання деревини з моменту появи маленьких тріщин, розташованих упоперек волокон. З тріщин летючі продукти, утворюється у внутрішніх шарах деревини, виходять на поверхню. З часом ступінь обуглювання, частота тріщин, їх глибина і ширина збільшується, кількість зростає, а дерев'яні конструкції розщеплюються і втрачають несучу здатність. Проте відомо, що швидкість розпаду деревини знижується з присутністю в деревному комплексі антипіренів і залежить від їх якості. В роботі [6] показано, що більш ніж в двічі можна збільшити вихід вуглистою залишку шляхом обробки сосни фосфатами і боратами, а вихід летких продуктів зміниться за рахунок зменшення горючої смоли, а значить зменшиться теплота згорання летких горючих продуктів і кількість тепла, доставляється на поверхню деревини. В результаті, для підтримки горіння потрібно буде більш потужний тепловий потік, а вугільний шар у міру його накопичення служитиме захистом для внутрішніх шарів деревини.

З висловленого витікає, що первинні ефекти гальмування (ендотермічні ефекти) запалювання деревних матеріалів повинні виявлятися в інтервалі температур від 200 до 250 °C і мають здатність знижувати вихід палих складових при розкладанні деревини, уповільнювати процеси прогрівання деревини в глибину і не допускати утворення глибоких тріщин на її поверхні [5,6].

При горінні деревини температурний режим пожежі залежить від горючого завантаження і досягає максимальних значень: 800.. .830 °C на 20-й хв пожежі при питомому завантаженні 25 кг/м²; 830.. .850 °C на 35-й хв пожежі при питомому завантаженні 50 кг/м²; 950...1000 °C на 70-й хв пожежі при питомому завантаженні 100 кг/м² [6]. Ці температурні тимчасові характеристики співпадають із стандартним графіком розвитку пожежі. Залежно від температури при розкладанні деревини змінюються кількість і якість: при 200 °C випаровується 75 % H₂O; і 25 % H₂O (на 100 кг деревини приблизно 0,4 м³ газів); при 300 °C виділяються 5,6 м³ газів складу CO₂ і CH₄; при 400 °C, 500 °C, 600 °C і 700 °C виділяються CO, CH₄ і H₂ в кількостях 9,5 м³, 12,8 м³, 14,3 м³ і 16 м³ відповідно [6].

З приведених досліджень [4,5,6] витікає, що середня швидкість при горінні деревини складає приблизно 0,5 кг/(м² * хв), а швидкість розповсюдження полум'я при горінні, наприклад, штабелю дощок вогкістю 8 - 10 % рівна приблизно 4 м/хв. Для зниження горючості деревини необхідно направляти дію інгредієнтів на те, щоб питома масова швидкість вигорання, а також швидкість розповсюдження полум'я були мінімальними.

Процес горіння деревини і матеріалів на її основі починається з полум'яного горіння і потім переходить до змішаного горіння гомогенного та гетерогенного — безполум'яного горіння (тління), а також заключної фази, горіння самого лише вугілля. Але основну роль в процесах розвитку горіння грає перша фаза унаслідок виділення великої кількості тепла і високої температури, що сильно впливає на швидкість подальшого розповсюдження пожежі, тому гальмування процесів розвитку горіння, відбувається на першій фазі, є найважливішою задачею у вогнезахисті. Від запалювання продуктів газифікації залежить швидкість нагріву вуглецевого залишку [6], на цій фазі нагрівання вугілля може відбуватися тільки за рахунок зовнішніх джерел тепла (джерела запалення), а тому значно повільніше. На першій фазі величина пожежного завантаження (кількість горючого матеріалу) визначає час полум'яного горіння, а відповідно, і температуру горіння. В літературі експериментально зареєстрована температура горіння рослинних матеріалів 1070...1180 °С, при лісових пожежах близько 1000 °С, теоретична ж температура горіння складає 1570...1605 °С. [7,8].

Горіння деревних матеріалів може самозгасати [7]. Відповідно до досліджень [8], стале горіння деревини можливе лише за наявності зовнішнього підведення теплового потоку. Це пов'язано зі зменшенням швидкості горіння, спричиненим збільшенням теплових втрат у міру підвищення температури поверхні та зростання товщини шару вуглецю. Vabrauskas та ін. [9] досліджували самозгасання полум'я на дерев'яних балках. Матеріал піддавали дії тепла від ацетиленового пальника. Було встановлено, що піроліз і обвуглювання тривали приблизно 1–5 хвилин. Однак після цього горіння припинялося, і полум'я самозгасало після віддалення пальника.

Таким чином для захисту різноманітних дерев'яних елементів необхідно звернути увагу на те що зважаючи на те щоб забезпечити високий рівень пожежної безпеки необхідно наносити шари антипірену з умовою того щоб вони повністю закривали проміжки між ними на з'єднаннях, переходах і тд. Застосовані хімічні речовини (табл.1.) використовують різні механізми, або шляхи, такі як зміна теплових властивостей і шляху піролізу, флегматизування летких горючих газів, інгібування ланцюгових реакцій та поверхневий захист за допомогою ізоляційного покриття, щоб або відтермінувати займання, або зменшити тепловиділення [10] з метою зменшення забруднення довкілля.

У таблиці (табл.1.) погруповано ряд антипіренів за механізмом гальмування горіння [11].

Таблиця 1

Класифікація антипіренів за механізмом гальмування горіння

Флегматизація (розбавлення)	Зміна теплових властивостей	Інгібування хімічних реакцій	Утворення шару вуглецю	Утворення керамікоподібного шару
Ортофосфатна кислота Фосфонати Фосфат меламіну Тетраборат натрію Диціандіамід Сульфат амонію Гідроксид алюмінію Хлорид магнію Бікарбонат калію	Гідроксид алюмінію Ціанурати Гідроксид магнію Ацетат	Бром Хлор	Фосфат амонію Ортофосфатна кислота Фосфонати Фосфат меламіну Тетраборат натрію Диціандіамід Борна кислота	Бром Борна кислота Діоксид кремнію Силікат калію Силікат натрію Оксид заліза Оксид алюмінію

В 1916 році вперше була введена концепція вогнестійкості [12], заснована на спостереженнях за температурами пожеж деревини. Як відомо [4], вогнестійкість характеризує здатність елемента будівельної конструкції виконувати функції перешкоди під час пожежі. На підставі даної концепції побудована стандартна крива розвитку температури пожежі залежно від часу, яка визнана у нас і має силу нормативу в системі ІСО. Згідно з дослідженням [13], стандартна температура розвитку пожежі будується по математичній залежності:

Горіння завжди супроводжується теплообміном, який виявляється у вигляді теплопровідності, конвективного теплообміну і променистого (теплового) випромінювання [14]. На різних стадіях пожежі переважає один вид теплообміну. Так теплопровідність грає відповідальну роль в задачах запалювання, розповсюдження полум'я і вогнестійкості. Конвекція присутній на всіх стадіях пожежі, але особливо важливий на початку, коли рівень теплового випромінювання ще не високий, оскільки чинить вплив на форму і характеристики дифузійного полум'я. Променистий теплообмін відбувається за допомогою електромагнітних хвиль, які можуть поглинатися, пропускатися і відображатися поверхнею тіла, коли вогнище більше 0,3 м, він стає головним видом теплопереноса і визначає зростання і розповсюдження пожежі в приміщеннях, перенесення вогню на сусідні будівлі [15].

Джин та ін. [16] досліджували механізм гальмування горіння на вторинній його стадії. В якості антипірену використовували оксиди металів FeO, Fe₂O₃, SnO та SnO₂, а силікат натрію змішували для збільшення вогнезахисного ефекту. В результаті тепловиділення зменшилося 1,05 раза. Механізм гальмування

тепловиділення пояснюється тим, що генероване тепло розсіювалося конвекцією через пори в обвугленні. Це утворювало відносно тверду та термостійку структуру обвуглення.

Відомо, що теплопровідність залежить від температури, описується рівнянням Фур'є, яке для кожного матеріалу має певну константу — коефіцієнт теплопровідності:

Для сосни і дуба коефіцієнт теплопровідності в напрямі, перпендикулярному волокнам деревини, складає 0,17 і 0,14 Вт відповідно [17].

Конвективний теплообмін описується емпіричним співвідношенням, яке вперше було запропоноване Ньютоном.

Здібність матеріалів до запалювання визначається критичним тепловим випромінюванням. Залежно від критичної густини теплового випромінювання показана допустима мінімальна відстань між об'єктами [18], також визначені критичні теплові випромінювання для ряду матеріалів, так, наприклад, для деревини вогкістю 12% теплове випромінювання складає 13,9 кВт/м²; для ДСтП густиною 417 кг/м³ — 8,3 кВт/м², і, відповідно, складаю 6 і 8 м.

Математичні моделі розвитку пожеж і розповсюдження його небезпечних чинників в приміщеннях розроблені і розвинуті ученими [19]. В роботах [20] вивчені процеси затримки часу запалювання за допомогою енергетичного критерію. Для застосовності енергетичного критерію можливо використання усереднених критеріїв, наприклад, згідно [21] температура факела полум'я — 1240 °С, швидкість розповсюдження полум'я по горизонталі і вертикалі вгору — 0,1 і 1,4 м/хв відповідно. Для зразків ялини 12 % вогкості при тепловому випромінюванні рівному 12,32 кВт/м², енергетичний критерій — 19,44 кВт*хв/м² [20]. Таким чином, можливо визначення запалювання об'єкту на будь-якій висоті будівлі. В роботах [21] визначені показники критичних теплових потоків і критичних енергій: для сосни вогкістю 12 % — 12,86 кВт/м² і 18,37 кВт*хв/м², для деревини без урахування породи — 11,22 кВт/м² і 28,88 кВт*хв/м² відповідно.

Узагальнені теплотехнічні дані теорії горіння рослинних і деревних матеріалів показують, що для вирішення задач вогнезахисту інгредієнти, які входять в склад вогнезахисних засобів, повинні попереджати або зменшувати ефекти екзотермічних реакцій розкладання деревного комплексу, знижувати теплопровідність, теплообмін і теплове випромінювання, а також ураховувати критичні показники теплових потоків.

Деревина, оброблена вогнезахисним складом, чинить підвищений опір дії теплового випромінювання полум'я при розвитку пожежі. В роботі [22] був проведений аналіз кислого фосфорування, показано, що фосфорвмісні і азотовмісні антипірені сприяють зменшенню виходу смоли і горючих газоподібних продуктів розкладання і збільшенню кількості карбонізованого залишку [23]. Наявність фосфорної кислоти у вогнезахисних композиціях змінює співвідношення з СО до СО₂ у напрямі інгібування прямого окислення вуглецю в СО₂, в значній мірі знижуючи екзотермічний ефект процесу [24].

Під впливом введеного в целюлозовмісний матеріал фосфору змінюється механізм терморозпаду. Деструкція відбувається при більш низьких температурах із збільшенням виходу вугілля і води, в той же час знижується вихід горючих газів. Вогнезахисний ефект фосфорної кислоти обумовлений різкою зміною механізму термічних перетворень вуглеводної частини деревного комплексу, вона каталізує реакцію дегідратації целюлози. В результаті знижується ефективна енергія активації процесу дегідратації, знижується температура його початку, збільшується кількість. Так, за даними [25] фосфорування знижує температуру початку терморозкладу на 20 - 30 °С, вихід горючих летких продуктів зменшується на 50 %, вихід коксівного залишку збільшується на 70 %. Диференціальний термічний аналіз антипіренів системи на основі фосфорної кислоти також підтверджує зниження температури початку розкладання і значне зменшення втрати маси (результати досліджень будуть розглянуті нижче у відповідному розділі). Особливості і перспективи фосфорування показані в роботах [26].

Кисле фосфорування деревини знайшов широкий розвиток в області створення антипіренних систем, вирішальних практичні задачі вогне-біозахисту. Вогнезахисні засоби на основі фосфорної кислоти і сечовини [27], водні розчини фосфорної кислоти і цианаміда, ортофосфорної кислоти, сечовини, диціандіаміда [28], ортофосфорної кислоти, сечовини, триполіфосфата натрію [27], ортофосфорної кислоти, сечовини, триполіфосфату натрію, біозасобів [27], фосфорорганічні з'єднання на основі ефірів фосфорної кислоти [28], амідфосфатів — зразковий ряд практичного розвитку теорії вогнезахисту, процесів кислого фосфорування.

В дослідженнях [29-30] є видимим якісне вдосконалення засобів вогнезахисту з використанням відомих технологій "глибокого" просочення. Вогнезахисні засоби на основі фосфорної кислоти і сечовини дозволяють досягти важкогорючих властивостей деревині при проникненні на достатню глибину необхідної кількості антипіренів. Різноплановість використання фосфор-, азотовмісних антипіренів, яка показана в роботах [31,32], заснована на їх здатності пригнічувати процеси горіння і тління одночасно — виконувати роль запальника і антиоксиданта.

У всіх випадках головними вогнезахисними складовими водорозчинних просочувальних антипіренів є: концентрація на поверхні; зменшення виходу горючих газів з внутрішніх шарів деревини і відповідно збільшення вуглистих залишків; придушення процесів горіння та тління вугілля [32]. Ефект же вогнезахисту деревних матеріалів при покритті їх шаром лаків і фарб, заснований, головним чином, на утворенні теплоізолюючого шару чи на поверхні матеріалу в процесі теплової дії.

Аналіз наукових робіт в області кислого фосфорування, шляхів його вдосконалення, а також дослідження, проведені безпосередньо автором статті у напрямі створення більш ефективних засобів вогнезахисту за допомогою розробки нових розчинних антипіренів для просочення деревних матеріалів,

показав, що ефективним напрямом пошуку може служити шлях додання таким засобам здатності в процесі термічної дії, додатково до відомих ефектів інгібування процесів горіння, створювати теплоізоляцію за допомогою вспінювання як самих антипіренів, так і в сукупності з деревними складовими.

Технологічні процеси вогнезахисної обробки деревини і матеріалів досягається шляхом обробки поверхневого шару за допомогою покриттів, фарбами і лаками, а також методами капілярного просочення, просочення на задану глибину і просочення всієї маси по всьому перерізу дерев'яного бруса.

Для забезпечення рівних рівнів вогнезахисності деревини використовуються: при просоченні в полі відцентрових сил, при автоклавному просоченні під тиском або при поєднанні тиску і вакууму — антипірени, отримані простим перемішуванням інгредієнтів з невисокими показниками вогнезахисної ефективності (наприклад, МС 1:1 забезпечує важкогорючі властивості деревини при витраті розчину антипірену не менше 450 л/м³, що відповідають 66 кг/м³ сухих солей); при просоченні по методу гарячохолодних ванн — вогнезахисні засоби з використанням антипіренів, які при перемішуванні знаходять ефект синергізму (БАН, ВАНН-1, ФАХ). При поверхневій обробці деревини методом капілярного просочення вищеперелічені антипірени дають менший вогнезахисний ефект.

У рамках дослідження розроблено експериментальну антипіренову вогнезахисну композицію полімерно-реакційного типу. Запропонований склад ґрунтується на поєднанні фосфорвмісного кислотного каталізатора, природного полісахаридного модифікатора та системи аміноформальдегідних сполук, здатних до інтенсивної поліконденсації.

Базовими компонентами композиції є ортофосфорна кислота, крохмаль, формалін, дициандіамід, карбамід та бікарбонат калію. Ортофосфорна кислота виконує роль кислотного каталізатора та джерела фосфору, ініціюючи гідроліз і фосфатування крохмалю з утворенням фосфатних ефірів, а також активуючи реакції поліконденсації азотовмісних сполук. Крохмаль у кислому середовищі частково переходить у декстрини та водночас бере участь у формуванні полімерної сітки, підвищуючи адгезійні та плівкоутворювальні властивості композиції.

Формальдегід, який надходить із формаліну, вступає у реакції з карбамідом і дициандіамідом з утворенням карбамідоформальдегідних та дициандіамідоформальдегідних смол. У присутності кислоти ці реакції інтенсифікуються і призводять до формування тривимірних сітчастих полімерів, здатних до термореактивного твердіння. Бікарбонат калію виконує буферну функцію, частково нейтралізуючи надлишок кислоти та стабілізуючи рН середовища, а також забезпечує виділення діоксиду вуглецю, що додатково сприяє формуванню пористої захисної структури при нагріванні. У результаті взаємодії зазначених компонентів утворюється комплексна полімерна система на основі аміноформальдегідних смол, модифікованих ортофосфорною кислотою та крохмалем. Така система характеризується формуванням термостійкої фосфорно-азотовмісної сітчастої матриці, здатної при тепловому впливі переходити у захисний коксований шар, який ізолює деревину від дії полум'я та високих температур та забезпечує її більшу пожежну та відповідну екологічну безпеку.

Таким чином, запропонована експериментальна композиція поєднує функції термореактивного просочувального полімеру, антипіренової добавки та біополімерного модифікатора, що робить її перспективною основою для створення ефективних вогнезахисних покриттів і просочень для деревини.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В роботі наведено механізм та методологія розроблення безпечної для довкілля полімерної системи на основі аміноформальдегідних смол, модифікованих ортофосфорною кислотою та крохмалем. У процесі поліконденсації формується просторово зшита фосфорно-азотовмісна матриця, здатна при термічному впливі утворювати термостійкий коксований шар, який ізолює деревину від полум'я та високих температур. Поєднання кислотного каталізу, біополімерної модифікації та азотовмісних антипіренів забезпечує перспективність композиції для створення ефективних безпечних для довкілля вогнезахисних просочень і покриттів для деревини.

Література

1. Brophy K., Millican K. Wood and fire: Scotland's timber cursus monuments // *Archaeological Journal*. – 2015. – Vol. 172, No. 2. – P. 297–324. – DOI: <https://doi.org/10.1080/00665983.2015.1025589>.
2. Östman B. A.-L. Fire performance of wood products and timber structures // *International Wood Products Journal*. – 2017. – Vol. 8, No. 2. – P. 74–79. – DOI: <https://doi.org/10.1080/20426445.2017.1320851>.
3. Doroudiani S., Doroudiani B., Doroudiani Z. Materials that release toxic fumes during fire // *Toxicity of Building Materials*. – Elsevier, 2012. – P. 241–282.
4. Дослідження процесів горіння деревини та оцінка вогнестійкості несучих будівельних конструкцій [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/student-work/PB/vognik.pdf> (дата звернення: 16.02.2026).
5. Tucki K., Orynycz O., Wasiak A., Świć A., Mieszkalski L., Wichłacz J. Low emissions resulting from combustion of forest biomass in a small scale heating device // *Energies*. – 2020. – Vol. 13, No. 20. – P. 5495. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en13205495>.

6. Leitner B., Gašpercová S., Marková I., Tureková I. Effect of combining fungal and flame-retardant coatings on the thermal degradation of spruce and beech wood under flame loading // *Fire*. – 2024. – Vol. 7, No. 12. – P. 463. – DOI: <https://doi.org/10.3390/fire7120463>.
7. Emberley R., Inghelbrecht A., Yu Z., Torero J. L. Self-extinction of timber // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2017. – Vol. 36, No. 2. – P. 3055–3062. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.07.077>.
8. Bartlett A. I., Hadden R. M., Bisby L. A. A review of factors affecting the burning behaviour of wood for application to tall timber construction // *Fire Technology*. – 2019. – Vol. 55, No. 1. – P. 1–49. – DOI: 10.1007/s10694-018-0787-y.
9. Babrauskas V. Ignition of wood: a review of the state of the art // *Journal of Fire Protection Engineering*. – 2002. – Vol. 12, No. 3. – P. 163–189. – DOI: 10.1177/10423910260620482.
10. Кодрик А., Коваленко В., Тітенко О. та ін. Шляхи підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі рідкого скла // *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. – 2022. – Т. 1, № 13. – С. 24–34.
11. Östman B. та ін. *Innovative eco-efficient high fire performance wood products for demanding applications*. – Berlin : Springer, 2006. – Режим доступу: <https://cris.vtt.fi/en/publications/innovative-eco-efficient-high-fire-performance-wood-products-for-/> (дата звернення: 16.02.2026).
12. Tsapko Y., Tsapko A., Zhartovskiy S., Likhnyovskiy R., Kravchenko M., Lialina N., Berezovskiy Y., Kaveryn K., Sarapin Y. Establishing fire protection patterns in wood using impregnation compositions from inorganic salts // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2024. – Vol. 5, No. 10(131). – P. 62–70. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313423>.
13. Баланюк В. М. The effectiveness of open space fire extinguishing with flammable liquid fighting aerosols // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2015. – Vol. 5, No. 10(77). – P. 4–11. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51399>.
14. Marino S. та ін. Enhancing the fire resistance properties of thermally modified wood // *Wood Science and Technology*. – 2024.
15. Jin E., Chung Y. J. Evaluation of combustion characteristics for wood specimens coated with metal oxides of different oxidation states in the secondary stage of combustion (II) // *Wood Science and Technology*. – 2024. – Vol. 58. – P. 253–271. – DOI: 10.1007/s00226-023-01510-5.
16. Liiv J., Rikmann E., Shanskiy M., Teppand T. Ecological wood protection system against fire, fungi and insect damage using humic acids and fly ash // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, No. 12. – P. 5179. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app14125179>.
17. Жартовський В. М., Жартовський С. В., Борисов П. Ф. Композиція для вогнебіозахисту деревини : деклараційний патент № 8963, В27К 3/50. – Опубл. 2005. – Бюл. № 8.
18. Жартовський В. М., Жартовський С. В., Грабовський О. В. Спосіб виготовлення вогнебіо захищеної фанери підвищеної водостійкості : деклараційний патент на корисну модель № 8987. – Опубл. 15.08.2005. – Бюл. № 8.
19. Buchanan A. H., Abu A. K. *Structural design for fire safety*. – 2nd ed. – New Zealand : Wiley, 2019.
20. Wen M. Y., Kang C. W., Park H. J. Impregnation and mechanical properties of three softwoods treated with a new fire retardant chemical // *Journal of Wood Science*. – 2014. – Vol. 60. – P. 367–375. – DOI: 10.1007/s10086-014-1408-0.
21. Advanced Fireproofing Systems Ltd. Improvements relating to fire proofing compositions : Brit. Pat. № 1570604, C09D5/18. – 1977–1980. Hansen-Bruhn I., Hull T. R. Smoke toxicity of fire protecting timber treatments // *Fire Safety Journal*. – 2023. – Vol. 141. – P. 103977. – DOI: 10.1016/j.firesaf.2023.103977.
22. Dobbs A. J., Grant C. The volatilization of arsenic on burning of copper-chrome-arsenic (CCA) treated wood // *Holzforschung*. – 1978. – Vol. 32, No. 1. – P. 32–35.
23. Krauses Chr., Englert N. Zur gesundheitlichen Pentachlorphenolhaltiger Holzschutzmittel in Wohnräumen // *Holz als Roh- und Werkstoff*. – 1980. – No. 11. – P. 429–432.
24. Grzeškowiak W. Ł., Ratajczak I., Zborowska M., Przybylska M., Patora M. Phosphorus–nitrogen interaction in fire retardants and its impact on the chemistry of treated wood // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, No. 21. – P. 5283. – DOI: 10.3390/ma17215283.
25. Korovnikova N., Dubyna O., Oliinik V., Svischova Y. Chemical cellulose-based fibers of decreased flammability // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – Vol. 5, No. 6(107). – P. 33–39. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.214507>.
26. Wang M., Yin G.-Z., Yang Y., Fu W., Díaz Palencia J. L., Zhao J., Wang N., Jiang Y., Wang D.-Y. Bio-based flame retardants to polymers: a review // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. – 2023. – Vol. 6, No. 2. – P. 132–155. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.07.00>.
27. Баланюк В. М. та ін. Вплив добавок CO₂ на вогнегасну ефективність бінарної аерозольно-газової суміші // *Пожежна безпека*. – 2016. – № 28. – С. 6–12.
28. Цапко Ю. В., Жартовський С. В., Грабовський О. В. Розроблення важкогорючих фанерних плит та дослідження їх вогнезахисних властивостей // *Науковий вісник УкрНДІПБ*. – 2007. – № 1(15). – С. 63–68.
29. Бут В. П., Жартовський В. М., Білошицький М. В., Цапко Ю. В., Барило О. Г. Особливості дослідження тривалості вогнезахисту деревини просочувальними засобами // *Науковий вісник УкрНДІПБ*. – 2004. – № 1(9). – С. 21–25.

30. Жартовський В. М., Бут В. П., Цапко Ю. В., Барило О. Г. Дослідження механізму вогнезахисної ефективності деревини просочувальними композиціями // *Комунальне господарство міст.* – 2004. – Вип. 55. – С. 219–229.

31. Jiang L., Zeinali D., Arsava K. S. та ін. The impact of water-based fire suppression systems on combustion products // *Fire Technology.* – 2025. – Vol. 61. – P. 2441–2465. – DOI: 10.1007/s10694-024-01689-4.

32. Баланюк В. М., Грималюк Б. Т., Кіт Ю. В., Левуш С. С. Вплив газової фази на ефективність вогнегасних аерозолів // *Вісник НУ «Львівська політехніка». Технічні науки.* – 2004. – № 497. – С. 11–12.

References

1. Brophy K., Millican K. Wood and fire: Scotland's timber cursus monuments // *Archaeological Journal.* – 2015. – Vol. 172, No. 2. – P. 297–324. – DOI: <https://doi.org/10.1080/00665983.2015.1025589>.
2. Östman B. A.-L. Fire performance of wood products and timber structures // *International Wood Products Journal.* – 2017. – Vol. 8, No. 2. – P. 74–79. – DOI: <https://doi.org/10.1080/20426445.2017.1320851>.
3. Doroudiani S., Doroudiani B., Doroudiani Z. Materials that release toxic fumes during fire // *Toxicity of Building Materials.* – Elsevier, 2012. – P. 241–282.
4. Doslidzhennia protsesiv horinnia derevyny ta otsinka vohnestiikosti nesuchykh budivelnykh konstruksii [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/student-work/PB/vognik.pdf> (data zvernennia: 16.02.2026).
5. Tucki K., Orynych O., Wasiak A., Świć A., Mieszalski L., Wichłacz J. Low emissions resulting from combustion of forest biomass in a small scale heating device // *Energies.* – 2020. – Vol. 13, No. 20. – P. 5495. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en13205495>.
6. Leitner B., Gašpercová S., Marková I., Tureková I. Effect of combining fungal and flame-retardant coatings on the thermal degradation of spruce and beech wood under flame loading // *Fire.* – 2024. – Vol. 7, No. 12. – P. 463. – DOI: <https://doi.org/10.3390/fire7120463>.
7. Emberley R., Inghelbrecht A., Yu Z., Torero J. L. Self-extinction of timber // *Proceedings of the Combustion Institute.* – 2017. – Vol. 36, No. 2. – P. 3055–3062. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.07.077>.
8. Bartlett A. I., Hadden R. M., Bisby L. A. A review of factors affecting the burning behaviour of wood for application to tall timber construction // *Fire Technology.* – 2019. – Vol. 55, No. 1. – P. 1–49. – DOI: 10.1007/s10694-018-0787-y.
9. Babrauskas V. Ignition of wood: a review of the state of the art // *Journal of Fire Protection Engineering.* – 2002. – Vol. 12, No. 3. – P. 163–189. – DOI: 10.1177/10423910260620482.
10. Kodryk A., Kovalenko V., Titenko O. та ін. Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti vodnykh vohnehasnykh rechovyn na osnovi ridkoho skla // *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka.* – 2022. – Т. 1, № 13. – С. 24–34.
11. Östman B. та ін. Innovative eco-efficient high fire performance wood products for demanding applications. – Berlin : Springer, 2006. – Rezhym dostupu: <https://cris.vtt.fi/en/publications/innovative-eco-efficient-high-fire-performance-wood-products-for/> (data zvernennia: 16.02.2026).
12. Tsapko Y., Tsapko A., Zhartovskiy S., Likhnyovskiy R., Kravchenko M., Lialina N., Berezovskiy Y., Kaveryn K., Sarapin Y. Establishing fire protection patterns in wood using impregnation compositions from inorganic salts // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2024. – Vol. 5, No. 10(131). – P. 62–70. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313423>.
13. Balaniuk V. M. The effectiveness of open space fire extinguishing with flammable liquid fighting aerosols // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2015. – Vol. 5, No. 10(77). – P. 4–11. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51399>.
14. Marino S. та ін. Enhancing the fire resistance properties of thermally modified wood // *Wood Science and Technology.* – 2024.
15. Jin E., Chung Y. J. Evaluation of combustion characteristics for wood specimens coated with metal oxides of different oxidation states in the secondary stage of combustion (II) // *Wood Science and Technology.* – 2024. – Vol. 58. – P. 253–271. – DOI: 10.1007/s00226-023-01510-5.
16. Liiv J., Rikmann E., Shanskiy M., Teppand T. Ecological wood protection system against fire, fungi and insect damage using humic acids and fly ash // *Applied Sciences.* – 2024. – Vol. 14, No. 12. – P. 5179. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app14125179>.
17. Zhartovskiy V. M., Zhartovskiy S. V., Borysov P. F. Kompozitsiia dlia vohnebiozakhystu derevyny : deklaratsiinyi patent № 8963, V27K 3/50. – Opubl. 2005. – Biul. № 8.
18. Zhartovskiy V. M., Zhartovskiy S. V., Hrabovskiy O. V. Sposib vyhotovlennia vohnebiozakhyschenoi fanery pidvyshchenoi vodostiikosti : deklaratsiinyi patent na korysnu model № 8987. – Opubl. 15.08.2005. – Biul. № 8.
19. Buchanan A. H., Abu A. K. Structural design for fire safety. – 2nd ed. – New Zealand : Wiley, 2019.
20. Wen M. Y., Kang C. W., Park H. J. Impregnation and mechanical properties of three softwoods treated with a new fire retardant chemical // *Journal of Wood Science.* – 2014. – Vol. 60. – P. 367–375. – DOI: 10.1007/s10086-014-1408-0.
21. Advanced Fireproofing Systems Ltd. Improvements relating to fire proofing compositions : Brit. Pat. № 1570604, C09D5/18. – 1977–1980. Hansen-Bruhn I., Hull T. R. Smoke toxicity of fire protecting timber treatments // *Fire Safety Journal.* – 2023. – Vol. 141. – P. 103977. – DOI: 10.1016/j.firesaf.2023.103977.
22. Dobbs A. J., Grant C. The volatilization of arsenic on burning of copper-chrome-arsenic (CCA) treated wood // *Holzforschung.* – 1978. – Vol. 32, No. 1. – P. 32–35.
23. Krauses Chr., Englert N. Zur gesundheitlichen Pentachlorphenolhaltiger Holzschutzmittel in Wohnräumen // *Holz als Roh- und Werkstoff.* – 1980. – No. 11. – P. 429–432.
24. Grześkowiak W. Ł., Ratajczak I., Zborowska M., Przybylska M., Patora M. Phosphorus–nitrogen interaction in fire retardants and its impact on the chemistry of treated wood // *Materials.* – 2024. – Vol. 17, No. 21. – P. 5283. – DOI: 10.3390/ma17215283.
25. Korovnikova N., Dubyna O., Oliinik V., Svishchova Y. Chemical cellulose-based fibers of decreased flammability // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2020. – Vol. 5, No. 6(107). – P. 33–39. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.214507>.
26. Wang M., Yin G.-Z., Yang Y., Fu W., Diaz Palencia J. L., Zhao J., Wang N., Jiang Y., Wang D.-Y. Bio-based flame retardants to polymers: a review // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research.* – 2023. – Vol. 6, No. 2. – P. 132–155. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.07.00>.
27. Balaniuk V. M. та ін. Vplyv dobavok SO₂ na vohnehasnu efektyvnist binarnoi aerazolno-hazovoi sumishi // *Pozhezhna bezpeka.* – 2016. – № 28. – С. 6–12.
28. Tsapko Yu. V., Zhartovskiy S. V., Hrabovskiy O. V. Rozroblennia vazhkohoriuchykh fanernykh plyt ta doslidzhennia yikh vohnezakhysnykh vlastyivostei // *Naukovyi visnyk UkrNDIPB.* – 2007. – № 1(15). – С. 63–68.
29. But V. P., Zhartovskiy V. M., Biloshytskiy M. V., Tsapko Yu. V., Barylo O. H. Osoblyvosti doslidzhennia tryvalosti vohnezakhystu derevyny prosochuvальnymi zasobamy // *Naukovyi visnyk UkrNDIPB.* – 2004. – № 1(9). – С. 21–25.
30. Zhartovskiy V. M., But V. P., Tsapko Yu. V., Barylo O. H. Doslidzhennia mekhanizmu vohnezakhysnoi efektyvnosti derevyny prosochuvальnymi kompozitsiiami // *Komunalne gospodarstvo mist.* – 2004. – Vyp. 55. – С. 219–229.
31. Jiang L., Zeinali D., Arsava K. S. та ін. The impact of water-based fire suppression systems on combustion products // *Fire Technology.* – 2025. – Vol. 61. – P. 2441–2465. – DOI: 10.1007/s10694-024-01689-4.
32. Balaniuk V. M., Hrymaliuk B. T., Kit Yu. V., Levush S. S. Vplyv hazovoi fazy na efektyvnist vohnehasnykh aerazoliv // *Visnyk NU «Lvivska politekhnika». Tekhnichni nauky.* – 2004. – № 497. – С. 11–12.