

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПИКУС ВІКТОР СТЕПАНОВИЧ

УДК 614.841.45

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
КОМБІНОВАНИХ ПРОСОЧУВАЛЬНИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ ДЕРЕВИНИ
ТА ЦЕЛЮЛОЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Галузь знань 26 «Цивільна безпека»
Спеціальність 261 «Пожежна безпека»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ В.С. ПИКУС

Науковий керівник: Баланюк Володимир Мірчович доктор технічних наук,
доцент.

Львів – 2026

АНОТАЦІЯ

Пікус В.С. Підвищення вогнезахисної ефективності комбінованих просочувальних сумішей для деревини та целюлозовмісних матеріалів – кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 «Пожежна безпека», галузь знань 26 «Цивільна безпека». Львівський державний університет безпеки життєдіяльності ДСНС України, Львів, 2026.

За результатами виконаного комплексного дослідження щодо розроблення, теоретичного обґрунтування та експериментальної перевірки ефективності комплексної полімерної антипіренової системи «АМОК-1» для вогнезахисту деревини та целюлозовмісних матеріалів отримано цілий ряд результатів.

В роботі проведено системний аналіз та класифікацію сучасних засобів поверхневого вогнезахисту деревини. На основі Наказу МВС № 1064 «Про затвердження Правил з вогнезахисту» класифіковано вогнезахисні засоби за чотирма ознаками: складом і властивостями, методом захисту, товщиною нанесення та умовами експлуатації. Проведено порівняльний аналіз вітчизняних та зарубіжних вогнезахисних фарб, лаків і просочень. Встановлено, що традиційні просочувальні засоби (МС, ПП, КОС-Д, АЛАНА, ЕСОСЕРТ 450-1 та ін.) забезпечують захист протягом 1,5–2 років, тоді як покриття з підтвердженим терміном дії забезпечують вогнезахист у середньому до 10 років. Вартість сертифікованих імпортованих інтумесцентних засобів становить 54–105 грн/м², що у 2–3 рази перевищує собівартість розробленої системи АМОК-1. Проаналізовано нормативно-технічну базу у сфері вогнезахисту деревини в Україні. Виявлено активний процес її гармонізації з європейськими стандартами: запроваджено *ДСТУ 9291:2024* «Захист від пожежі. Вогнезахист будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання», *ДСТУ*

9314:2025 «Настанови щодо проектування, виконання робіт та підтримання експлуатаційної придатності», а також *ДСТУ EN 13381-2:2024*. Водночас ряд застарілих нормативних документів радянського зразка (*ГОСТ 16363-98, ГОСТ 30219-95*) ще залишається чинним, що ускладнює уніфікацію методів контролю ефективності вогнезахисних засобів і потребує подальшого оновлення нормативної бази. Аналіз розділу дав змогу сформулювати вимоги до нового вогнезахисного засобу: забезпечення глибокого просочення деревини, формування щільного і термостійкого пінококсового шару при тепловому впливі, висока початкова і довготривала ефективність, стійкість до атмосферних факторів, доступна вартість (до 33 грн/м²) та виключно вітчизняна сировинна база. Ці вимоги стали основою для розроблення системи «АМОК-1».

Досліджено теоретичні передумови вогнезахисту деревини та розкрито кінетику її термічної деструкції. Деревина є складною сумішшю природних полімерів: целюлоза (~50 %), геміцелюлоза (~25 %) та лігнін (~25 %), що мають різну термічну стійкість. Найменш термостійкою є геміцелюлоза, найбільш — лігнін. Детально розкрито двостадійний механізм горіння: **полум'яна стадія** (250–450 °С, 55–60 % загального тепловиділення) — горіння газоподібних продуктів піролізу, та **гетерогенна стадія** (750–850 °С, 40–45 % тепловиділення) — безполуменеве окислення вуглистого залишку. Кількісно охарактеризовано кінетику термічної деструкції деревини: швидкість перевуглювання в реальних умовах пожежі становить 0,1–0,2 мм/хв та зростає із збільшенням швидкості повітряного потоку. Середня глибина піролізного шару після 30 хвилин теплового впливу при 500–600 °С становить: для сосни — 15–25 мм, берези — 18–25 мм. Встановлено, що наростання вуглистого шару підвищує термічний опір матеріалу і за певної товщини може спричинити самозгасання — цей ефект є теоретичною основою захисту за допомогою інтумесцентних покриттів. Систематизовано шість основних шляхів зниження горючості деревини: введення речовин з великою ентальпією фазового переходу при температурах нижче температури піролізу; зміна термічної деструкції у напрямку збільшення виходу негорючих газів; підвищення виходу

вуглистого карбонізованого залишку; введення хімічних інгібіторів горіння; нанесення матеріалів, здатних утворювати теплоізолювальний шар; конструктивне облицювання негорючими матеріалами. Кожен із цих механізмів може реалізовуватися окремо або в комбінації, що визначає вибір типу антипіренової системи. Детально проаналізовано вплив природних та хімічних чинників на деревину. Встановлено, що вологість нижче 55 % сприяє розвитку грибкових захворювань, тоді як при повному водонасиченні деревина стійка до біологічних руйнівників. Дія концентрованих кислот та їдких лугів при підвищених температурах спричиняє гідроліз целюлози з утворенням глюкози. Ці хімічні перетворення необхідно враховувати при формуванні складу вогнезахисних систем для уникнення деградації деревини через взаємодію з кислотними компонентами антипіренів. Встановлено, що фосфорно-азотні антипіренові системи є найбільш ефективними. Введення фосфору в целюлозовмісний матеріал кардинально змінює механізм термічного розкладу: знижується температура початку термодеструкції на 20–30 °С, вихід горючих летких продуктів зменшується на 50 %, а вихід коксівного карбонізованого залишку збільшується на 70 %. Сполуки на основі ортофосфорної кислоти у поєднанні з карбамідом і диціандіамідом виявляють синергічну дію, одночасно виконуючи функції кислотного каталізатора, вуглецевого донора та газоутворювача. Ці закономірності становлять теоретичне підґрунтя для розроблення системи «АМОК-1».

Робота також містить результати комплексних лабораторних і вогневих досліджень розробленої антипіренової системи. Підготовку зразків деревини (сосна, береза) та нанесення системи «АМОК-1» проводили відповідно до ГОСТ 20022.6-93 поверхневим просоченням у два шари з міжшаровим висиханням протягом чотирьох годин. На основі серії підготовчих дослідів оптимізовано склад системи «АМОК-1» (мас. %): ортофосфорна кислота — 60 %, крохмаль — 15 %, диціандіамід — 9 %, карбамід — 7 %, бікарбонат калію — 2 %, клейова добавка (ПВА або силікатний клей) — 10 %. Розкрито трикомпонентний механізм інтумесцентного захисту: ортофосфорна кислота як

кислотний каталізатор ініціює дегідратацію крохмалю і целюлози з утворенням вуглецевого каркасу; карбамід і диціандіамід при термічному розкладі виділяють негорючі гази (NH_3 , CO_2), що «падувають» розм'якшений полімерний шар; просторово зшита аміноформальдегідна матриця надає спіненому пінококсу механічної стійкості. Кратність спучування досягає 10–15 разів, а максимальна товщина пінококсового шару становить 28 мм при концентрації диціандіаміду 9 %. Проведено комплекс стандартних вогневих випробувань, що підтвердили належність усіх варіантів «АМОК-1» до першої групи вогнезахисної ефективності. За результатами випробувань за *ГОСТ 16363-98* середня втрата маси зразків складає: варіант з ПВА — 5,0 %, з КМЦ — 5,7 %, із силікатним клеєм — 7,1 % при нормативній межі 9 % для першої групи. Випробування за *ДСТУ 9330:2025* показали, що жоден зразок не виявив самостійного горіння (час самостійного горіння становить 0 с). Індекс поширення полум'я за *ДСТУ 8829:2019*: для варіантів із ПВА і КМЦ — $I = 0$ (не поширює полум'я), із силікатним клеєм — $I = 3$ (повільно поширює). За *ДБН В.1.1-7-2016* оброблені зразки класифіковано в групі М2. Випробування на визначення розміру зон піролізу та обвуглення за *ISO 834* показали, що система «АМОК-1» зменшує глибину вуглистого шару сосни з 12 до 4 мм (у 3 рази), зону піролізу — з 7 до 2 мм (у 3,5 рази); для берези: вуглистий шар — з 8 до 2 мм (у 4 рази), зона піролізу — з 4 до 1 мм (у 4 рази). Початок інтенсивного піролізу зміщується з 250–270 °С до 310–330 °С, що забезпечує додатковий час 2–3 хвилини для евакуації людей і проведення рятувальних операцій. Принципово важливим є встановлений факт нівелювання породних відмінностей: оброблені зразки сосни та берези мають однакову глибину деструктивних шарів, що суттєво спрощує нормування вогнезахисту для різних деревних порід. Мікроструктурний аналіз (СЕМ) підтвердив залежність морфології пінококсу від типу клейової добавки. Варіант із ПВА формує найбільш однорідну еластичну матрицю з дрібними рівномірно розподіленими порами та найкращою адгезією до поверхні деревини. КМЦ підвищує компактність вуглецевого шару і знижує пікову швидкість тепловиділення

приблизно на 58 %. Силікатний клей утворює неорганічно-органічну матрицю з підвищеною термічною стабільністю захисного каркасу, проте дещо менш рівномірним спученням. Математичне моделювання залежності вогнезахисної ефективності від витрати антипіренового засобу виконано методом найменших квадратів. Встановлено, що дана залежність має виражений квадратичний (параболічний) характер і описується рівнянням $m = a - bR + cR^2$, де m — втрата маси зразка (%), R — питома витрата засобу (г/м^2), a , b , c — коефіцієнти регресії. Наявність чіткого мінімуму функції підтверджує існування оптимальної питомої витрати, за якої досягається максимальна вогнезахисна ефективність. Для варіанту із ПВА оптимальна витрата становить близько 300 г/м^2 при мінімальній втраті маси 5,0 %. Збільшення витрати понад оптимум не підвищує, а знижує ефективність захисту внаслідок порушення рівномірності нанесення і погіршення умов спучування. Цей результат є науковою основою для нормування кількості нанесеного засобу при двошаровій обробці деревини.

Розроблено повну науково обґрунтовану методику практичного застосування системи «АМОК-1», що відповідає вимогам Наказу МВС № 1064 «Про затвердження Правил з вогнезахисту» та *ДСТУ 9314:2025*. Методика охоплює повний технологічний цикл від виготовлення композиції до контролю якості виконаних робіт і регламентує всі ключові параметри процесу.

Розроблено технологічний регламент виготовлення системи «АМОК-1» із науково обґрунтованою послідовністю введення семи компонентів з урахуванням екзотермічних реакцій між ортофосфорною кислотою і карбамідом. Встановлено вимоги до зберігання готової композиції: температура не нижче $+5 \text{ }^\circ\text{C}$ у щільно закритих ємностях, гарантійний строк — 1 рік. Обґрунтовано параметри контролю якості виготовленої суміші: рівень рН = 3,5–4,5, в'язкість та однорідність консистенції.

Регламентовано методику підготовки поверхні деревини перед обробленням. Вологість деревини перед нанесенням не повинна перевищувати 15–20 %, поверхня має бути очищена від пилу, олійстих забруднень та решток

старих покриттів. Нанесення системи «АМОК-1» здійснюється у два шари пензлем або фарбопультотом: питома витрата кожного шару — близько 150 г/м², загальна витрата — 300 г/м². Між нанесенням шарів необхідна технологічна пауза тривалістю 4 год при температурі 17–30 °С і відносній вологості повітря 45–80 %. Визначено режими висушування нанесеного покриття та критерії оцінки якості виконаних вогнезахисних робіт. Система контролю якості включає: перевірку вогнестійкості зразків деревини після нанесення — час самостійного горіння не менше 120 с, вимірювання глибини просочення активних компонентів, визначення водопоглинання покриття та рівня рН. Ці параметри є обов'язковими критеріями приймання виконаних вогнезахисних робіт відповідно до вимог ДСТУ 9291:2024. Сформульовано вимоги безпеки при виготовленні та застосуванні системи. Оскільки ортофосфорна кислота є корозійно активною речовиною, при роботі необхідні засоби індивідуального захисту органів дихання і зору, а також спеціальний захисний одяг. Передбачено заходи щодо нейтралізації можливих розливів та утилізації відходів виробництва. Проведено економічне обґрунтування застосування системи «АМОК-1». Собівартість 1 кг готової композиції складає 82–111 грн залежно від ринкових цін на складові, вартість оброблення 1 м² поверхні деревини — 25–33 грн. Для порівняння: ринкові сертифіковані аналоги коштують 54–105 грн/м², що у 2–3 рази перевищує вартість АМОК-1. Склад системи побудовано виключно на доступній вітчизняній промисловій сировині, що усуває залежність від імпорتنих поставок і забезпечує стабільність виробничого ланцюжка — особливо важливо в умовах воєнного стану. Результати дослідження можуть бути використані при відновленні дерев'яних будівель, пошкоджених унаслідок бойових дій, при оновленні ДСТУ у сфері вогнезахисту деревини, у навчальному процесі вищих навчальних закладів пожежно-технічного профілю та при впровадженні на підприємствах будівельної галузі і в підрозділах цивільного захисту України.

Ключові слова: вогнезахист деревини, антипірен, інтумесцентне покриття, аміноформальдегідний комплекс, ортофосфорна кислота, крохмаль, пінококк, вогнезахисна ефективність, АМОК-1.

ABSTRACT

Pykus V.S. Enhancing the fire-protective effectiveness of combined impregnating compositions for wood and cellulose-containing materials – qualifying scientific work in manuscript form. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in speciality 21.06.02 – fire safety (261 – fire safety). Lviv State University of Life Safety, State Emergency Service of Ukraine, Lviv, 2026.

Based on the results of a comprehensive study on the development, theoretical substantiation and experimental verification of the effectiveness of the complex polymer flame retardant system "АМОК-1" for fire protection of wood and cellulose-containing materials, a number of studies have been carried out.

In the first chapter a systematic analysis and classification of contemporary surface fire-protection agents for wood is carried out. On the basis of MIA Order No. 1064 “On Approval of Fire-Protection Rules”, fire-protective agents are classified along four criteria: composition and properties, protection method, application thickness and service conditions. A comparative analysis of domestic and foreign fire-protective paints, varnishes and impregnations is carried out. It is established that traditional impregnating agents (MS, PP, KOS-D, ALANA, ECOSEPT 450-1, etc.) provide protection for 1.5–2 years, whereas coatings with a confirmed service life provide fire protection for an average of up to 10 years. The cost of certified imported intumescent agents amounts to 54–105 UAH/m², which is 2–3 times the cost of the developed АМОК-1 system. The regulatory and technical framework for wood fire protection in Ukraine is analysed. An active process of harmonisation with European standards is identified: DSTU 9291:2024 “Fire Protection. Fire Protection of Building

Structures. General Requirements and Control Methods”, DSTU 9314:2025 “Guidelines for Design, Construction and Maintenance of Performance”, as well as DSTU EN 13381-2:2024, have been introduced. At the same time, a number of outdated Soviet-era regulatory documents (GOST 16363-98, GOST 30219-95) remain in force, which complicates the unification of effectiveness-control methods and requires further updating of the regulatory framework. The analysis of the chapter enabled the formulation of requirements for the new fire-protective agent: ensuring deep impregnation of wood, formation of a dense and thermally stable char-foam layer under thermal exposure, high initial and long-term effectiveness, resistance to atmospheric factors, an affordable unit cost (up to 33 UAH/m²) and an exclusively domestic raw-material base. These requirements formed the basis for the development of the “AMOK-1” system.

In the second chapter the theoretical prerequisites for wood fire protection are investigated and the kinetics of its thermal degradation are elucidated. Wood is a complex mixture of natural polymers: cellulose (~50 %), hemicellulose (~25 %) and lignin (~25 %), which differ in thermal stability. Hemicellulose is the least thermally stable, lignin the most. The two-stage combustion mechanism is elaborated in detail: the flaming stage (250–450 °C, 55–60 % of total heat release) — combustion of gaseous pyrolysis products — and the heterogeneous stage (750–850 °C, 40–45 % of heat release) — flameless oxidation of the carbonaceous residue. The kinetics of thermal degradation of wood are characterised quantitatively: the charring rate under real fire conditions is 0.1–0.2 mm/min and increases with rising air-flow velocity. The mean depth of the pyrolysis layer after 30 minutes of thermal exposure at 500–600 °C amounts to: 15–25 mm for pine, 18–25 mm for birch. It is established that the growth of the char layer raises the thermal resistance of the material and, beyond a certain thickness, can cause self-extinction — this effect constitutes the theoretical basis for protection by intumescent coatings. Six principal mechanisms for reducing the combustibility of wood are systematised: introduction of substances with a high enthalpy of phase transition at temperatures below the pyrolysis temperature;

modification of thermal degradation in the direction of increasing the yield of non-combustible gases; increasing the yield of carbonaceous char residue; introduction of chemical flame inhibitors; application of materials capable of forming a thermally insulating layer; structural cladding with non-combustible materials. Each of these mechanisms may be realised individually or in combination, which determines the choice of antipyrene-system type. The effects of natural and chemical factors on wood are analysed in detail. It is established that a relative humidity below 55 % promotes the development of fungal diseases, whereas at full water saturation wood is resistant to biological degraders. The action of concentrated acids and caustic alkalis at elevated temperatures causes hydrolysis of cellulose with formation of glucose. These chemical transformations must be taken into account when formulating fire-protective systems in order to avoid degradation of wood through interaction with the acidic components of antipyrenes. It is established that phosphorus–nitrogen antipyrene systems are the most effective. The introduction of phosphorus into cellulose-containing material fundamentally alters the thermal-decomposition mechanism: the onset temperature of thermal degradation decreases by 20–30 °C, the yield of combustible volatile products decreases by 50 %, and the yield of carbonised char residue increases by 70 %. Compounds based on orthophosphoric acid in combination with urea and dicyandiamide exhibit a synergistic effect, simultaneously acting as acid catalyst, carbon donor and blowing agent. These regularities constitute the theoretical foundation for the development of the “AMOK-1” system.

The third chapter contains the results of comprehensive laboratory and fire tests of the developed antipyrene system. Preparation of wood specimens (pine, birch) and application of the “AMOK-1” system were carried out in accordance with GOST 20022.6-93 by surface impregnation in two coats with an inter-coat drying interval of four hours. On the basis of a series of preliminary experiments, the composition of the “AMOK-1” system was optimised (mass %): orthophosphoric acid — 60 %, starch — 15 %, dicyandiamide — 9 %, urea — 7 %, potassium bicarbonate — 2 %, adhesive additive (PVA or silicate adhesive) — 10 %. The three-

component intumescent protection mechanism is elaborated: orthophosphoric acid as an acid catalyst initiates dehydration of starch and cellulose with formation of a carbonaceous scaffold; urea and dicyandiamide upon thermal decomposition release non-combustible gases (NH_3 , CO_2) that “inflate” the softened polymer layer; the cross-linked aminoformaldehyde matrix imparts mechanical stability to the foamed char. The expansion ratio reaches 10–15 times, and the maximum char-foam thickness amounts to 28 mm at a dicyandiamide concentration of 9 %. A comprehensive series of standard fire tests confirmed that all variants of “AMOK-1” belong to Fire-Protection Effectiveness Group I. According to GOST 16363-98, the mean mass loss of specimens is: PVA variant — 5.0 %, CMC variant — 5.7 %, silicate-adhesive variant — 7.1 % at a regulatory threshold of 9 % for Group I. Tests in accordance with DSTU 9330:2025 showed that no specimen exhibited independent combustion (self-sustained burning time: 0 s). The flame-spread index per DSTU 8829:2019 : for the PVA and CMC variants — $I = 0$ (non-flame-spreading), for the silicate-adhesive variant — $I = 3$ (slowly flame-spreading). Under DBN V.1.1-7-2016, treated specimens are classified in classes M2. Tests for determination of pyrolysis- and charring-zone dimensions in accordance with ISO 834 showed that the “AMOK-1” system reduces the char-layer depth of pine from 12 to 4 mm (threefold), the pyrolysis zone from 7 to 2 mm (3.5-fold); for birch: char layer from 8 to 2 mm (fourfold), pyrolysis zone from 4 to 1 mm (fourfold). The onset of intensive pyrolysis is shifted from 250–270 °C to 310–330 °C, providing an additional 2–3 minutes for evacuation of people and conduct of rescue operations. Of fundamental importance is the established fact of elimination of species-dependent differences: treated pine and birch specimens exhibit identical depths of destructive layers, which substantially simplifies fire-protection standardisation for different timber species. Scanning electron microscopy (SEM) confirmed the dependence of char-foam morphology on the type of adhesive additive. The PVA variant forms the most homogeneous elastic matrix with small, uniformly distributed pores and the best adhesion to the wood surface. CMC increases the compactness of the carbonaceous layer and reduces the peak heat-release rate by approximately 58 %. Silicate adhesive forms an inorganic–

organic matrix with enhanced thermal stability of the protective scaffold, but with somewhat less uniform intumescence. Mathematical modelling of the dependence of fire-protective effectiveness on antipyrene consumption was performed by the least-squares method. It is established that this dependence exhibits a pronounced quadratic (parabolic) character and is described by the equation $m = a - bR + cR^2$, where m is the specimen mass loss (%), R is the specific consumption of the agent (g/m^2), and a , b , c are regression coefficients. The existence of a well-defined minimum of the function confirms the existence of an optimal specific consumption at which maximum fire-protective effectiveness is achieved. For the PVA variant, the optimal consumption is approximately $300 \text{ g}/\text{m}^2$ at a minimum mass loss of 5.0 %. Consumption in excess of the optimum does not increase but rather decreases protective effectiveness owing to disruption of application uniformity and deterioration of intumescence conditions. This result constitutes the scientific basis for standardising the applied quantity of agent in two-coat wood treatment.

In the fourth chapter a complete, scientifically justified methodology for the practical application of the “AMOK-1” system is developed, compliant with the requirements of MIA Order No. 1064 “On Approval of Fire-Protection Rules” and DSTU 9314:2025. The methodology encompasses the full technological cycle from preparation of the composition to quality inspection of completed works and specifies all key process parameters.

A technological regulation for the manufacture of the “AMOK-1” system is developed, with a scientifically justified sequence for introducing seven components, accounting for the exothermic reactions between orthophosphoric acid and urea. Storage requirements for the finished composition are established: temperature not below $+5 \text{ }^\circ\text{C}$ in tightly sealed containers, with a guaranteed shelf life of 1 year. Quality-control parameters for the prepared mixture are justified: $\text{pH} = 3.5\text{--}4.5$, viscosity and consistency homogeneity.

The procedure for preparing the wood surface prior to treatment is regulated. The moisture content of wood before application must not exceed 15–20 %, the surface must be free of dust, oily contaminants and residues of old coatings. The

“AMOK-1” system is applied in two coats by brush or spray gun: the specific consumption per coat is approximately 150 g/m², total consumption — 300 g/m². A technological interval of 4 hours must be observed between coats at a temperature of 17–30 °C and a relative humidity of 45–80 %.

The curing regimes for the applied coating and the criteria for quality assessment of completed fire-protection works are defined. The quality-control system includes: verification of fire resistance of wood specimens after application — self-sustained burning time not less than 120 s; measurement of the penetration depth of active components; determination of coating water absorption and pH level. These parameters are mandatory acceptance criteria for completed fire-protection works in accordance with the requirements of DSTU 9291:2024.

Safety requirements for the manufacture and application of the system are formulated. Since orthophosphoric acid is a corrosively active substance, personal protective equipment for the respiratory tract and eyes, as well as specialised protective clothing, are required during handling. Measures for neutralisation of possible spills and disposal of production waste are stipulated.

An economic justification for the application of the “AMOK-1” system is provided. The cost price of 1 kg of the finished composition amounts to 82–111 UAH depending on market prices for the components; the cost of treating 1 m² of wood surface — 25–33 UAH. By comparison, certified market analogues cost 54–105 UAH/m², which is 2–3 times the cost of AMOK-1. The composition is based exclusively on domestically available industrial raw materials, eliminating dependence on imports and ensuring supply-chain stability — which is particularly important under wartime conditions. The research findings may be applied in the restoration of timber buildings damaged as a result of hostilities, in the updating of DSTU standards in the field of wood fire protection, in the educational process of higher educational institutions of fire-technical profile, and in implementation at enterprises of the construction industry and units of the Civil Protection Service of Ukraine.

Keywords: wood fire protection, antipyrène, intumescent coating, aminoformaldehyde resins, orthophosphoric acid, starch, char foam, fire-protective effectiveness, АМОК-1.

Список публікацій здобувача

Публікації

Основні результати дисертаційного дослідження викладено в 5 наукових публікаціях, у т.ч.:

Статті у міжнародних наукових виданнях і тих, що входять до міжнародних наукометричних баз (МНБ):

1. Balaniuk V. M., Slobodian V. I., & **Pikus, V. S.** (2025). Аналіз засобів поверхневого вогнезахисту для деревини. *Пожежна безпека*, 47, 5-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.01> **Категорія Б.** Збір та аналіз даних, формування задач, виклад основного матеріалу, обробка результатів.

2. Баланюк, В.М, & **Пикус, В.С.**, (2026). Механізм та методологія розроблення полімерної системи на основі аміноформальдегідних смол, для вогнезахисту деревини. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 361(1), 549-556. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-76>.

Категорія Б. Провів аналіз даних, формування задач, підготовка та аналіз матеріалів, виклад основного матеріалу, обробка результатів.

3. Баланюк, В.М, & **Пикус, В.С.**, (2026). Дослідження ефективності комплексної полімерної вогнезахисної системи на основі аміноформальдегідних смол. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 363(2), 118-124. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-15> **Категорія Б.**

Систематизував сучасний стан у сфері вогнезахисту деревини; брав участь у розробленні складу антипіренової суміші «АМОК-1» і провів оптимізацію

концентрації компонентів; виконав комплекс вогневих випробувань за ГОСТ 16363-98, ДСТУ 9330:2025, ДСТУ 8829:2019 і ДБН В.1.1-7-2016; проаналізував мікроструктуру спученого захисного шару.

4. Баланюк, В., Пикус, В., Гарасим'юк, О., Кудринська, К., Пастухов, П., та Копистинський, Ю. (2026). Визначення закономірностей зниження горючості деревини з урахуванням процесів горіння та термоокислювальної деструкції. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 2 (10 (140), 49–60. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.358178>. Видання входить до МНБ – **Scopus**. Провів підготовку експериментальних зразків, провів випробування, аналіз даних, формування висновків.

Матеріали конференцій:

5. Товщина піролізного шару деревини при вогнезахисті антипіреновою композицією комбінованої дії – Володимир БАЛАНЮК, Юрій КОПИСТИНСЬКИЙ, Василь СЛОБОДЯН, Остап ІВАЩИШИН, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, **Віктор ПИКУС**, НВЦ «Євростандарт», Олександр ГАРАСИМ'ЮК, Головне управління ДСНС України у м. Києві. Цивільний захист в умовах війни : збірник тез доповідей II Міжнародної науковопрактичної конференції, м. Львів, 15 квітня 2026 року. Львів: ЛДУБЖД, 2026. 395 с.

ЗМІСТ

ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ВОГНЕЗАХИСНИХ РЕЧОВИН	24
1.1. Терміни та визначення понять	27
1.2. Класифікація засобів вогнезахисту	29
1.3. Характеристика та класифікація антипіренів	31
1.4. Просочувальні вогнезахисні засоби	36
1.5. Фарби та лаки вогнезахисні	42
1.6. Вогнезахисне облицювання (екранування) і його ефективність	46
1.7. Стан нормативно-технічної бази з вогнезахисту деревини	49
1.8. Висновки за розділом	55
РОЗДІЛ 2. Основні напрями зниження горючості і підвищення біологічної стійкості деревини	56
2.1. Класифікація антисептиків	56
2.2. Особливості горіння і термоокисної деструкції деревини	57
2.3. Особливості дії на деревину природно-біологічних чинників	69
2.3.1. Особливості дії на деревину природних чинників.	70
2.3.2. Особливості дії на деревину небезпечних біологічних Чинників.	71
2.3.3. Особливості дії на деревину небезпечних ентомологічних чинників.	72
2.4. Аналіз ефективності просочувальних складів для вогнебіозахисту деревини	73
2.5. Сучасний стан проблеми вогнезахисту деревних матеріалів	77
2.5.1. Процеси розвитку горіння деревних матеріалів і шляху їх	

гальмування	78
2.5.2. Основні напрями підвищення вогнезахисної ефективності антипіренів для деревних матеріалів	84
2.5.3. Спосіб кризного просочення деревини в полі відцентрових сил	87
2.5.4. Спосіб просочення деревини в автоклавах під тиском	88
2.6. Механізм дії просочувальної суміші при поєднанні антипірену та антисептику	89
2.7. Інші види антисептиків	90
2.8. Застосування речовин	93
2.9. Висновки за розділом	95
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ КОМПЛЕКСНОЇ ПОЛІМЕРНОЇ АНТИПІРЕНОВОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ АМІНОФОРМАЛЬДЕГІДНОГО КОМПЛЕКСУ, МОДИФІКОВАНИХ ОРТОФОСФОРНОЮ КИСЛОТОЮ ТА КРОХМАЛЕМ «АМОК-1»	97
3.1. Підбір методів та підготовка зразків деревини для дослідження вогнезахисної ефективності комплексної полімерної антипіренової системи АМОК-1	98
3.2. Аналіз складу і концентрації компонентів рецептури АМОК-1	102
3.3. Опис реакцій і механізму дії вогнезахисного складу АМОК-1	104
3.4. Результати випробувань і досліджень	106
3.4.1. Визначення групи вогнезахисної ефективності згідно за ГОСТ 16363-98	107
3.4.2. Випробування на визначення межі поширення вогню	111
3.4.3. Визначення індексу поширення полум'я відповідно до ДСТУ 8829:2019	113
3.4.4. Випробування на визначення групи вогнезахисної ефективності згідно з ДСТУ 9330:2025	117
3.4.5. Випробування на визначення розміру зон піролізу та обуглення	126
3.5. Мікроструктурні особливості спученого вогнезахисного покриття на основі системи «АМОК-1»	131

3.6. Вплив на експлуатаційні характеристики цільових добавок	136
3.6.1. Вплив на експлуатаційні характеристики полівінілацетатного клею	137
3.6.2. Вплив на експлуатаційні характеристики силікатного клею (рідкого скла)	138
3.6.3. Вплив на експлуатаційні характеристики карбоксиметилцелюлози	139
3.7. Математичне моделювання вогнезахисної ефективності	140
3.7.1. Удосконалена квадратична модель залежності $m = f(R)$.	140
3.7.2. Результати експериментальних досліджень та верифікація моделі	142
3.7.3. Аналіз впливу концентрації компонентів на вогнезахисну ефективність	144
3.8. Висновки за розділом	150
РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКА ЕФЕКТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ АНТИПІРЕНОВОЇ КОМПОЗИЦІЇ АМОК-1 ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЦЕЛЮЛОЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ	153
4.1. Загальні положення та характеристика антипіренової композиції АМОК-1	154
4.2. Методика виготовлення антипіренової композиції АМОК-1	155
4.3. Умови та терміни зберігання композиції АМОК-1	156
4.4. Методика підготовки поверхні перед обробленням	157
4.5. Методика нанесення антипіренової композиції АМОК-1	158
4.6. Режими оброблення та висушування	159
4.7. Контроль якості оброблення та оцінка ефективності	160
4.8. Вимоги безпеки при виготовленні та застосуванні композиції	161
4.9. Економічне обґрунтування застосування антипіренової композиції АМОК-1	163
4.10. Висновки за розділом 4	165

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	168
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	172
Додатки	191

Вступ

Актуальність теми дослідження. Проблема підвищення рівня пожежної безпеки будівель в Україні залишається надзвичайно актуальною. За 2024 рік зареєстровано 105214 пожеж (+54,9 % відносно 2023 року), унаслідок яких загинуло 1521 осіб. Коефіцієнт смертності від пожеж в Україні (3,3 особи на 100 пожеж) у 10–33 рази перевищує показники країн ЄС (0,1–0,3 особи). Понад 51,9 % пожеж спричиняє необережне поводження з вогнем, а основним горючим матеріалом у більшості будівель є деревина.

Деревина - відновлюваний будівельний матеріал із видатними фізико-механічними властивостями - є водночас одним із найпожежонебезпечніших матеріалів: температура її займання становить 250–270 °С, а швидкість поширення полум'я по поверхні досягає 1–3 м/хв. Традиційні засоби вогнезахисту (сольові антипірени, поверхневі просочення) мають обмежений термін дії (1–3 роки) і не забезпечують стабільного захисту протягом усього терміну експлуатації конструкції. Сертифіковані інтумесцентні аналоги закордонного виробництва коштують 54–105 грн/м², що значно обмежує їх масове застосування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконано на кафедрі техногенної безпеки та безпеки будівельних конструкцій Національного університету цивільного захисту України в межах науково-дослідної теми: «Підвищення ефективності засобів вогнезахисту будівельних конструкцій та матеріалів» (держреєстраційний номер: уточнюється). Окремі аспекти дослідження відповідають положенням Стратегії пожежної безпеки України до 2030 року та завданням гармонізації національної нормативної бази з вимогами ЄС (ДСТУ EN 13381, ISO 834).

Мета дослідження – розробити, теоретично обґрунтувати та експериментально підтвердити ефективність комплексної полімерної антипіренової системи «АМОК-1» на основі аміноформальдегідного комплексу, модифікованих ортофосфорною кислотою та крохмалем, для вогнезахисту деревини та целюлозовмісних матеріалів, а також розробити науково обґрунтовану методику її практичного застосування.

Завдання дослідження:

1. Провести комплексний аналіз та систематизацію сучасних засобів поверхневого вогнезахисту деревини, їх складу, механізму дії, ефективності та нормативно-технічної бази України.

2. Вивчити кінетику горіння та термоокислювальної деструкції деревини, встановити теоретичні передумови для застосування фосфорно-азотних інтумесцентних систем.

3. Розробити оптимальний склад системи «АМОК-1», встановити концентрації компонентів і дослідити механізм інтумесцентного захисту.

4. Провести комплекс стандартних вогневих випробувань (ГОСТ 16363-98, ДСТУ 9330:2025, ДСТУ 8829:2019, ДБН В.1.1-7-2016, ISO 834) та визначити групу вогнезахисної ефективності і індекс поширення полум'я.

5. Здійснити мікроструктурний аналіз спученого захисного шару залежно від типу клейової добавки та побудувати математичну модель залежності ефективності від витрати антипірену.

6. Розробити науково обґрунтовану методику виготовлення, зберігання та нанесення «АМОК-1» і провести економічне обґрунтування.

Об'єкт дослідження – процеси зниження горючості та підвищення вогнезахисної ефективності деревини і целюлозовмісних матеріалів шляхом застосування інтумесцентних вогнезахисних покриттів на полімерній основі.

Предмет дослідження – комплексна полімерна антипіренова система «АМОК-1» на основі аміноформальдегідного комплексу, його склад, механізм інтумесцентної дії, вогнезахисна ефективність та методологія практичного застосування.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використано: системний аналіз і аналіз наукових і нормативних джерел; стандартні вогневі випробування (ГОСТ 16363-98, ДСТУ 9330:2025, ДСТУ 8829:2019, ДБН В.1.1-7-2016, ISO 834); мікроструктурний аналіз (SEM) спученого захисного шару; термогравіметричний аналіз (ТГА) зразків деревини; математичне моделювання методом найменших квадратів (регресійні криві залежності ефективності від складу та витрати); порівняльний економічний аналіз. Під час проведення експериментальних досліджень застосовувалось метрологічно-атестоване обладнання та калібровані і повірені засоби вимірювання. Аналіз та обробка результатів експериментів здійснювалась із використанням програмного забезпечення Microsoft Office Excel. Також для обробки результатів експериментальних досліджень використана удосконалена квадратична модель.

Наукова новизна даного дослідження полягає у встановленні чинників, які впливають на горючість деревини з врахуванням особливостей її горіння і термоокисної деструкції на основі порівнянні параметрів шарів піролізу та обуглення оброблених та необроблених вогнезахисною композицією зразків деревини та розроблені на основі цього комплексної полімерної фосфорно-азотної антипіренової системи з підвищеною ефективністю вогнезахисту деревини та целюлозовмісних матеріалів.

При цьому

- *вперше* виявлено закономірність, яка полягає у тому, що товщини шарів обуглення та піролізу у оброблених вогнезахисною композицією зразків практично не залежить від породи деревини та є майже однаковими для породи з меншою та більшою густиною. Також встановлено умови ефективного вогнезахисту поверхні деревини, які полягають у комбінованій дії – блокуванні

дифузійних потоків від поверхні деревини та встановленню теплового пінококсового бар'єру на її поверхні, що вказує та визначає умови розроблення більш ефективних засобів вогнезахисту деревини з максимальною захисною здатністю її поверхні від вогневого впливу при її горінні.

- *вперше* розроблено та теоретично обґрунтовано новий склад комплексної полімерної антипіренової системи «АМОК-1» на основі аміноформальдегідного комплексу. На відміну від відомих систем, «АМОК-1» поєднує функції кислотного каталізатора, вуглецевого донора і газоутворювача в єдиній полімерній матриці, що забезпечує синергічний вогнезахисний ефект, який полягає у формуванні стійкого пінококсового шару та блокуванні газових потоків від поверхні деревини.

Набули подальшого розвитку

1. Теоретичні уявлення про механізм дії просочувальних вогнезахисних засобів: встановлено взаємозв'язок між глибиною просочення та зменшенням зон піролізу й обвуглення. Обробка «АМОК-1» зменшує глибину вуглистого шару сосни з 12 до 4 мм (у 3 рази), берези - з 8 до 2 мм (у 4 рази); початок інтенсивного піролізу зміщується з 250–270 °С до 310–330 °С.

2. Теоретичні уявлення про механізм горіння деревини як двостадійний процес: полум'яне горіння газоподібних продуктів піролізу (250–450 °С, 55–60 % загального тепловиділення) та гетерогенне окислення вуглистого залишку (750–850 °С, 40–45 % тепловиділення). Швидкість перевуглювання в реальних умовах становить 0,1–0,2 мм/хв; середня глибина піролізного шару - 15–25 мм для сосни і 18–25 мм для берези.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому що враховуючи наукові результати було розроблено готову до виробництва та експлуатації антипіренову систему «АМОК-1», яка за результатами стандартних випробувань (ГОСТ 16363-98, ДСТУ 9330:2025) підтвердила І групу вогнезахисної ефективності (середня втрата маси 5,0 % при нормі ≤ 9 %), індекс поширення полум'я $I = 0$ (для варіанту з ПВА) та відповідає вимогам ДБН В.1.1-7-2016 (група М2). Розроблено детальну методику виготовлення,

зберігання та нанесення «АМОК-1», що відповідає вимогам Наказу МВС № 1064 і ДСТУ 9314:2025 та може бути безпосередньо впроваджена на підприємствах будівельної галузі, у підрозділах пожежно-рятувальних служб та організаціях, що виконують вогнезахисні роботи. Здійснено економічне обґрунтування собівартості 1 кг «АМОК-1» яка становить 82–111 грн, а вартість оброблення 1 м² - 25–33 грн, що у 2–3 рази нижче за ринкові сертифіковані аналоги (54–105 грн/м²). Склад побудовано майже виключно на доступній вітчизняній сировині, що усуває залежність від імпорту. Результати дослідження були впровадженні в діяльність ТЗОВ Компанія «ВСЕСВІТ КОМФОРТУ» та ФОП Стефанія Величко та інш, Акти про впровадження результатів роботи від 15.04.2026 року.

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків за кожним розділом, загальних висновків, списку використаних джерел (148 найменувань) та додатків. Загальний обсяг роботи - 198 сторінок основного тексту, 40 рисунків, 22 таблиці.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ВОГНЕЗАХИСНИХ РЕЧОВИН

Проблема підвищення рівня пожежної безпеки будівель в Україні залишається надзвичайно актуальною. За 2024 рік в державі зареєстровано 105214 пожеж (+54,9% відносно 2023 року), унаслідок яких загинула 1521 людина [Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України. [1]. Значною мірою таке зростання пов'язане з активними бойовими діями, проте це не знижує актуальності проблеми підвищення рівня пожежної безпеки об'єктів будівництва. Про високий рівень пожежної небезпеки в Україні свідчать дані офіційної світової пожежної статистики. Якщо в Україні у 2014 році у розрахунку на 100 пожеж унаслідок пожежі гинуло близько 3,3 особи, то у США – 0,3, Великобританії – 0,2, Франції та Нідерландах – 0,1 (найвищі показники) [2]. З метою зменшення пожежної небезпеки удосконалюється та оновлюється законодавство держави щодо протипожежного стану, а також посилено вимоги будівельних норм, державних стандартів і правил пожежної безпеки. Сучасні нормативні документи передбачають жорсткіші критерії до вибору матеріалів, методів вогнезахисту та контролю їх ефективності на всіх етапах проектування і експлуатації будівель. Основну частину матеріальних втрат спричиняє руйнування будівельних конструкцій під дією високих температур. Дерев'яні елементи, що зберігають міцність десятиліттями, при пожежі можуть втратити несучу здатність за лічені хвилини. Це не лише ускладнює евакуацію людей, але й робить гасіння вогню малоефективним. Тому одним із ключових напрямів підвищення пожежної стійкості будівель є вогнезахист матеріалів. За статистикою, понад половину пожеж (51,9%) спричиняє необережне

поводження з вогнем, ще близько 22% - порушення правил експлуатації електрообладнання людей [3]. У більшості випадків займання відбувається через контакт малокалорійних джерел із горючими матеріалами, зокрема деревиною. Хоча деревина має низку переваг - високу міцність, малу щільність, легкість обробки, морозостійкість і хімічну стійкість, - вона залишається одним із найпожежонебезпечніших матеріалів. Займистість деревини залишається суттєвою проблемою, особливо в будівельних та інфраструктурних проєктах [4]. Для зменшення її горючості застосовують просочення, лаки, фарби та обмазки, що підвищують межу займання. Проте навіть оброблена деревина не є повністю вогнестійкою. Сучасні вогнезахисні склади, зокрема терморозширювальні покриття, дозволяють знизити інтенсивність горіння, димоутворення та токсичність продуктів згорання. Вогнестійкі покриття є ефективним вибором для вогнезахисту, але їх широке застосування через високу вартість [5]. Отже, дослідження впливу вогнезахисних засобів на пожежно-технічні характеристики деревини й прогнозування її поведінки під час пожежі є актуальним науковим завданням, важливим для підвищення безпеки будівельних об'єктів. У роботі розглянуто актуальну проблему забезпечення належного рівня вогнестійкості деревини за допомогою поверхневих засобів вогнезахисту. Деревина, як природний і відновлюваний будівельний матеріал, має низку переваг - екологічність, легкість оброблення, естетичність, - проте її горючість істотно підвищує рівень її пожежної небезпеки. Саме тому питання підвищення її вогнестійкості залишається одним із важливих напрямків сфери пожежної безпеки. У роботі проведено ґрунтовний аналіз вітчизняних і зарубіжних досліджень, присвячених засобам поверхневого вогнезахисту деревини, їх складу, механізму дії, ефективності та експлуатаційним характеристикам. Метою дослідження є проведення комплексного аналізу існуючих засобів вогнезахисту деревини, визначення найбільш ефективних, а також розроблення теоретичних основ для нового вогнезахисного складу, який би забезпечував глибше просочення деревини, утворення товстішого шару пінококсу при впливі високих температур та мав

покращені експлуатаційні властивості. У ході аналізу встановлено, що більшість традиційних покриттів, мають обмежений термін дії та втрачають ефективність під впливом атмосферних факторів. У той же час сучасні інтумесцентні покриття, що утворюють спінений вуглецевий шар при нагріванні, демонструють вищі показники захисту. Наукова новизна роботи полягає у систематизації сучасних підходів до поверхневого вогнезахисту деревини та формуванні теоретичних передумов для створення нового комбінованого складу покриття, здатного одночасно забезпечити глибше проникнення активних компонентів у структуру деревини та формування стійкого до руйнування шару пінококсу. Отримані результати дослідження мають практичне значення для подальшого вдосконалення технологій вогнезахисту дерев'яних конструкцій та розроблення нових складів покриттів. Запропоновані напрямки можуть бути використані у виробництві сучасних екологічно безпечних матеріалів, здатних забезпечити тривалий захист деревини без втрати її декоративних і фізико-механічних властивостей. Зниження горючості деревини є ключовою сферою досліджень та розробок, що використовує різні підходи для підвищення пожежної безпеки конструкцій та виробів [6]. Потреба в вогнезахисних хімікатах для деревини є критично важливою через зростаючий попит на екологічно чисті будівельні матеріали. Ефективні вогнезахисні обробки повинні бути постійними та не впливати на довговічність чи механічні властивості деревини. Крім того, вони повинні бути нетоксичними та мінімізувати утворення диму. Таким чином, розробка екологічно чистих та безпечних для здоров'я обробок деревини, стійких до вилуговування, має значне економічне та соціальне значення [7]. Ефективним способом зниження горючості деревини є обробка її вогнезахисними матеріалами, різновидами якої є поверхневе та глибоке просочування антипіренами. Поверхневе просочування дозволяє перевести деревину до групи важкозаймистих матеріалів, а глибоке просочування - до групи важкогорючих матеріалів. Однак глибоке просочування можна застосувати тільки до нових дерев'яних конструкцій. До того ж ці операції пов'язані з використанням

вакууму або надлишкового тиску і потребують складного спеціального обладнання. Технологічний процес триває декілька діб, а вартість вогнезахищеної деревини надто висока.

Варто зазначити, що деревина в процесі експлуатації стає більш пожежонебезпечною. У дослідженні [8] було виявлено, що вогневі властивості сильно залежать від щільності та структури волокон деревини. Отже, пухка структура, що утворюється в результаті вивітрювання та старіння, горить швидше, має низький час займання та виробляє більше тепла. Можна додати, що чим більший поперечний переріз, тим більша вогнестійкість як для балок, так і для колон [9]. Автори [10] у своєму дослідженні використали CiteSpace для проведення візуального аналізу 514 дослідницьких статей про вогнестійкість дерев'яних конструкцій з бази даних Web of Science за період з 2021 по 2024 рік. Результати дослідження показали, що галузь досліджень вогнестійкості дерев'яних конструкцій не отримала достатньої уваги, але зі збільшенням дослідницької діяльності та посиленням міжнародної співпраці очікується значний технологічний прогрес; Кластерний аналіз з використанням CiteSpace виділив швидкість обвуглювання як ключове питання в дослідженнях вогнестійкості деревини, підкресливши важливість поведінки термічної деградації та оцінки вогнестійкості; Швидкість обвуглювання деревини була критичним показником її вогнестійкості, на який значно впливають фізичні властивості та зовнішні умови навколишнього середовища.

1.1 Терміни та визначення понять

Згідно з Наказом МВС № 1064 від 26.12.2018 «Про затвердження Правил з вогнезахисту» [11].

вогнезахисний засіб (далі - ВЗ) - вогнезахисна речовина (суміш, фарба, штукатурка, штучний виріб або листовий (рулонний) матеріал), яка за своїми властивостями придатна для вогнезахисту;

вогнезахисна ефективність (здатність) - властивість ВЗ щодо підвищення вогнестійкості та/або зниження показників пожежної небезпеки об'єкта вогнезахисту;

вогнезахисне обробляння - спеціальне обробляння матеріалу, конструкції, виробу з метою їх вогнезахисту;

вогнезахисне облицювання - шар одиничних, листових або рулонних ВЗ, змонтований на поверхні об'єкта вогнезахисту за допомогою кріпильних елементів або клейових складів;

вогнезахисне просочування - шар ВЗ, що утримується у товщі об'єкта вогнезахисту;

вогнезахисний екран - екран, що змонтований з одиничних, листових або рулонних ВЗ безпосередньо біля об'єкта вогнезахисту;

вогнезахисний покрив - шар ВЗ, що утворюється безпосередньо на поверхні об'єкта вогнезахисту та утримується за рахунок адгезійних властивостей ВЗ;

вогнезахист - зниження показників пожежної небезпечності матеріалу (тканина, папір, очерет, облицювальні та оздоблювальні будівельні матеріали, сценічні декорації) або підвищення вогнестійкості конструкції (несучі та огорожувальні будівельні конструкції будинків і споруд) чи виробу (повітроводи, проходки, електричні кабелі);

Біостійкість – здатність матеріалів чинити опір впливу біологічних процесів, які виникають при експлуатації матеріалів у спорудах.

Вогнезахисний засіб - речовина (суміш речовин) або матеріал, що спеціально призначені для вогнезахисної обробки деревини.

Інгібітор горіння - речовина або суміш, дія якої в разі введення її в зону горіння полягає переважно в гальмуванні окисно-відновних реакцій горіння шляхом хімічної нейтралізації активних радикалів полум'я.

Корозія - довільне руйнування матеріалів, викликане хімічними та електрохімічними процесами, що проходять у них при взаємодії з зовнішнім середовищем.

Флегматизатор - речовина, здатна в разі введення її до горючого середовища за певних умов перетворювати його на негорюче.

Хімічна активність - реакційна здатність при взаємодії із іншими матеріалами.

1.2 Класифікація засобів вогнезахисту

Згідно з Наказом МВС № 1064 від 26.12.2018 «Про затвердження Правил з вогнезахисту» [11].

Залежно від складу та властивостей ВЗ поділяються на:

просочувальні вогнезахисні речовини - розчини антипіренів в органічних або неорганічних рідинах, які проникають (просочуються) у товщу об'єкта вогнезахисту (постачаються готовими до застосування);

суміші для просочувальних вогнезахисних речовин - один чи декілька компонентів, з яких перед застосуванням готується робочий розчин шляхом розчинення суміші в органічних або неорганічних рідинах до необхідної концентрації;

фарби вогнезахисні - однорідні суспензії пігментів й антипіренів у плівкоутворювальних речовинах (включають наповнювачі, розчинники, пластифікатори, отверджувачі та інші речовини), що утворюють на поверхні об'єкта вогнезахисту тонку непрозору плівку, яка під впливом високих температур збільшується у розмірах (спучується) з утворенням коксового теплоізолювального шару;

лаки вогнезахисні - розчини (емульсії) плівкоутворювальних речовин на органічній або водній основі, що містять антипірени (в тому числі

пластифікатори, отверджувачі) й утворюють на поверхні об'єкта вогнезахисту тонку прозору плівку, яка під впливом високих температур збільшується у розмірах (спучується) з утворенням коксового теплоізолювального шару;

пасти (обмазки) вогнезахисні - композиції, однорідні суспензії пігментів й антипіренів у плівкоутворювальних речовинах (включають наповнювачі, розчинники, пластифікатори, отверджувачі та інші речовини), що утворюють на поверхні об'єкта вогнезахисту тонку непрозору плівку, яка під впливом високих температур збільшується у розмірах (спучується) з утворенням коксового теплоізолювального шару, та мають пастоподібну консистенцію;

штукатурки вогнезахисні - штукатурні суміші з комплексом спеціальних добавок для підвищення їх теплоізоляційних та адгезійних властивостей;

облицювальні ВЗ - одиничні вироби, листові та рулонні матеріали, які монтуються безпосередньо на поверхні об'єкта вогнезахисту або поруч з об'єктом вогнезахисту (екранування) з урахуванням вимог Регламенту;

вогнезахисні вироби - штучні або погонажні вироби (протипожежні муфти, вогнезахисні піни, замазки, ущільнювачі), які застосовуються для захисту місць проходок, а також щілин і прорізів у будівельних конструкціях з нормованими класами вогнестійкості та у місцях їх стиків.

Залежно від методів захисту ВЗ поділяються на пасивні та реактивні. До пасивних належать ВЗ, які під час температурного впливу не змінюють своїх розмірів, а їхня вогнезахисна ефективність забезпечується завдяки теплофізичним властивостям (просочувальні та облицювальні ВЗ, штукатурки, пасти (обмазки), вогнезахисні вироби). До реактивних належать тонкошарові ВЗ (фарби, лаки, пасти (обмазки), що спучуються), які під час температурного впливу внаслідок хімічних реакцій значно збільшуються у розмірах (спучуються) з утворенням коксового теплоізолювального шару, що захищає об'єкт вогнезахисту від високотемпературного впливу. Залежно від товщини нанесення ВЗ поділяються на тонкошарові (з товщиною шару до 3 мм включно)

та товстошарові (з товщиною шару більше 3 мм). Залежно від умов експлуатації ВЗ поділяються на призначені для експлуатування на відкритому повітрі (під впливом атмосферних факторів), під навісом, у закритому неопалюваному приміщенні (без штучно регульованих кліматичних умов, де коливання температури й вологості повітря істотно менше, ніж на відкритому повітрі), у закритому опалюваному приміщенні з кліматичними умовами, що штучно регулюються, температурою вище 0 °С й відносною вологістю повітря не більше 70 %, а також в інших спеціальних умовах (агресивне середовище, підвищена вібрація).

1.3 Характеристика та класифікація антипіренів

Антипірени - речовини, що ускладнюють займання матеріалів та знижують швидкість поширення полум'я. Антипірени надають матеріалам вогнестійкості, а також припиняють доступ кисню до вкритих ними поверхонь. Як антипірени найбільш часто використовуються ефіри фосфорних кислот, похідні сурми, хлоровані парафіни, борат цинку, сульфат амонію, бура, борна кислота, рідке скло, переробки фосфоритів з сульфатними згущувачами [12], бромовані аліфатичні ефіри, пропорції силікату натрію та біовугілля [13] та синергічні суміші. Такі речовини, як фосфат амонію, сульфат амонію, хлорид цинку, тетраборат натрію та борна кислота, є найпоширенішими антипіренами [12].

Принцип дії антипіренів чітко описує Фрідман [15]. Він визначає 4 механізми. По-перше, вони сприяють утворенню вугілля, що зменшує утворення легкозаймистих газів; по-друге, вони вивільняють гази, що сприяють уповільненню реакції горіння газоподібних речовин; по-третє, вони зазнають ендотермічного розкладання, зменшуючи тепло, необхідне для горіння речовини, і по-четверте, вони утворюють ізоляційний шар вугілля на поверхні горючого матеріалу.

Хімічна обробка деревини антипіренами широко вважається одним з найефективніших методів посилення її захисту від вогню та впливу водних середовищ [16,17]. Хімічна обробка речовинами, такими як поліфосфат амонію та меламін, ефективно знижують горючість деревини. Ці покриття розширюються під впливом тепла, утворюючи захисний бар'єр, який ізолює деревину від полум'я та теплопередачі [18]. Хімічна обробка може надати деревині вогнезахисні властивості, значно зменшуючи її займистість та покращуючи її вогнестійкість. Це досягається за допомогою таких механізмів, як утворення захисного шару обуглювання або виділення газів, що гальмують полум'я [19].

Останнім часом дослідники приділяють значну увагу фосфорвмісним сполукам, оскільки вони відповідають екологічним стандартам для вогнезахисних речовин. Одна з цих речовин, діамоній гідрогенфосфат, фосфорно-азотна сполука, може бути використана для покращення вогнестійкості полімерів. Крім того, діамоній гідрогенфосфат, має малу щільність диму та високу ефективність у вогнестійкості [20]. Карбонат калію також ефективний як антипірен через ряд властивостей. Зокрема, висока вогнезахисна ефективність, висока розчинність у воді, фунгіцидну дію, низьку корозійну активність до заліза та незначний шкідливий вплив на людей і тварин [21,22]. Додавання діоксиду цирконію може суттєво покращити не тільки вогнезахисні властивості покриття, а й його стійкість до різних середовищ та термін експлуатації. До такого висновку прийшов Карімзаде [23]. Для дослідження було синтезовано наночастинки діоксиду цирконію з використанням металоорганічного комплексу металоцену та використано для приготування покриттів для захисту деревини. Різні кількості наноматеріалу ZrO_2 (0, 1, 3 та 5%) було додано до акрилової фарби та використано як покриття для деревини. Вогнестійкі властивості чистої та покритої деревини досліджували методом вертикального випалювання. Також було досліджено стійкість усіх зразків деревини до набухання та деградації під

впливом різних середовищ, включаючи нейтральне, кисле та лужне середовища. Результати показали, що деревина, покрита акриловим покриттям, що містить 5% ZrO_2 , мала найвищі вогнестійкі властивості, оскільки вона взагалі не горіла, що підтверджує ефективну роль додавання ZrO_2 до покриття, яке значно зменшило час займання та швидкість поширення полум'я, особливо при вищих концентраціях (наприклад, 5%). Покращена вогнестійка властивість пояснюється утворенням захисного шару вугілля, підвищеною термічною стабільністю та каталітичним ефектом ZrO_2 , що зменшує кількість летких горючих газів під час горіння. Крім того, деревина, покрита 1, 2 та 3 шарами акрилової фарби, що містить ZrO_2 , продемонструвала найвищу стійкість до набухання або деградації в розчинах з нейтральним, кислим та лужним значеннями рН. Середні кути змочування води для необробленої деревини та оптимальної деревини, покритої 3 шарами 5% ZrO_2 / акрилової фарби, становили $48,95^\circ$ та $64,45^\circ$, що підтверджує, що оптимально покрита дерев'яна поверхня має нижчу гідрофільність, ніж у необробленої деревини, що було вигідно та призводило до меншого поглинання води/рідини та меншого набухання/деградації. Крім того, деревина з ідеальним покриттям 5% ZrO_2 / фарбою мала високу довготривалу стабільність за різних умов (різні співвідношення вологості та різні температури). Таким чином, додавання наночастинок ZrO_2 до акрилового покриття дуже доцільне. Це допоможе створити ефективні покриття для захисту деревини та збільшити її довговічність для промислового, будівельного та побутового використання.

Також існують антипірени, створені на основі біомаси та інших органічних сполук. Багато науковців здійснювали дослідження в цій галузі. Для цього вони використовували різні органічні речовини. Гебке та ін. [24] модифікували пшеничний крохмаль. Вони використовували типовий метод реакції фосфат/сечовина як вогнезахисну добавку до деревної целюлози для модифікації. Результати показали, що модифіковані крохмалем вогнезахисні речовини здатні відповідати вогнестійкості промислових вогнезахисних

речовин, що зараз використовуються на ринку деревної целюлози. В результаті функціоналізації було додано вогнестійкі фосфати до 38 мас.% та азотні групи до 8,3 мас.%. Коли в експериментах з горінням використовувалися розчинні добавки, найнижчі показники горіння були зафіксовані при вмісті фосфатів 3,5 мас.%. У порівнянні з деревною целюлозою, яка не була оброблена, ефекти тління можуть бути значно зменшені. Результати експерименту показують, що вогнезахисні речовини на основі крохмалю є принципово застосовними для обробки деревини. Уддін та ін. [25] поєднали хітозан (CS), наноцелюлозу та борну кислоту (BA) у прозорій гібридній плівці. Результати показали, що спільне використання хітозану та борної кислоти призвело до покращеної вогнестійкості. Однак вони стали самозатухаючими при поєднанні з 30 мас.% борної кислоти. Хітозан додали до целюлози для спостереження синергетичного вогнезахисного ефекту. За відсутності борної кислоти плівки з хітозанових целюлозних нановолокнистих матеріалів (CS-CNF) демонстрували самозатухаючі та вогнезахисні властивості, що вказує на перевагу додавання хітозану. Крім того, додавання борної кислоти підвищило термічну стабільність плівок CS, CNF та CS-CNF і покращило утворення вуглецю. Було показано, що хітозан та борна кислота демонструють чудовий синергетичний вогнезахисний ефект. Чжоу та ін. [19] досліджували композитні покриття на основі хітозану/фітату натрію/наночастинок TiO₂ - ZnO (CH/SP/Nano- TiO₂- ZnO), які наносилися на дерев'яні поверхні методом пошарового самоскладання. Ефективний комбінований ефект між окремими компонентами покриття призвів до чудових вогнезахисних властивостей покриття. Експериментальні результати показують, що вогнезахисне покриття має ефективну спучувальну вогнезахисну систему та фізичний бар'єр. Цей експеримент показує, що хітозан також може демонструвати чудову синергетичну вогнезахисну здатність з оксидами металів. Вимоги до антипіренів полягають у тому, що вони повинні перешкоджати горінню і тлінню захищеного матеріалу, не викликати корозії металевих частин, забезпечувати довготривалість дії, не підвищувати гігроскопічних властивостей

деревини, не бути токсичними для людей і тварин, не впливати на лакофарбові покриття, нанесені на деревину, що піддається обробці, забезпечувати самостійно або спільно з антисептиками, введеними в один розчин, біостійкість просочуваного матеріалу, не створювати труднощів під час механічної обробки матеріалу та не погіршувати властивостей просочуваного матеріалу.

Таблиця 1.1. - Характеристики поширених антипіренів

Антипірен	Механізм дії	Переваги	Недоліки
Фосфати (амонійфосфати, поліфосфати)	Утворення вуглецевого шару, пригнічення полум'я	Ефективні, низька токсичність	Вивітрювання та вимивання, чутливі до вологи
Борати (бура, борна кислота)	Гальмування тління, інгібіція полум'я	Біозахисні, стабільні	Вимивання, відносно недовгий час вогнезахисної ефективності
Силікатні	Формування захисного мінерального шару	Стійкі до вологи, вивітрювання і температур, довговічні	Неглибоке просочення

Наведені в таблиці 1.1 антипірени відрізняються за хімічним складом, механізмом дії та ефективністю вогнезахисту. Їх вибір залежить від типу оброблюваного матеріалу, умов експлуатації та необхідного рівня вогнестійкості. Найпоширеніші з них забезпечують як уповільнення займання,

так і формування захисного шару, що знижує швидкість поширення полум'я та теплового впливу.

1.4 Просочувальні вогнезахисні засоби

Просочувальні вогнезахисні засоби є одним із найпоширеніших методів зниження горючості деревини. Їхня дія ґрунтується на глибокому проникненні в структуру матеріалу спеціальних антипіренів - речовин, які при нагріванні утворюють негорючі продукти, що перешкоджають термічному розкладанню та поширенню полум'я. Таке оброблення не змінює фізико-механічних властивостей основи, зберігає її природний вигляд і не потребує складного технологічного обладнання, що робить метод зручним у застосуванні. Завдяки поєднанню методів вогнезахисту, вогнестійкість та біозахист деревини можна збільшити в кілька разів [26].

Ефективність вогнезахисту залежить від багатьох факторів, зокрема: хімічного складу вогнезахисного засобу, способу його нанесення, здатності засобу до ефективного проникнення в деревину, вологості деревини, розподілу засобу по деревині та глибини просочування, а також від перевірки відповідності вогнезахисту та часу експлуатації вогнезахисту [27].

Антипірени вводяться в деревину різними способами: просоченням в автоклавах, у гарячо-холодних ваннах або шляхом поверхневої обробки - нанесенням розчину пензлем чи фарбопультром. Просочення в автоклавах забезпечує найглибше проникнення вогнезахисного складу в структуру деревини, що гарантує високу тривалість захисної дії та стабільність властивостей у складних умовах експлуатації. Проте цей метод потребує спеціального обладнання, енерговитратний і використовується переважно в промислових умовах.

Метод гарячо-холодних ванн є простішим у реалізації та дозволяє досягти значної глибини просочення завдяки чергуванню термічного розширення і стиснення повітря в порах деревини, однак вимагає контролю температурного режиму й придатний переважно для невеликих партій матеріалу. Поверхнева обробка (нанесення пензлем або фарбопультотом) є найбільш доступним і швидким способом, який не потребує складного устаткування. Вона забезпечує утворення захисного шару на поверхні матеріалу, проте не гарантує глибокого проникнення антипіренів і потребує періодичного оновлення покриття, особливо за умов підвищеної вологості чи механічного впливу.

Вернер та ін. [28] досліджували ефективність просочування деревини деякими антипіренами. Дослідження показало, що вогнезахисну ефективність деревини при дворазовому нанесенні розчину забезпечує лише покриття деревини меламінполіфосфатом. Обробка деревини водними розчинами борної кислоти, гідроксиду алюмінію та меламінполіфосфату (магнійфосфату) вимагає багаторазового покриття цими вогнезахисними речовинами. Розробляються вогнезахисні просочувальні речовини на основі біозахисних засобів, що робить їх універсальними та доцільними. Наприклад, Сіврікая та ін. [29] досліджували ефективність обробки сосни сумішшю сорбітол-лимонної кислоти та антипіренів діамоній гідрофосфату та карбонат калію, пропорцією 1:2. Калориметр втрати маси показав, цей розчин значно покращив вогнестійкість, знизивши пікову швидкість виділення тепла на 65% та загальне виділення тепла протягом 600 с на 82% порівняно з необробленою деревиною. Поєднання сорбітол-лимонної кислоти та антипіренів діамоній гідрофосфату та карбонат калію сприяло утворенню обуглення та продемонструвало потенційну вогнестійкість для модифікованої деревини сосни звичайної. Інші дослідники [30] вивчали біо- вогнезахисний засіб на основі меламінформальдегідної смоли, яка визнана своєю ефективністю у підвищенні стійкості до організмів, що руйнують дерево та зменшенні набухання від вологи. В ролі антипірена

виступає фосфорний поліол. Результати показали, що суміш цих речовин можуть проникати через клітинну стінку деревини та осідати всередині дерев'яної конструкції. Після процесу прискореного старіння, зразок, оброблений лише фосфорним поліолом, не володіє вогнезахисними властивостями, тоді як часткове збереження вогнезахисних ознак фіксується на тому зразку, який оброблений сумішшю антипірену та мела́нформальдегідною смолою. Комбінована обробка продемонструвала значне покращення горючості та зменшення виділення тепла, а також подовжила строк придатності вогнезахисного оброблення.

Ван та ін. [31] покращували вогнезахисний засіб, синтезованого на основі вольфрамної олії. Така речовина продемонструвала чудові вогнезахисні властивості. Крім того, оброблена деревина демонструвала значно вищу стійкість до грибків та гниття. Ці результати дають цінну інформацію для раціонального проектування покриттів на основі тунгової олії, забезпечуючи покращений захист деревини, стале використання ресурсів та зниження ризиків для здоров'я та навколишнього середовища.

Вагомим недоліком просочувальних вогнезахисних речовин є відносно недовгий строк придатності вогнегасного просочення. Строк придатності вогнезахисного просочування. В умовах високої конкуренції вогнезахисних засобів суб'єкти господарювання все частіше здійснюють заміну вогнезахисного засобу при повторних роботах з вогнезахисту, що призводить до виникнення антагонізму їх властивостей [32].

Корнієнко та ін. [33] досліджували строки придатності вогнезахисних просочень для деревини. Об'єктом досліджень у цій роботі були вогнезахисні речовини «БС-13», «АЛАНА», «ЕСОСЕПТ 450-1», «Неомид 450-1», предметом дослідження - вплив терміну зберігання в неопалювальних приміщеннях зразків деревини, виготовлених і оброблених згідно з вимогами нормативних документів, на змінення ефективності їхнього вогнезахисту. Результати досліджень наведені у таблиці 1.

Таблиця 1.2. - Результати випробувань з визначення групи вогнезахисної ефективності досліджених вогнезахисних речовин залежно від терміну зберігання [33, 34].

Назва Вогнезахисної речовини для дерев'яних елементів горищних покриттів	Спосіб вогнезахисного обробляння	Середня витрата вогнезахисного засобу	Група вогнезахисної ефективності вогнезахисного засобу (середнє значення втрати маси зразків , %)		Примітка (про зміни якості вогнезахисту)
			на момент закладання	Через 1 рік зберігання	
Просочувальні вогнезахисні речовини					
Просочувальна вогнезахисна речовина «БС-13»	Глибоке вогнезахисне просочення	494,1 кг/м ³ (в перерахунку на суху речовину - 74,1 кг/м ³)	I (7,4)	I (7,6)	Забезпечується початкове значення групи вогнезахисної
Просочувальна вогнебіозахисна речовина «АЛАНА»	Поверхнєве вогнезахисне просочення (пензлем за два рази)	249,6 г/м ² (в перерахунку на суху речовину - 174,7 г/м ²)	I (6,6)	I (6,8)	ефективності протягом одного року

Просочувальна вогнебіозахисна речовина «ECOSEPT 450-1»	Поверхня вогнезахисна просочення (пензлем за два рази)	300,1 г/м ² (в перерахунку на суху речовину - 193,1 г/м ²)	I (7,1)	I (7,2)
Просочувальна вогнезахисна речовина «Неомид 450-1»	Поверхня вогнезахисна просочення (пензлем за два рази)	249,7 г/м ² (в перерахунку на суху речовину - 187,2 г/м ²)	I (2,8)	I (5,7)
Просочувальна вогнезахисна речовина «Бар'єр-1»	Глибоке вогнезахисне просочення (гаряча-холодна ванна) I група	759,5 кг/м ³ (в перерахунку на суху речовину - 151,9 кг/м ³)	I (7,2)	I (8,1)
Просочувальна вогнезахисна речовина «Tytan Professional	Глибоке вогнезахисне просочення (гаряча-холодна	184,4 кг/м ³ (в перерахунку на суху речовину - 46,1 кг/м ³)	I (7,3)	I (8,0)

4F Вогнебіозахи ст»	ванна) I група				
Вогнезахи сна просочувальн а речовина (антипірен) NLA-8	Глибоке вогнезахисн е просочення (автоклавне просочення) I група	647 кг/м ³ (в перерахунку на суху речовину - 80,9 кг/м ³)	I (8,1)	I (8,3)	

З результатів дослідження можна зробити висновок, що поширені просочувальні вогнегасні засоби забезпечують початкове значення вогнегасної групи протягом одного року, що передбачено їхнім регламентом. З кожним наступним роком зберігання середнє значення втрати маси зразків зростає на декілька відсотків. Найменше зростання спостерігається у «ECOSEPT 450-1» (+1,41% від початкового значення) та «АЛАНА» (+3,03% від початкового значення). Найменшу ефективність збереження терміну придатності показує «Неомид 450-1» (+103,57% від початкового значення). Спостерігаючи таку динаміку, можна зробити висновок, що через декілька років зберігання ці засоби не зможуть забезпечувати початкову групу вогнезахисту.

Цікаво, що найефективніші і найменш ефективніші засоби були нанесені за допомогою пензля. З цього можна зробити висновок, що збереження терміну придатності більше залежить від складу речовини, а не від способу нанесення. Однак, у випадку з БС-13 спосіб нанесення має важливе значення. При глибокому вогнегасному просоченні цей засіб надає I групу вогнезахисту, який зберігається протягом 1 року експлуатації. Однак, при поверхневому нанесенні

БС-13 забезпечує II групу вогнезахисту, а після 1 року зберігання взагалі не забезпечує вогнезахист деревини [34].

Просочувальні вогнезахисні засоби є одними з найпоширеніших засобів. Основними перевагами просочення є простота застосування, збереження зовнішнього вигляду деревини, невисока вартість обробки та можливість використання для різних типів конструкцій. Також важливим позитивним аспектом цього методу вогнезахисту є певний рівень біозахисту [35], що є суттєвим при обробці деревини. Водночас такі засоби мають і певні недоліки. Глибина та тривалість дії просочення залежать від вологості деревини, умов експлуатації та способу нанесення. При впливі атмосферних опадів, сонячного випромінювання чи механічного стирання захисні властивості поступово знижуються, що потребує періодичного оновлення обробки.

1.5 Фарби та лаки вогнезахисні

Вогнезахисні фарби та лаки є ефективними засобами зниження горючості будівельних матеріалів, зокрема деревини та металевих конструкцій. Вони утворюють на поверхні тонкий шар, який під дією високої температури спінюється або утворює теплоізоляційну плівку, що уповільнює нагрівання та займання основи. Такі покриття поєднують декоративну та захисну функції, відповідають вимогам чинних нормативних документів і застосовуються для підвищення рівня пожежної безпеки будівельних об'єктів [36].

Вогнезахисні фарби та лаки повинні поєднувати в собі комплекс важливих властивостей, що забезпечують їх ефективність і безпечність у використанні. Зокрема, вони мають бути нетоксичними, тобто безпечними для застосування в житлових приміщеннях і не виділяти шкідливих речовин при нагріванні. Важливою характеристикою є також гнучкість покриття, яка дозволяє деревині вільно розширюватися та стискатися без утворення тріщин, зберігаючи цілісність захисного шару. Крім того, такі матеріали повинні забезпечувати

простоту нанесення на різні поверхні деревини, створюючи рівномірне та надійне вогнезахисне покриття [37]. Вогнезахисні лаки – речовини, що утворюють на поверхні матеріалу, який захищається, тонку прозору плівку. Ця плівка дозволяє зберегти текстуру деревини й володіє декоративними властивостями, а також захищає деревину від загоряння. Вогнезахисні фарби – речовини, що наносять на поверхню матеріалу, який захищається, з метою утворення на ньому непрозорого шару різних кольорів і відтінків, для надання декоративного виду, попередження загорянню, поширенню полум'я по поверхні та захисту від впливу вологи. [38] Цей метод вогнезахисту характеризується тривалішим терміном експлуатації порівняно з просоченнями. Однак наявність у складі органічних розчинників обмежує його використання в житлових і громадських будівлях. Вогнезахисні фарби являють собою суспензію пігментів, наповнювачів та допоміжних компонентів і призначені переважно для оброблення конструкцій усередині приміщень.

Найчастіше вони складаються з хлорованих алкідів або парафінів, гідроксиду алюмінію, оксиду сурми чи їх сумішей. При нанесенні на поверхню горючої основи фарби виконують декоративну функцію у звичайних умовах, а в разі пожежі ефективно знижують швидкість поверхневого горіння горючої основи, запобігають перетворенню невеликого загоряння на масштабну пожежу, покращують вогнезахисні властивості будівельних матеріалів, захищають горючу основу та забезпечують достатній час для евакуації людей і організації рятувальних робіт [39].

При нанесенні покриттів, особливо фарб і лаків, важливу роль відіграє шаровість нанесення. У дослідженні науковці зробили висновок, що впровадження шаруватої структури відіграє вирішальну роль у підвищенні експлуатаційних характеристик покриття [40,41]. Завдяки створенню багатошарової структури значно покращується хімічна та термічна стабільність матеріалу [42, 43].

Інтумесцентні вогнезахисні покриття – це, свого роду, «останнє слово» технології захисту від пожеж, такий тип покриттів утворює спучений теплоізоляційний шар за рахунок хімічних реакцій між компонентами. Такі покриття є одними з найпоширеніших засобів вогнезахисту і має ряд незаперечних переваг у порівнянні з іншими вогнезахисними матеріалами. [44]. Основними та фактично незамінними інгредієнтами вогнезахисних спучуючих складів є такі вогнезахисні речовини: поліфосфат амонію, меламін та пентаеритрит у співвідношенні 3:1:1. Пентаеритрит (2,2-ди-(оксиметил)1,3-пропандіол) у більшості випадків виступає основним гідроксилвмісним компонентом у вогнезахисних спучуючих складах [45].

Закордонним ефективним прикладом вспучуючого покриття є словацький Flame Gard. [46] Це в'язке покриття, яке висихає до прозорого кольору зі світло-жовтим відтінком, що дозволяє залишатися видимим оригінальному візерунку деревини. Під час горіння вогнезахисне покриття зазнає термічного розкладу на захищеній поверхні, в результаті чого утворюється щільний, негорючий шар піни, який діє як теплоізоляція. Ці шари піни ефективно запобігають вогню та передачі тепла, тим самим підвищуючи вогнестійкість деревини. Вогнезахисне покриття підходить для застосування всередині приміщень з відносною вологістю 80%.

Оцінку ефективності деяких фарб і лаків провів Гайдук [47] та ін., результати яких наведено в таблиці:

Табл. 1.3. - Характеристики сучасних вогнезахисних засобів для деревини, що застосовувались в Україні в період з 2019 року до 01.07.2023 року [47,48]

№ з/п	Назва вогнезахисного засобу	Стан вогнезахисного засобу	Товщина вогнезахисного просочення (обробляння), (мм)	Заявлений термін вогнезахисту, років	Наявність протоколів підтвердження терміну вогнезахисту

1	Фенікс ДБ	Фарба	0,25	30	Не вказано
2	Antifire Paint Plus	Лак	0,15	7	В наявності
3	Фаєрвол- Вуд	Фарба	0,2	10	В наявності
4	Defens W	Фарба	0,2	30	Не вказано
5	ВД АК 5021 «Пірант Колор»	Фарба	0,2	10	Не вказано
6	Defender	Фарба	Не вказано	25	Не вказано
7	ЕНДОТЕ РМ ХТ- 150	Фарба	0,2	12	Не вказано
8	Ендотер м 250103	Фарба	0,12	10	В наявності
9	Fireproof coating	Фарба	0,1	10	В наявності

У порівняльному аналізі слід звернути увагу на строк вогнезахисного терміну, адже це основна перевага фарб та лаків над просоченнями. Бачимо, що найдовші терміни (25-30 років) у фарб №3, 4 та 6. Проте слід звернути увагу, що виробник цих засобів не надає протоколів підтвердження терміну. Тому не можна обґрунтовано підтвердити такий довгий час вогнезахисної ефективності. До уваги треба брати ті зразки, які мають протоколи підтвердження заявленого терміну вогнезахисту. У цьому випадку середній термін становить більш

реальні 10 років, що переважно довше за строк вогнезахисної придатності просочувальних речовин.

Вогнезахисні фарби та лаки посідають важливе місце серед сучасних засобів підвищення пожежної безпеки будівельних конструкцій. Вогнезахисні фарби є найпоширенішим способом вогнезахисту деревини через ряд переваг, а саме відносно висока вогнезахисна ефективність і простота у використанні. Варто зазначити, що фарби та лаки мають ще 2 додаткові функції – біологічний захист декоративність.

Особливо доцільними є вспучуючі фарби, ефективність яких зумовлена здатністю утворювати на поверхні конструкцій захисний теплоізоляційний шар, який при дії високої температури перешкоджає доступу кисню, знижує теплопровідність та уповільнює процеси займання і поширення полум'я. Завдяки цьому такі матеріали істотно підвищують межу вогнестійкості деревини, металу та інших основ, що особливо важливо для внутрішніх елементів будівель.

1.6 Вогнезахисне облицювання (екранування) і його ефективність

Вогнезахисне облицювання (екранування) є одним із поширених методів підвищення межі вогнестійкості будівельних конструкцій. Його суть полягає у створенні на поверхні захисного шару з негорючих або важкогорючих матеріалів, який ізолює основу від дії високих температур і полум'я. Таке облицювання зменшує швидкість нагрівання конструкції, запобігає руйнуванню матеріалу й утворенню диму та токсичних продуктів горіння.

Для виконання вогнезахисного облицювання використовують гіпсокартон, магнезитові та цементно-стружкові плити, азбестоцемент, базальтові мати, склотканини й інші термостійкі матеріали. Ефективність екранування залежить від товщини й теплопровідності облицювального шару, способу кріплення та

герметичності стиків. Завдяки простоті монтажу, довговічності та відсутності потреби у спеціальному обладнанні, метод екранування широко застосовується в будівництві для захисту як дерев'яних, так і металевих конструкцій [49].

До конструктивного вогнезахисту відносяться штукатурки, облицювання плитними, рулонними та іншими вогнезахисними матеріалами, у тому числі на каркасі, з повітряними прошарками, а також комбінація даних матеріалів, у тому числі з тонкошаровими покриттями, що спучуються. Широкого застосування набули гіпсокартонні листи, магнезитові, гіпсоволокнисті та вермикулітові плити, композитні панелі, плити з базальтовими волокнами тощо [50]. Особливого розвитку та поширення набирають рулонні матеріали у зв'язку з низкою унікальних властивостей: сухий монтаж, висока продуктивність монтажу, оскільки конструкція «обертається», а не обкладається плитами. Рулонні вогнезахисні матеріали знаходять застосування в цивільному та промисловому будівництві (двері, перегородки, повітропроводи), в машинобудуванні (суднобудуванні, літакобудуванні), ізоляція промислового обладнання, транспортних засобів [51]. Широкого застосування в облицюванні набув гіпсокартон через ряд різноманітних властивостей. Щодо вогнезахисної, то стратегія пожежної безпеки для Dalston Works визначає, що гіпсокартон забезпечує 49 хвилин вогнезахисту, після чого деревина обвуглюється зі швидкістю 0,7 мм за хвилину [52].

Конструктивний вогнезахист є ефективним способом підвищення межі вогнестійкості будівельних конструкцій. Шаршанов та Абрамов [53] у своїх дослідженнях зазначають, що вогнезахисні штукатурки забезпечують вогнестійкість до 180 і більше хвилин, облицювальні вогнестійкі плити - також до 180 і більше хвилин, а вогнезахисні сполуки (фарби), що спучуються, - до 90 хвилин.

Нанолісти, створені на основі максенів, це новітній спосіб вогнезахисту конструкцій. Максени, відкриті на початку 2010-х років, являють собою групу двовимірних нітридів, карбідів та карбонітридів перехідних металів, які демонструють важливу електро- та теплопровідність, гідрофільність,

стабільність, а також універсальну поверхневу функціональність [54]. Ці властивості роблять їх не тільки адаптованими для диспергування в різних матрицях, але й корисними для застосування у вогнезахисних системах як за допомогою фізичних, так і хімічних механізмів. При додаванні до певних композитів максени утворюють когезійну блокаду, яка обмежує рух маси та тепла, затримуючи поширення полум'я та мінімізуючи виділення летких газів. Термічна стабільність та велике співвідношення сторін наночастинок максени дозволяють їм ефективно розсіювати тепло, що є важливим для затримки займання та зниження загальної горючості композитного матеріалу [55, 56].

Однак потенціал максенів у вогнестійкості не був повністю використаний. Більшість досліджень зосереджені на ефекті фізичного бар'єру, який забезпечують наночастинки максенів, тоді як хімічна взаємодія між ними та матрицею залишається недостатньо вивченою. Різні дослідження досліджували композити максенів з кількома матеріалами, такими як епоксидна смола та вуглецеві нанотрубки, для забезпечення вогнестійкості. [57,58] Проте, стійкість композитів на основі максенів можна підвищити, поєднавши їх з біологічними матеріалами, такими як білки та речовини рослинного та тваринного походження, такі як целюлоза, які мають перевагу біорозкладності, нетоксичності, стійкості та екологічності [59]. Фаїзе [60] досліджував вогнезахисну ефективність максенів в поєднанні з біоматеріалами, включаючи рослинні добавки, такі як лігнін, целюлоза та соєвий білок, а також тваринні аналоги, такі як ДНК, казеїн та хітозан. Ці комбінації продемонстрували значне покращення вогнестійкості, зі зниженням пікової швидкості виділення тепла до 83%, загального тепловиділення на 69% та загального димовиділення на понад 85%.

Вогнезахисне облицювання (екранування) є одним із найнадійніших та довговічних способів підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій. Воно забезпечує ефективну теплоізоляцію матеріалу від дії відкритого полум'я, що значно знижує ризик його займання та деформації. Застосування негорючих плитних або волокнистих матеріалів дозволяє зберігати несучу здатність

конструкцій упродовж тривалого часу пожежі. Разом із тим, ефективність методу залежить від правильності монтажу, вибору матеріалів та забезпечення цілісності захисного шару. Також вагомим недоліком є можливість піролізу та тління під вогнезахисним екраном внаслідок тривалого нагрівання деревини, яке знаходиться під ним.

1.7. Стан нормативно-технічної бази з вогнезахисту деревини

Система нормативно-технічного регулювання у сфері вогнезахисту деревини є основою забезпечення пожежної безпеки будівель і споруд. Вона охоплює вимоги до матеріалів, засобів вогнезахисту, методів їх випробування та оцінювання ефективності. Основними документами, що регламентують ці питання в Україні, є державні стандарти (ДСТУ) [61], будівельні норми (ДБН) і правила пожежної безпеки, затверджені наказами МВС. Нормативна база перебуває в процесі оновлення, адже потрібно змінювати неактуальні радянські та пострадянські норми. Нові зразки нормативно-технічної бази враховуються європейські стандарти, що сприяє гармонізації національних вимог із міжнародними практиками. Сучасний стан нормативно-технічної бази на теперішній час не ідеальний, проте перебуває у процесі модернізації.

Основним нормативно-правовим актом в сфері вогнезахисту є Наказ МВС № 1064 «Про затвердження Правил з вогнезахисту» [11], затверджений 26 грудня 2018 року. Він визначає основні вимоги до виконання, контролю та оцінювання якості робіт із вогнезахисту матеріалів, виробів і конструкцій. Документ розроблено з метою забезпечення належного рівня пожежної безпеки на об'єктах різного призначення та регламентує порядок застосування вогнезахисних засобів, проведення випробувань і підтвердження їх ефективності. У Правилах встановлено вимоги до організацій, що виконують

вогнезахисні роботи, зокрема щодо наявності відповідного обладнання, технологічної документації та кваліфікованого персоналу.

З вересня 2025 року набуває чинності національний стандарт ДСТУ 9291:2024 «Захист від пожежі. Вогнезахист будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання під час експлуатації об'єктів вогнезахисту». У цьому стандарті встановлено удосконалені методи контролювання вогнезахисних засобів, нанесених на об'єкт вогнезахисту, які надають змогу виявити непридатність вогнезахисних засобів, нанесених на об'єкт вогнезахисту для подальшого експлуатування [62]. З 1 серпня ввійшов в дію ДСТУ 9314:2025 «Вогнезахист будівельних конструкцій, матеріалів та виробів. Настанови щодо проектування, виконання робіт, уведення в експлуатацію та підтримання експлуатаційної придатності» [63]. Це новий національний стандарт України, прийнятий наказом ДП «УкрНДНЦ» № 30 від 26 лютого 2025 року. Документ розроблено технічним комітетом стандартизації ТК 25 «Пожежна безпека та протипожежна техніка» та спрямовано на впорядкування системи вогнезахисних заходів у будівництві. Стандарт визначає вимоги й рекомендації щодо проектування, виконання, приймання, експлуатації та контролю якості вогнезахисних робіт, охоплюючи весь життєвий цикл конструкцій і матеріалів. Він передбачає сучасний підхід до вибору методів вогнезахисту, узгоджений із міжнародними нормами, зокрема ISO 12944-1:2019 [64], та враховує новітні технології й матеріали. Упровадження ДСТУ 9314:2025 [65], забезпечує підвищення надійності будівельних об'єктів, сприяє гармонізації українських вимог із європейськими стандартами та підвищує рівень пожежної безпеки в будівельній галузі.

Відомчі інститути стикаються з проблемою перекладу західних нормативних документів. Проте поступово це завдання вирішується. Так, ДСТУ EN 13381-2:2022 «Методи випробування для визначення впливу, на вогнестійкість елементів конструкцій. Частина 2. Вертикальні вогнезахисні

екрани» (EN 13381-2:2014, IDT), розпочав діяти з 31 грудня 2023 року і був виданий англійською [66]. Проте вже 5 квітня 2024 року був прийнятий його переклад на українську [67]. ДСТУ EN 13381-2:2024 встановлює методику випробувань вертикальних вогнезахисних екранів. Документ описує обладнання, умови випробувань, підготовку зразків, методику їх встановлення та критерії оцінки поведінки екранів під вогнем - зокрема збереження цілісності, адгезії до основи й теплозахисної здатності. У межах стандарту особлива увага приділяється визначенню максимально допустимої температури на тильній поверхні конструкції, часу утримання температурних меж і поведінці захисного екрана в динамічних умовах пожежі. Стандарт надає основу для порівняння різних систем облицювання чи екранування і дозволяє оцінювати їх ефективність за єдиними критеріями. Проте, є ряд діючих застарілих нормативних документів, які потребують заміни на актуальніші. Такими є ГОСТ 16363-98 Засоби вогнезахисні для деревини. Методи визначення вогнезахисних властивостей, ГОСТ 30219-95 Деревина вогнезахисна. Загальні технічні вимоги. Методи випробувань. Транспортування і зберігання та ін.

У результаті аналізу нормативно-технічної бази з питань вогнезахисту деревини можна зробити висновок, що в Україні триває активний процес оновлення стандартів та правил у напрямі гармонізації з європейськими нормами. Нові документи, зокрема ДСТУ EN та ДСТУ ISO, поступово замінюють застарілі радянські нормативи, які вже не відповідають сучасним вимогам безпеки, екологічності та методології випробувань. Оновлення нормативів сприяє підвищенню якості вогнезахисних матеріалів, їх відповідності міжнародним стандартам і полегшує інтеграцію українських виробників на європейський ринок. Водночас у системі регулювання все ще зберігається невелика частина документів старого зразка, які потребують перегляду або повної заміни. Це стосується переважно нормативів, що

стосуються методів випробувань і класифікації вогнезахисних засобів, які мають бути адаптовані до єдиних європейських підходів.

Таблиця 1.4. - Нормативна база з вогнезахисту деревини в Україні

	Назва документу	Короткий опис	Методики випробування
	Наказ МВС № 1064 «Про затвердження Правил з вогнезахисту»	Встановлює вимоги до організації й виконання робіт з вогнезахисту деревини та металу. Регламентує порядок підготовки поверхонь, нанесення вогнезахисних засобів, умови їх експлуатації, ведення облікової документації та вимоги до суб'єктів, що виконують роботи з вогнезахисту.	—
	ДСТУ 9291:2024 «Захист від пожежі. Вогнезахист будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання під час експлуатації»	Цей стандарт установлює методи контролювання вогнезахисних засобів (покривів і просочень), нанесених на об'єкт вогнезахисту (дерев'яні, металеві та бетонні конструкції), для їх подальшого експлуатування.	Метод контролювання за температурою займання Метод контролювання за ознакою самостійного горіння

	об'єктів вогнезахисту».		
	<p>ДСТУ 9314:2025 «Вогнезахист будівельних конструкцій, матеріалів та виробів. Настанови щодо проектування, виконання робіт, уведення в експлуатацію та підтримання експлуатаційної придатності»</p>	<p>Стандарт встановлює вимоги та рекомендації щодо проектування систем вогнезахисту, вибору вогнезахисних матеріалів, виконання робіт, введення конструкцій в експлуатацію та підтримання їхньої довгострокової вогнезахисної здатності.</p>	<p>—</p>
	<p>ДСТУ EN 13381-2:2024 Методи випробування для визначення впливу на вогнестійкість елементів конструкцій. Частина 2. Вертикальні вогнезахисні</p>	<p>Встановлює методику випробувань вертикальних вогнезахисних екранів. Документ описує обладнання, умови випробувань, підготовку зразків, методику їх встановлення та критерії оцінки поведінки екранів під вогнем - зокрема збереження цілісності, адгезії до основи й теплозахисної здатності.</p>	<p>Випробування проводять у вогневій печі за стандартною температурною кривою з розміщенням вогнезахисного екрану перед конструкцією, яку захищають.</p>

	екрани		
	ГОСТ 16363-98 Засоби вогнезахисні для деревини. Методи визначення вогнезахисних властивостей	Стандарт установлює вимоги та методи визначення вогнезахисних властивостей засобів, що застосовуються для оброблення деревини. Регламентує показники, за якими оцінюють ефективність покриттів і просочень, а також умови проведення випробувань.	Випробування проводять шляхом дії відкритого полум'я у визначеній установці на зразки деревини, оброблені вогнезахисним засобом
	ГОСТ 30219-95 Деревина вогнезахищена. Загальні технічні вимоги. Методи випробувань. Транспортування і зберігання	Встановлює загальні технічні вимоги до деревини, що підлягає вогнезахисному просоченню, вогнезахищеній деревині, способам та засобам вогнезахисту деревини, а також регламентує вимоги безпеки, методи контролю та випробувань, правила маркування, транспортування та зберігання. Стандарт не поширюється на вогнезахищену деревину за допомогою фарбування, нанесення покриття та облицювання.	Загальні вимоги до відбору зразків деревини, проведення фізико-механічних випробувань малих чистих зразків та статичному аналізу результатів випробувань встановлюються за ГОСТ 16483.0, визначення змісту числа річних шарів та

			пізньої деревини в річному шарі регламентується ГОСТ 16483.18.
--	--	--	---

Наведена в таблиці 1.4 нормативна база відображає основні чинні документи, що регулюють питання вогнезахисту деревини в Україні, включаючи державні стандарти, будівельні норми та відомчі правила. Вона демонструє поступовий перехід від застарілих нормативів до сучасних європейських підходів, що забезпечують більш точне оцінювання ефективності вогнезахисних матеріалів. Загалом розвиток нормативно-технічної бази спрямований на підвищення рівня пожежної безпеки, уніфікацію методів випробувань та гармонізацію українських вимог із міжнародними стандартами.

1.8. Висновки за розділом

У результаті проведеного аналізу встановлено, що сучасні засоби поверхневого вогнезахисту деревини відрізняються за складом, механізмом дії та ефективністю. Дослідження показали, що більшість традиційних покриттів забезпечують короткочасний захист і з часом втрачають свої властивості під впливом вологи, ультрафіолетового випромінювання та механічних навантажень. Разом із тим нові композиційні суміші на основі мінеральних та полімерних компонентів демонструють вищу термостійкість і кращу адгезію до деревини, однак потребують удосконалення для підвищення глибини проникнення та довговічності.

Порівняльний аналіз ефективності існуючих засобів показав, що найбільш дієвими є покриття з інтумесцентним ефектом, які утворюють пінококс, що ізолює деревину від дії високої температури. Менш ефективними виявилися

склади з низьким ступенем спучування або недостатньою стійкістю до атмосферних впливів.

На основі отриманих результатів сформульовано необхідність створення нового вогнезахисного засобу, здатного забезпечити глибше просочення деревини, формувати більш щільний і стійкий шар пінококсу, а також мати поліпшені експлуатаційні властивості - водостійкість, адгезію, стабільність при зміні температури. Такий підхід сприятиме підвищенню надійності й довговічності дерев'яних конструкцій та наблизить українські розробки до сучасних міжнародних стандартів у галузі вогнезахисту.

РОЗДІЛ 2.

ОСНОВНІ НАПРЯМИ ЗНИЖЕННЯ ГОРЮЧОСТІ І ПІДВИЩЕННЯ БІОЛОГІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ДЕРЕВИНИ.

2.1. Класифікація антисептиків

Антисептики для деревини класифікують за кількома взаємопов'язаними критеріями: за хімічним складом (неорганічні солі - наприклад, борні солі, препарати зі вмістом міді; органічні сполуки - пентахлорфенол, кременисті та азольні фунгіциди; вуглева смола/креозот), за носієм/розчинником (водорозчинні просочення, олійні та на основі органічних розчинників) та за функціональним призначенням (фунгіциди, інсектициди, бактерицидні та профілактичні препарати). Окрема група виділяється за технологією нанесення та фіксації речовини у деревині: поверхневі покриття, занурювальна обробка та імпрегнація під тиском, причому вибір методу значно впливає на глибину проникнення й довговічність захисту [68].

Неорганічні антисептики Фтористий натрій - білий або сірувато-білий порошок. Сильно отруйний, шкідливий як для людей, так і для тварин. Застосовується для боротьби із грибами й жуками у вигляді 3%-ного водяного розчину (3 кг фтористого натрію й 97 л води).

Кремнефтористий натрій - білий або сірий порошок, іноді з жовтим відтінком. У чистому виді не придатний для протигнільного захисту деревини через низьку розчинність (0,65%). Для готування 3%-ного водяного розчину антисептика в кремнефтористий натрій додають кальциновану соду (2,5 кг кремнефтористого натрію, 2,5 кг кальцинованої соди, 95 л води).

Кремнефтористий амоній - білий або сіруватий кристалічний порошок, що легко розчиняється у воді: у холодній - 18,5%: у гарячій - 32,5%. Сильний антисептик, в 1, 5-2 рази отруйніший фтористого натрію. Для готування 5%-ного розчину потрібно 5 кг кремнефтористого амонію й 95 л води. Викликає

корозію металів, тому металеві конструкції попередньо двічі офарблюють олійною фарбою, сушать і тільки потім обробляють антисептиком. Цей антисептик легко вимивається водою з деревини.

Бішофіт являє собою мінерал класу галогенідів, основою його є кристалогідрат хлориду магнію $MgCl_2 \cdot 6H_2O$. Він містить домішки сполук бромю (до 1%). Зовнішній вигляд - білі зернисті або волокнисті агрегати. У природі зустрічається Бішофіт хемогенного та осадового походження. Він використовується як сировина для одержання магнію та його сполук.

Органічні антисептики в основному мають стійкий важкий захід, рідко застосовуються в житлових приміщеннях, частіше служать для просочення дерев'яних стільців фундаментів, нижніх вінців стін з наступною ізоляцією розчином відкритих місць, що іноді майже повністю усуває захід. Це креозотове масло, антраценове масло, сланцеве масло, динитрофенол і ін.

Комбіновані антисептики найчастіше складаються із двох і більш отруйних речовин. Наприклад, гексахлоран розчиняється в гасі, бензині, мінеральнім маслі; ДДТ - у бензині, скипидарі й ін. Ці два антисептики дуже шкідливі й застосовувати їх у житлових і тваринницьких приміщеннях забороняється

Хлородон розчиняється в гасі, бензині, мінеральних маслах. Застосовується 0,3- 0,5%-ний розчин (300-500 г на 90 л зазначених розчинників). Дуже ефективний, однак небезпечний для людей і тварин, тому застосовувати його в житлових і тваринницьких приміщеннях забороняється.

Хлорофос розчиняється у воді. Готується 0,5-1%-ний розчин (500-1000 г на 90 л води). Менш небезпечний для людей і тварин, ніж перераховані вище речовини [69].

2.2. Особливості горіння і термоокисної деструкції деревини.

Забезпечення збереження від пожеж об'єктів культурно-історичного характеру, матеріалом виготовлення яких була деревина, зниження горючості

деревини вживаною в будівництві при одночасному захисті від негативної дії від шкідливих комах дерево точильників, грибкових і інших захворювань деревини, є комплексною проблемою [69, 70]. Її рішення пов'язане з питаннями хімічної кінетики: гомогенно-гетерогенним режимом горіння, термічною деструкцією, газифікацією продуктів, а також з питаннями гальмування як хімічних так і фізичних реакцій при протипожежному захисті виробів. Встановлення механізмів прогрівання деревини при горінні, процесів термічної деструкції деревини і нанесених на її поверхню покриттів дає можливість розробити ефективні заходи по зниженню її горючості.

Деревина - складна суміш природних полімерів великої молекулярної маси [71]. Це пориста речовина, об'єм пустот складає 50-75% її об'єму. Елементний склад деревини можна представити таким чином: вуглецю 40-50%; водню 5 - 6%; кисню 39-47%; азоту 0.5-1.5%; мікроелементів до 5. Основними компонентами є целюлоза (близько 50%), геміцелюлоза (25%) і лігнін (25%). Крім того, деревина містить поглинену вологу (4-7%). Масові долі цих компонентів міняються залежно від виду матеріалу. Речовини, що входять до складу деревини, володіють різною будовою і неоднаковою термічною стійкістю. Найменш термостійка - геміцелюлоза, найбільшою термічною стійкістю володіє лігнін.

Целюлоза - це високомолекулярний полісахарид з емпіричною формулою $(C_6H_{10}O_5)_m$. Приведена молярна маса складає понад 1 500 000 а.од.

Геміцелюлози є сумішшю пентазанів $(C_5H_8O_4)_m$, гектазанів $(C_6H_{10}O_5)_m$ і поліуронідів. Співвідношення пентазанів, гектазанів і поліуронідів різне для деревини листяних і хвойних порід. У деревині листяних порід геміцелюлози практично повністю представлені пентазанами, коли як для хвойних порід пентазани і гектазани містяться приблизно в рівних пропорціях.

Лігнін є найменш вивченим в хімічному відношенні компонентом деревини. За своєю природою це органічна полімерна сполука має ароматичну природу, містить пов'язані з ароматичною речовиною вуглеводи. Кількість і

елементарний склад лігніну значною мірою залежить від породи деревини. Деревина листяних порід містить 20-30% лігніну, а хвойних до 50%. Відповідно до цього неоднакові його емпіричні формули, запропоновані різними авторами є : $(C_{10}H_{10}O_3)_m$, $(C_{22}H_{20}O_7)_m$, $(C_{12}OH_{138}O_{35})_m$. Приведена молярна маса складає декілька тисяч а.од.

Горіння деревини істотним чином відрізняється від горіння інших речовин, оскільки може протікати відразу в декількох режимах - гомогенному і гетерогенному. Тому при горінні деревини можна виділити дві фази:

- 1) гомогенне (тобто полум'яне) горіння продуктів розкладання і
- 2) гетерогенне окислення твердого вуглецевого залишку, що утворився [72].

На першому етапі при дії на деревину джерелом запалення відбувається процес розкладання матеріалу або піролізу, при цьому можна виділити декілька характерних етапів [73]:

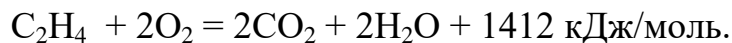
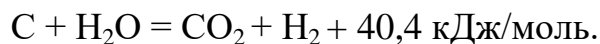
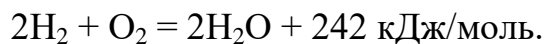
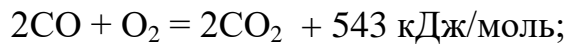
1. Сушка матеріалу при $t=110-130^{\circ}C$. При цьому відбувається виділення вологи, що входить до складу деревини. Для деревини з первинною вологістю 40-60% стадія сушки є найбільш тривалою і може складати до 55% від загальної тривалості процесу займання.

2. При температурі $t=150-200^{\circ}C$ починається розкладання і конденсація найменш термостійких компонентів целюлози (геміцелюлози) з виділенням CO_2 і H_2O . При $180-300^{\circ}C$ відбувається дегідратація ароматичних ядер лігніну з утворенням незв'язаних подвійних зв'язків і появою ароматичних структур, що конденсують. Газоподібні продукти розкладання, що виділяються, горіти ще не здатні.

3. При $t =250-450^{\circ}C$ протікає піроліз деревини. За межею $300^{\circ}C$ звичайна структура деревини зникає, поступаючись місцем системам, що конденсують, з відомим ступенем орієнтації. Конденсація, зшивання з утворенням вуглефікованих структур, відбувається в деревині при нагріванні паралельно з

деструкцією, виділенням летких речовин, а також унаслідок вторинних процесів за участю тих же летких речовин.

При цьому відбувається виділення основної маси (близько 40% від максимально можливої кількості) горючих і негорючих газів (CO_2 , H_2 , CH_4 , C_2H_4 і так далі). Газова суміш, що утворюється, вже здібна до займання від джерела запалення. Концентрація продуктів піролізу перевищує нижню концентраційну межу розповсюдження полум'я по летких продуктах розкладання. При цьому в умовах зустрічної дифузії окислювача виникають швидкоплинні екзотермічні реакції наступного типу :



Швидкість виділення газоподібних продуктів стає рівній швидкості їх дифузійного горіння. У загальному вигляді швидкість гомогенних хімічних реакцій, які протікають в полум'ї виражається рівнянням Ареніуса [74]

$$\frac{dG_{\text{гор}}}{d\tau_{\text{xp}}} = C_{\text{гор}}^n * C_{\text{ок}}^m * k_0 \exp\left(\frac{-E_{\text{акт}}}{RT}\right)^2 \quad (2.1)$$

де $G_{\text{гор}}$ – кількість реагуючої речовини, моль/(м³*с) $\tau_{\text{хр}}$ – час протікання реакції, с-1; $C_{\text{гор}}$, $C_{\text{ок}}$ – масові концентрації горючих продуктів розкладання і окислювача, моль/м³; k_0 – передекспоненціальний множник, с-1; R - газова постійна, Дж/(моль*К); $E_{\text{акт}}$ – енергія активації Дж/моль; T – абсолютна температура, До; n , m – стехіометричні коефіцієнти пального і окислювача в рівнянні реакції горіння.

Виходячи з рівняння (2.1) швидкість реакції на першій стадії гомогенного горіння визначається взаємною концентрацією компонентів в зоні реакції, температурою процесу і енергією активації процесу. При цьому відбувається авторегулювання об'єму полум'я і площі контакту горючих продуктів термічної деструкції з окислювачем.

Проте дані [75] показують, що швидкість горіння газів CO₂, C, H₂, CH₄ і так далі, в основному визначається вмістом цих компонентів в суміші і лише при малих концентраціях окислювача починає залежати від його змісту. Тоді для кожної реакції буде справедлива рівність

$$dG_i = C_i^{n_i} * k_{0i} \exp\left(\frac{-E_{\text{акт}i}}{RT}\right)^2 d\tau_{\text{хр}} \quad (2.2)$$

Підвищення швидкості виходу продуктів піролізу приводить до зростання об'єму полум'я і збільшення площі контакту горючих продуктів з окислювачем і навпаки. Таким чином, концентрація компонентів горючої суміші в зоні горіння залишається постійною впродовж всього процесу.

4. Чим вище температура, тим більше число бічних груп відщеплюється від ароматичних ядер макромолекул. Структурні елементи вугілля все більш конденсуються, утворюючи плоскі грати, подібні до кристалічної решітки графіту. При $t=500-600$ °С відбувається завершення піролізу, різко скорочується вихід летких продуктів, утворюється вуглистий залишок. Вугілля, що утворюється на поверхні деревини, не горить, хоча і знаходиться в

розжареному стані. Горінню вугілля в цей період перешкоджає горіння газоподібних продуктів розкладання, внаслідок чого кисень не може дифундувати до поверхні вугілля.

Вуглистий шар є хорошим теплоізолятором, і у міру його накопичення при горінні деревини він починає служити захистом внутрішніх шарів матеріалу від термічної дії полум'я. На цьому принципі заснований метод захисту будівельних конструкцій за допомогою покриттів, що спучуються.

Оскільки концентрація газоподібних продуктів розкладання різко знижується, відбувається поступове припинення полум'яного горіння. Це відкриває доступ кисню повітря до нагрітої до 600 °С поверхні вугілля. Починається другий етап горіння деревини - гетерогенне окислення вуглистою шару. При цьому температура зростає до 750-850 °С.

Стадія полум'яного горіння займає коротший проміжок часу, разом з тим він пов'язаний з виділенням значної кількості тепла (при цьому виділяється 55-60% тепла, а в період другої фази - 40-45%).

Гетерогенні процеси протікають безпосередньо на поверхні вугілля. Швидкість хімічної реакції при цьому визначається концентрацією окислювача в місці його контакту з вуглистим шаром і виражається рівнянням

$$\frac{dG_{\text{гор}}}{d\tau_{\text{xp}}} = C_{\text{ок}}^m * k_0 \exp\left(\frac{-E_{\text{акт}}}{RT}\right)^2 \quad (2.3)$$

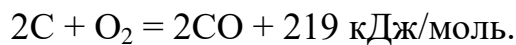
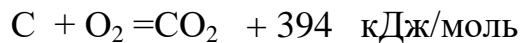
Швидкість гетерогенного горіння визначатиметься надходженням повітря до поверхні, і за відсутності руху повітряних потоків швидкість окислювальних процесів знижується. При цьому швидкість горіння буде визначатися швидкістю дифузії окислювача до поверхні

$$\frac{dG_{\text{гор}}}{d\tau_{\text{xp}}} = \gamma \quad (2.4)$$

де γ - коефіцієнт масопередачі, с^{-1} ;

Процес вигорання карбонізованого шару називається перевуглюванням. При перевуглюванні деревини на її поверхні утворюється шар, товщиною 0,1 мм і більше, із залишків мінеральних солей деревини. Такий залишок називається зольним шаром. Перевуглювання деревини відбувається у декілька етапів:

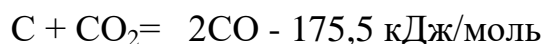
1. Кисень повітря за рахунок дифузії поступає до поверхні і проникає в шар пористого вугілля, і при температурі 500-600 °С вступає з ним в реакції:



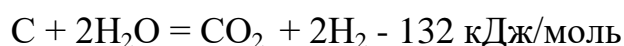
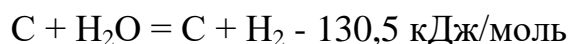
Ці реакції прийнято називати первинними. Взаємодія вуглецю з киснем протікає на поверхні розділу фаз. Швидкість таких реакцій в значній мірі залежить від величини поверхні вуглецю і швидкості дифузії до неї кисню.

Разом з первинними протікають і вторинні реакції.

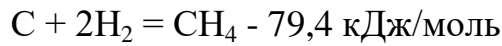
2. Під дією підвищеного тиску діоксид вуглецю виштовхується з товщі вуглистого шару, і при цьому, проходячи через нагрітий вуглистий шар, реагує з ним з утворенням оксиду вуглецю.



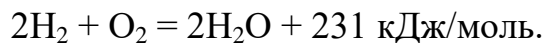
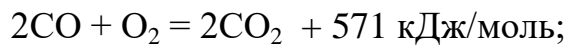
3. Розжарений вуглець може також реагувати з молекулами води, які є в продуктах горіння або розкладання шарів деревини, що пролягають нижче:



4. Вільний водень, що виділяється в попередніх процесах, може взаємодіяти з вуглецем з утворенням метану або інших вуглеводнів



5. Виходячи на поверхню і змішуючись з повітрям, оксид вуглецю і водень згорають в гомогенному режимі - це горіння звичайно видно як голубувате полум'я над поверхнею вугілля, що утворилося



Зольний шар, який утворюється на поверхні деревини в процесі її горіння, створює додатковий опір дифузії окислювача до поверхні вугілля [76].

Зольний шар володіє значним, в порівнянні з газовим середовищем, опором дифузії. Парціальний тиск кисню, відповідно і його концентрація, на зовнішній межі зольного шару співпадає з його концентрацією в газовому об'ємі ($p_{1\text{зш}} = p_{1\Delta}$), а на поверхні деревини, під шаром золи буде рівна нулю.

Дифузійний потік кисню в цих умовах визначається як

$$G_{1i} = \frac{D_i p_{1\Delta}}{RT x_{3л}} \quad (2.5)$$

де D_i – коефіцієнт дифузії крізь зольну оболонку, $\text{м}^2/\text{с}$; $T_{3л}$ - товщина зольного шару, м.

Якщо прийняти процес горіння як квазістаціонарний, то потік кисню до поверхні можна визначити по кількості вигорілого вуглецю у вуглистому шарі

$$G_{1i} = \rho_c \frac{dx_{3л}}{d\tau} \quad (2.6)$$

$\rho_{3л}$ – щільність залишку, що карбонізується $\text{кг}/\text{м}^3$.

Сумісне вирішення рівнянь (2.5) і (2.6) дає рівняння для визначення товщини зольного шару

$$x_{zl} = \sqrt{\frac{2D_i * p_{1\Delta} \tau}{RT * \rho_c}} \quad (2.7)$$

і швидкості перевуглювання

$$G_c = G_l = \sqrt{\frac{D_i * p_{1\Delta} * \rho_c}{2RT * \tau}} \quad (2.8)$$

З рівнянь (2.7) і (2.8) видно, що швидкість перевуглювання деревини змінюється з часом обернено пропорційно до квадрата часу процесу. Це пояснюється наростанням товщини золи на поверхні деревини.

У реальних умовах [72, 74] процес перевуглювання протікає з щодо постійною швидкістю 0.1-0.2 мм/хв. Швидкість процесу перевуглювання в умовах пожежі може збільшуватися при збільшенні швидкості повітряного потоку, що омиває деревину, що горить, що покращує доступ кисню з навколишнього середовища до поверхні вуглецю.

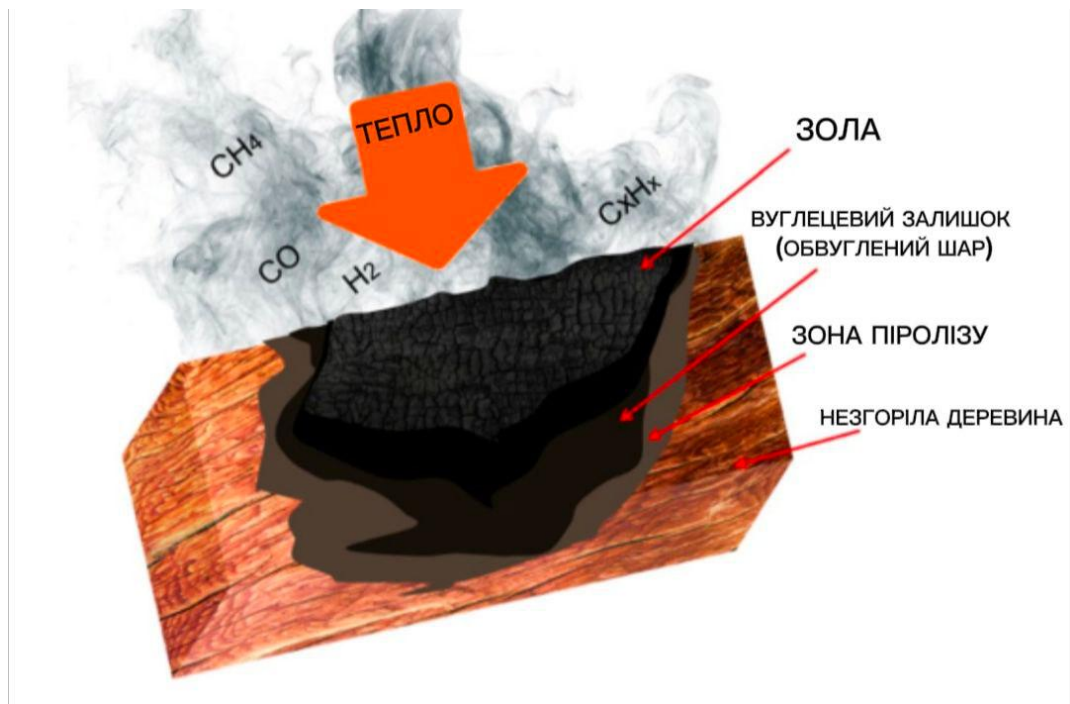


Рис. 2.1 Зони горіння, що утворюються при піролізу деревини [75]

При вивченні процесів, що протікають при горінні, одним з важливих є процес теплопередачі в зоні горіння і тепловиділення в полум'ї [77]. Тепло, що виділяється в ході екзотермічних реакцій в полум'ї, витрачається на сушку і подальший нагрів деревини до температури початку термічної деструкції з утворенням газоподібних продуктів. Умова тепло- і масообміну між зоною горіння і деревиною можна записати у вигляді рівняння

$$q_0 = v_v [c_p (T_n - T_0) + Q_n + Q_{m.o.}] \quad (2.9)$$

де q_0 – інтенсивність потоку, що поступає від зони горіння до поверхні деревини, Вт/м²; v_v – масова швидкість вигорання, кг/(м²*с); T_n , T_0 – температура піролізу і початкова температура поверхні, °С; Q_n , $Q_{t.o.}$ – теплота розкладання і нагріву твердого вуглецевого залишку, Дж/кг.

При сталому горінні на поверхні деревини, що горить, встановлюється постійна температура $T_{пов} = 923-1073$ °С розподіл температури в глиб матеріалу описується рівнянням В.А. Міхельсона

$$T_x = T_0 + (T_{пов} + T_0) \exp\left(\frac{-v_l * c_p * \rho * x}{\lambda_t}\right) \quad (2.10)$$

де λ_t – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м*К), ρ - щільність матеріалу, кг/м³, c_p – теплоємність матеріалу, Дж/(кг*К), V_l – лінійна швидкість вигорання, м/с; T_x – температура на глибині x від поверхні горіння, °С.

Таким чином, по глибині деревини, що горить, має місце області з різними фізичними і фізико-хімічними характеристиками. Умовно їх можна розділити на чотири зони: деревне вугілля, що перебуває на 99% з вуглецю; деревина з різним ступенем піролізованості; непіролізована суха деревина; деревина в початковому стані.

Характерні для процесу горіння температури зведені в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1. Температури процесу горіння

Характерна температура	Інд екс	603- 633
Температура аморфізації	T_x	653
Температура перевуглювання	T_Γ	1423- 1473

Зростання товщини вуглистою шару приводить до збільшення термічного опору, і отже до зниження швидкості прогрівання і піролізу деревини. При

значній товщині вуглистого шару і відсутності конвективних потоків повітря, можливо, само загасання процесу горіння.

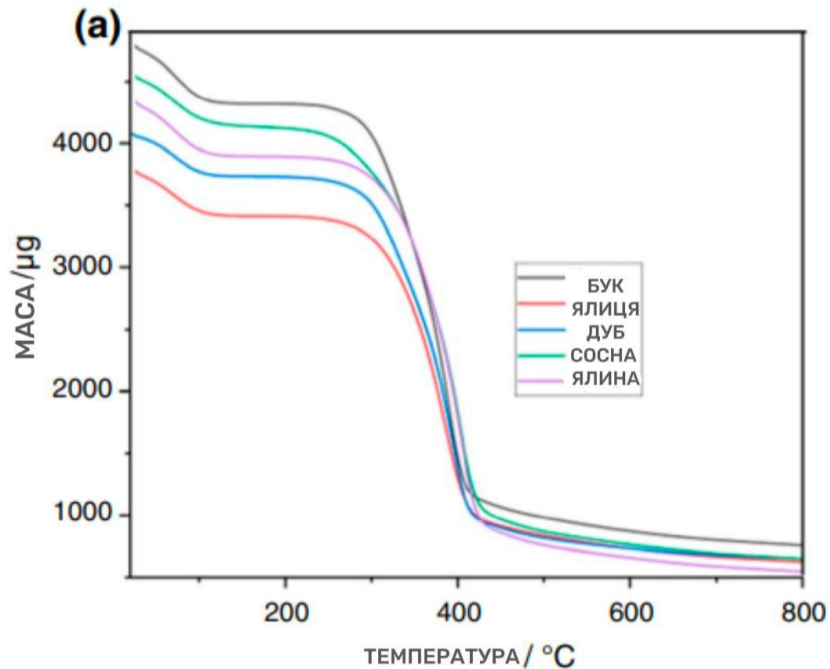


Рис. 2.2 Графік термічного розкладання порід деревини [75]

Таблиця 2.2. Середня глибина піролізного шару деревини [75]

Порода деревини	Середня глибина піролізного шару (мм)	Умови ($T \approx 500\text{--}600^\circ\text{C}$, час ≈ 30 хв)
Сосна (Pinus)	15–25	швидке займання, тонший шар
Ялина (Picea)	15–20	нижча щільність, швидке прогрівання
Дуб (Quercus)	20–30	товстий вуглистий шар,
Бук (Fagus)	20–28	стабільний процес піролізу
Береза (Betula)	18–25	середня щільність

Тополя (Populus)	18–22	легка порода, теплопровідність	мінімальна
Бальза (Ochroma)	10–15	дуже легка, теплопровідність	мінімальна

Враховуючи викладені вище особливості горіння деревини, визначають шляхи зниження її горючості:



Рис. 2.3 Шляхи зниження горючості деревини

2.3. Особливості дії на деревину природно-біологічних чинників.

На деревину, особливо в умовах її розміщення на відкритому повітрі, впливає ряд чинників, здатних викликати її передчасне руйнування, серед яких можна виділити небезпечний вплив природних факторів, зокрема дії води, ґрунтової вологи, кислот і лугів [78], біологічних руйнівників деревини, таких як дереворуйнівні гриби, цвіль і лишайники, а також ентомологічне

руйнування, що проявляється у пошкодженні деревини комахами та їх личинками [78].

2.3.1. Особливості дії на деревину природних чинників.

Підвищена вологість деревини, від 55 до 100% перешкоджає розвитку грибкових захворювань деревини і розвитку дереворуйнівних комах. Насичення деревини солями приводить до зміни структури деревини, що в деяких випадках приводить до підвищення стійкості матеріалу до зовнішніх дій. Це обумовлює хороше збереження археологічних знахідок водоймищ, що знаходяться на дні, де вологість деревини складає 100% і у вологому ґрунті, де вологість деревини досягає 70%. Проте при контакті з повітрям відбувається руйнування знахідок, що обумовлене руйнуванням внутрішньомолекулярних зв'язків складових деревини.

Під час перебування експонатів на відкритому повітрі, зокрема пам'яток архітектури, вологість деревини змінюється протягом року і за несприятливих умов може перевищувати 25%. У чистому вигляді така вологість не завдає безпосередньої шкоди, однак створює сприятливі умови для розвитку грибкових захворювань деревини та життєдіяльності личинок шкідливих комах. Концентровані кисневмісні кислоти викликають окиснення клітковини деревини та її повне руйнування, при цьому навіть дія 1% розчину сірчаної кислоти призводить до зміни кольору деревини, а розчини соляної кислоти проявляють подібний ефект уже при концентрації близько 5%. Целюлоза піддається гідролізу при нагріванні з розчинами неорганічних кислот з утворенням глюкози: $(C_6H_{10}O_5)_m + mH_2O = (C_6H_{12}O_6)_m$. Їдкі луги при підвищених температурах також чинять руйнівний вплив на деревину, викликаючи її «олужнювання», зокрема при дії їдкого натрію відбувається реакція з утворенням лужної целюлози: $(C_6H_7O_2(OH)_3)_m + 3mNaOH = (C_6H_7O_2(OH)_3)_m + 3mH_2O$. При взаємодії з аміаком відбувається руйнування міжмолекулярних зв'язків целюлози з появою ефекту «пластифікації

деревини». Водночас сода та солі металів не чинять шкідливої руйнівної дії на деревину.

2.3.2. Особливості дії на деревину небезпечних біологічних чинників.

Деревина, що тривалий час перебуває у вологому стані, зазнає негативного впливу з боку різних нижчих представників флори, зокрема цвілевих і так званих будинкових грибів, а також водоростей і лишайників [79]. Гриби є особливою групою нижчих рослин, позбавлених хлорофілу і таких, що живляться готовими органічними речовинами; вони мають вегетативне тіло у вигляді грибниці (міцелія) і поділяються на кілька класів, серед яких у контексті руйнування деревини найбільш важливими є нижчі гриби. Паразитичні гриби під час розвитку використовують як мінеральні, так і органічні компоненти деревини, спричиняючи її поступову біохімічну деструкцію [79].

Цвілеві гриби належать до різних груп (фікоміцети, аскоміцети, недосконалі гриби) і зазвичай розвиваються переважно у поверхневих шарах деревини, утворюючи наліт або зміну забарвлення. Вони не суттєво впливають на міцність матеріалу, однак значно погіршують його зовнішній вигляд [79].

Окрему небезпеку становлять будинкові гриби, до яких відносять справжній домовий гриб (*Merulius lacrymans*), білий домовий гриб (*Poria varovaria*) та пластинчастий домовий гриб (*Pascillus paucoides*). Вони розвиваються у мертвій деревині за умов підвищеної вологості та температури, причому оптимальна вологість повітря для їх розвитку становить 80–95 %. За таких умов гриби інтенсивно руйнують целюлозу, спричиняючи втрату міцності деревини [79]. Процес їхньої дії відбувається у два етапи: спочатку під дією ферментів відбувається гідроліз целюлози з утворенням глюкози ($C_6H_{10}O_5$)_m + mH₂O = (C₆H₁₂O₆)_m, а далі - її окиснення до вуглекислого газу і води: C₆H₁₂O₆ + 6O₂ = 6CO₂ + 6H₂O. У результаті деревина змінює структуру, розтріскується, втрачає міцність і поступово може повністю руйнуватися [79].

Водорості є нижчими рослинами, здатними до фотосинтезу, і при тривалому зволоженні деревини в затінених місцях утворюють поверхневі плівки, переважно синьо-зеленого кольору. Вони не використовують деревину як джерело живлення, однак сприяють накопиченню вологи та створюють умови для подальшого біологічного ураження [79].

Лишайники є симбіотичними організмами, що складаються з гриба та водорості, і можуть розвиватися як на здоровій, так і на ураженій деревині. Хоча вони безпосередньо не живляться деревиною, їх життєдіяльність сприяє накопиченню вологи та виділенню ферментів, що прискорюють процеси її руйнування [79].

2.3.3. Особливості дії на деревину небезпечних ентомологічних чинників.

Конструктивні елементи і музейні експонати з деревини руйнуються не тільки грибами, але і комахами. Основна кількість комах, що руйнують деревину, складають всілякі жуки і їх личинки. По характеру пошкоджень комахи, що руйнують деревину, можуть бути розділені на дві основні групи [78,79]. Перша група – комахи, які поселяються в живій або недавно зрубаний деревині і завершують свій фізіологічний цикл розвитку в готових конструкціях. В основному це комахи, що відкладають личинки під кору дерева. При розвитку личинок вони руйнують поверхневий шар деревини безпосередньо під корою і не проникають углиб. Друга група – комахи, які розселяються в мертвій деревині. Фізіологічний цикл розвитку і дозрівання личинок, а для деяких і дорослих особин відбувається в глибині готового виробу або експоната.

Розвитку комах сприяє збільшення змісту білка, який відбувається при розвитку грибкових захворюваннях деревини. Враження деревини комахами виявляється по невеликому отвору на поверхні експоната і бурому порошку, що виштовхується з нього. За наявності ґрунту і шару забарвлення, характерного

для іконопису, живопису темпері, може відбуватися руйнування деревини без видимих пошкоджень поверхні. Лакофарбний шар може ушкоджуватися при утворенні вильотних отворів при виході дорослої комахи з місця обертання в лялечку. До комах, що заподіюють найбільший збиток дерев'яним конструкціям будівель, меблям і музейним експонатам з деревини можна віднести: меблевого точильника Anobiidae, будинкового вусаня Cerambycidae, древогризи Lyctidae, свердлильники Lymexylonidae, бострихиди Bostrychida. На початковій стадії поразки деревина зберігає міцність і свій вигляд, але при сильній поразці значна частина ураженої деревини руйнується, неураженим залишається тільки тонкий 1-2 мм поверхневий шар експоната.

На дерев'яні конструкції: меблі, начиння і інші експонати, природні чинники впливають в комплексі, і їх руйнуюча дія взаємно доповнюється і посилюється. Найбільш схильна до поразки жуками-точильниками волога деревина або вироби, що зберігаються при підвищеній вологості повітря. Розглянуті причини біологічної поразки деревини дозволяють сформулювати основні напрями її захисту.

2.4. Аналіз ефективності просочувальних складів для вогнебіозахисту деревини.

Сьогодні в Україні все більше розповсюдження одержує деревина. Вона володіє поряд позитивних якостей: висока міцність і пружність деревини поєднується з малою густиною, а отже, з низькою теплопровідністю [80]. Проте разом з багато якими позитивними якостями деревина легко займається. Таким чином, в умовах пожежі незахищені дерев'яні конструкції сприяють розповсюдженню вогню, і головною причиною обвалення несучих конструкцій є обуглювання значної частини перерізу, а несуча здатність конструкції в часі зменшується за рахунок зменшення перерізу.

З погляду пожежної безпеки дерев'яних конструкцій найважливішим питанням є забезпечення вогнезахисту деревини.

Головними цілями вогнезахисту [81] є:

- 1) забезпечення незаймистості деревини від енергії малих джерел запалювання;
- 2) зниження швидкості розповсюдження вогню по поверхні;
- 3) забезпечення нерозповсюдження вогню по поверхні дерев'яних конструкцій на різних стадіях розвитку пожежі;
- 4) досягнення здатності вогнестійкості в початковий період пожежі, при розвитку або в умовах розвинутої пожежі.

Для забезпечення головних цілей вогнезахисту поверхні дерев'яних конструкцій служать різні засоби вогнезахисту, з яких найефективнішими є просочувальні склади. Захист деревини тут полягає в тому, щоб, не дивлячись на прогресуюче розкладання деревини, не допустити полум'яне горіння продуктів розкладання, тобто горіння не розповсюджуватиметься за межі дії джерела горіння і при його видаленні полум'яного горіння деревини не буде.

В основному це досягається або розбавленням горючих газоподібних з'єднань негорючими газами, зниженням концентрації горючих речовин в області можливого горіння, або зменшенням поверхні газифікації, покриваючи деревину тонкою газонепроникною плівкою (розплав солей).

Ще в початку ХХ сторіччя встановлено, що вогнезахисна обробка деревини покриттями, тобто створення захисного шару на поверхні деревини, не є цілком надійним засобом її захисту на довгий час експлуатації, по-перше, через невисоку міцність всіх видів силікатів, по-друге, через невисокі адгезійні властивості силікатних композицій по відношенню до деревини. Більш дієвим способом захисту деревини є її просочення, при цьому вогнезахисні речовини проникають углиб деревини, заповнюючи пори і оточуючи волокна.

В даний час розрізняють поверхнєве і глибоке просочення [82]. Поверхнєве просочення характеризується проникненням вогнезахисних речовин в поверхнєвий шар деревини на глибину 2-7 мм, а глибока - на глибину понад 10-12 мм. Останній тип просочення реалізовуваний тільки в спеціальних умовах - в автоклавах і під тиском.

Сьогодні на ринку вогнезахисних засобів представлено безліч просочувальних складів.

В даний час вважають, що глибоке просочення деревини більш ефективно в порівнянні з поверхнєвою. Основна її перевага полягає в збереженні текстури деревини. В Україні застосовуються декілька видів глибоких просочень.

Ці просочення не атмосферостійкі і можуть застосовуватися тільки в середині приміщень з вогкістю не більше 60 - 70% в умовах, які виключають попадання вологи на поверхню деревини.

В той же час відомо, що просочення під тиском має істотні недоліки:

- знижуються міцнісні показники деревини (для окремих складів, до 30%);
- наявність в міжклітинному просторі деревного комплексу солей антипіренів, що в процесі експлуатації (коливання відносної вогкості, сонячна радіація, зміна температури повітря) веде до появи внутрішніх напруг і, як результат, - розриву волокон і, отже, до зниження міцності будівельної деревини; процес просочення під тиском вимагає застосування примусової температурної сушки просоченої деревини, що веде до усихання, викривлення і інших вад.

Поверхнєве (капілярне) просочення деревини не створює умови, сприяючі зниженню міцності і створенню внутрішніх напруг. Завдяки цим якостям, а також простоті нанесення, поверхнєві просочення найбільш поширені на ринку засобів вогнезахисту: МС, ПП, Ы1А-8, ВАНН-1, БАН, ОК-ДС, ОК-ГФ, КОС-Д, "Пірілак", САї, ТП, МС-0,2, "Файрекс-200", "СЕНЕЖ-ОБ", "Фобос-7", ОЗП-Д, ЕСМА. Аналіз складів просочень показав, що в Україні найбільш поширені

сольові антипірени. Це пояснюється тим, що можливі численні комбінації сольових інгредієнтів, їх дешевизною і простотою приготування. З просочувальних складів, до сольових антипіренів відносяться: МС, ПП, ТП, САІ, МС-02, КСД, ВАНН-1, КОС-Д. Механізм дії таких антипіренів полягає в тому, що розчини сольових композицій проникають углиб, промочуючи поверхневий шар деревини. Після випаровування води - носія антипірену вглиб деревини сольові складові мінералізуються серед волокон клітковини, завдяки чому створюється захисний шар. Переваги сольових антипіренів полягають в дешевизні і простоті вогнезахисної обробки дерев'яних конструкцій. Головним недоліком є крайня недовговічність вогнезахисного шару. Волога і вуглекислий газ, що знаходиться в атмосфері, руйнує мінеральний шар протягом півтора - двох років навіть у разі експлуатації конструкцій в середині приміщень. До недоліків сольових антипіренів можна віднести "висолювання" препаратів на поверхні деревини, що робить неможливим покриття конструкцій лакофарбними матеріалами.

Окрім сольових антипіренів широко застосовуються також антипірени-реагенти, перетворюючи клітковину поверхневого шару деревини у важкогорючі з'єднання. Перевага таких складів полягає в довговічності вогнезахисної обробки. Оброблені реагентами дерев'яні конструкції допустимо покривати будь-якими видами лакофарбових матеріалів за винятком цементних компаундів. До недоліків реагентів можна віднести тривалий час реакції препарату з деревиною - до 15 днів. З просочувальних складів до антипіренам-реагентів відносяться: ДСА-1, ДСА-2, ФСГ-1, "Файрекс", "ХМББ-3324, FRB-34С, ECOSEPT – 530, ОГНЕХРОН, ВАНН-1. Особливої уваги заслуговує новий надзвичайно ефективний склад "Пірілакс". Він поєднує в собі вогне- і біозахисні властивості. "Пірілакс" є єдиним вогнезахисним складом, застосовувати який можна в умовах будівельного майданчика аж до температури мінус 15 °С. До того ж на сьогоднішній день це досить дешевий просочувальний склад.

Аналіз шляху розвитку вогнезахисних просочувальних складів, їх застосування в будівельній справі для підвищення протипожежної стійкості конструкцій, виробів з деревини показує, що пріоритетними є склади, здатні при мінімальних витратах забезпечити необхідні параметри вогнезахищеності, при цьому не понизивши і не погіршивши експлуатаційні якості деревини, основними з яких є: санітарно-гігієнічні, механічні, естетичні, показники корозійної дії, димоутворення і т.д. Такий широкий спектр вимог до сучасного вогнезахисту зобов'язав дослідників постійно розширювати область експериментів. Це привело до початку розробки нового вітчизняного просочення, компоненти якого будуть хімічно пов'язані з молекулами целюлози, що виключить вивітрювання антипірена з поверхні.

2.5. Сучасний стан проблеми вогнезахисту деревних матеріалів.

Проблема вогнезахисту деревних матеріалів є багатоаспектною і охоплює як фундаментальні дослідження процесів горіння, так і прикладні розробки ефективних технологій просочення. Сучасний стан цієї галузі визначається чотирма ключовими напрямками, які взаємно доповнюють один одного: вивченням механізмів горіння та їх гальмування, пошуком нових антипіренів підвищеної ефективності, а також удосконаленням технологій введення вогнезахисних речовин безпосередньо у структуру деревини.

Дослідження процесів розвитку горіння деревних матеріалів свідчать про те, що запалення та подальше поширення полум'я визначаються не лише хімічним складом деревини, а й умовами теплового впливу, вологістю матеріалу та особливостями його мікроструктури. Встановлено, що ефективне гальмування горіння досягається шляхом втручання у декілька стадій процесу одночасно - від термічної деструкції до розвитку ланцюгових реакцій у газовій фазі. Це визначає необхідність комплексного підходу до розробки вогнезахисних засобів. Щодо підвищення вогнезахисної ефективності антипіренів, сучасні дослідження зосереджені на створенні синергетичних композицій, у яких компоненти підсилюють дію один одного. Зокрема, поєднання фосфоровмісних

та азотовмісних сполук дозволяє одночасно впливати на конденсовану та газову фази горіння, що суттєво підвищує ефективність вогнезахисту порівняно з однокомпонентними системами. Паралельно ведуться роботи зі зниження негативного впливу антипіренів на механічні властивості деревини та їх стійкість до вимивання. Серед технологічних методів введення антипіренів особливий інтерес становить спосіб крізного просочення деревини в полі відцентрових сил. Суть методу полягає у тому, що деревину розміщують у центрифугі, і під дією відцентрового прискорення просочувальний розчин примусово проникає у клітинну структуру матеріалу, витісняючи повітря з пор. Такий підхід дозволяє досягти значно більшої глибини просочення порівняно з традиційними методами занурення або нанесення пензлем, при цьому скорочуючи тривалість технологічного процесу. Поряд із відцентровим просоченням широко застосовується метод просочення деревини в автоклавах під тиском. Технологія передбачає попереднє вакуумування деревини для видалення повітря з капілярів, після чого під надлишковим тиском у камеру подається розчин антипірену. Завдяки значному перепаду тисків просочувальний склад рівномірно розподіляється по всьому об'єму матеріалу, забезпечуючи стабільний і відтворюваний рівень вогнезахисту. Цей метод вважається одним із найефективніших для деревини, що експлуатується у відповідальних конструкціях або в умовах підвищеної вологості.

2.5.1. Процеси розвитку горіння деревних матеріалів і шляху їх гальмування.

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 %.

Виникнення пожеж рослинних матеріалів відбувається по наступній схемі. Зовнішнє джерело тепла нагріває вологий матеріал до температури 30 - 60 °С - починається помітне випаровування вологи, при подальшому нагріванні до 100 °С відбувається сушка матеріалу, яка продовжується в інертному режимі до температури 250 °С. Починаючи з температури 250 °С до температури приблизно 350 °С, відбувається розкладання більшої частини горючих рослинних матеріалів, яке супроводжується виділенням газів (йде процес газифікації). Далі відбувається нагрів вуглецевого залишку до температури його запалювання, яка наприклад для хвої сосни складає 450.. 500 °С. На даному етапі за допомогою антипіренів певного класу, здатних знижувати температуру поверхні деревини нижче за температуру її запалювання, можна впливати на процеси початку розкладання деревних складових. Для деревини сосни вогкістю 8 - 9 % температура запалювання рівна 255 °С, ялини - 214°С, дуба-238 °С. При цих температурах з деревини виділяються горючі гази, які за наявності джерела запалення здатні запалати і самостійно підтримувати горіння тривалий час. Після запалювання температура верхнього шару деревини підвищується за рахунок тепла, випромінюваного полум'ям, і досягає 290...300 °С. При цій температурі вихід газоподібних продуктів досягає 40 %, а висота полум'я - найбільша. З приведених в літературі [83] даних відомо, що такі види деревини розкладаються з виділенням горючих газів при температурах: целюлоза - 240...350°С; гемміцеллюлоза - 200...260 °С; лігнін - 280...500 °С. В результаті розкладання верхній шар деревини обвуглюється, оскільки весь кисень, який поступає з повітря, вступає у взаємодію в зоні полум'яного горіння і не досягає зони розташування вугілля. Температура вугілля досягає 500... 700 °С, нижній шар деревини встигає прогрітися до 300 °С і починає розкладатися. Надалі полум'я залишається у тріщинах вугілля, а кисень вже може досягати поверхні вугілля - цей початок безполуменевого горіння вугілля (процес тління), одночасно продовжується горіння продуктів розкладання деревини, шар вугілля збільшується і може досягати товщини 20...25 мм. Для повного згоряння 1 кг деревини вогкістю 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 згорянні - додатково оксид вуглецю і вуглець (сажа) [84].

Таким чином, інтенсивне фізичне руйнування починається на поверхні обвугленої 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 обвуглювання, 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 [85] показано, що більш ніж в двічі можна збільшити вихід вуглистого залишку шляхом обробки сосни фосфатами і боратами, а вихід летких продуктів зміниться за рахунок зменшення горючої смоли, а значить зменшиться теплота згоряти летких горючих продуктів і кількість тепла, доставляється на поверхню деревини. В результаті, для підтримки горіння потрібно буде більш могутній 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 °С 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. При горінні деревини температурний режим пожежі залежить від горючого завантаження і досягає максимальних значень: 800.. .830 °С на 20-й хв пожежі при питомому завантаженні 25 кг/м²; 830.. .850 °С на 35-й хв пожежі при питомому завантаженні 50 кг/м²; 950...1000 °С на 70-й хв пожежі при питомому завантаженні 100 кг/м² [86]. Ці температурні тимчасові характеристики співпадають із стандартним графіком розвитку пожежі. Залежно від температури при розкладанні деревини змінюються кількість і якість: при 200 °С випаровується 75 % Н₂О; і 25 % Н₂О (на 100 кг деревини

приблизно $0,4 \text{ м}^3$ газів); при $300 \text{ }^\circ\text{C}$ виділяються $5,6 \text{ м}^3$ газів складу CO_2 і CH_4 ; при $400 \text{ }^\circ\text{C}$, $500 \text{ }^\circ\text{C}$, $600 \text{ }^\circ\text{C}$ і $700 \text{ }^\circ\text{C}$ виділяються CO , CH_4 і H_2 в кількостях $9,5 \text{ м}^3$, $12,8 \text{ м}^3$, $14,3 \text{ м}^3$ і 16 м^3 відповідно. За даними [86] питома масова швидкість вигорання деревини вогкістю 10% складає при температурі $500 \text{ }^\circ\text{C}$ $0,34 \text{ г}/(\text{м}^2/\text{хв})$; при $700 \text{ }^\circ\text{C}$ - $0,45 \text{ кг}/(\text{ м}^2/\text{хв})$ і при $900 \text{ }^\circ\text{C}$ - $0,65 \text{ кг}/(\text{ м}^2/\text{хв})$.

З приведених даних витікає, що середня швидкість при горінні деревини складає приблизно $0,5 \text{ кг}/(\text{м}^2 * \text{хв})$, а швидкість розповсюдження полум'я при горінні, наприклад, штабелю дощок вогкістю 8 - 10 % рівна приблизно $4 \text{ м}/\text{хв}$. 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 складається з полум'яного горіння і горіння вугілля - безполуменевого горіння (тління), а також перехідної фази, складається з полум'яного горіння і горіння вугілля одночасно. 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 [87], 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 $1070...1180 \text{ }^\circ\text{C}$, при лісових пожежах близько $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, теоретична ж температура горіння складає $1570...1605 \text{ }^\circ\text{C}$. В 1916 році вперше була введена концепція вогнестійкості [86, 87], заснована на спостереженнях за температурами пожеж деревини. Як відомо, 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 [82] стандартна температура розвитку пожежі будується по математичній залежності:

$$T=345 \lg(8\tau+1)$$

Горіння завжди супроводжується теплообміном, який виявляється у вигляді теплопровідності, конвективного теплообміну і променистого (теплого) випромінювання [79]. 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 робить 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 теплопереносу і визначає зростання і розповсюдження пожежі в приміщеннях, перенесення вогню на сусідні будівлі [80]. 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 [82]. 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 [88], 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 [89]. В роботах [89,90] вивчені процеси затримки часу

запалювання за допомогою енергетичного критерію. Для застосовності енергетичного критерію можливо використання усереднених критеріїв, наприклад, згідно [87-89] 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 [88]. Таким чином, можливо визначення запалювання об'єкту на будь-якій висоті будівлі. В роботах [89,90] визначені показники критичних теплових потоків і критичних енергій: для сосни вогкістю 12 % - 12,86 кВт/м² і 18,37 кВт*хв/м² [89], для деревини без урахування породи - 11,22 кВт/м² і 28,88 кВт*хв/м² відповідно [90]. Узагальнені теплотехнічні дані теорії горіння рослинних і деревних матеріалів показують, що для вирішення задач вогнезахисту інгредієнти, входить 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. У роботі [90] здійснено аналіз механізмів дії найбільш поширених антипіренів, результати якого систематизовано та узагальнено у вигляді таблиці.

Таблиця 2.3. Класифікація антипіренів за механізмом дії

Флегматизація (розбавлення)	Зміна теплових властивостей	Інгібування хімічних реакцій	Утворення шару вуглецю	Утворення керамікоподібного шару
Ортофосфорна кислота Фосфонати Фосфат	Гідроксид алюмінію Ціанурати Гідроксид	Бром Хлор	Фосфат гуанілсечовини Фосфат амонію	Бром Борна кислота Діоксид

меламіну	магнію		Ортофосф	кремнію
Тетраборат	Ацетат		орна кислота	Силікат
натрію			Фосфонат	калію
Диціандіамі			и	Силікат
д			Фосфат	натрію
Сульфат			меламіну	Оксид заліза
амонію			Тетрабора	Оксид
Бікарбонат			т натрію	алюмінію
амонію			Диціандіа	
Гідроксид			мід	
алюмінію			Борна	
Хлорид			кислота	
магнію				
Бікарбонат				
калію				

Наведена в таблиці 2.3 класифікація антипіренів за механізмом дії дозволяє узагальнити основні принципи їх вогнезахисного впливу на матеріал. Залежно від типу дії антипірени можуть як інгібувати процеси горіння в газовій фазі, так і сприяти утворенню захисного коксового шару, що ізолює матеріал від дії високих температур. Такий поділ є важливим для правильного вибору складу вогнезахисних систем відповідно до умов експлуатації та вимог до ступеня вогнестійкості.

2.5.2. Основні напрями підвищення вогнезахисної ефективності антипіренів для деревних матеріалів.

Деревина, піддана вогнезахисту, чинить підвищений опір дії факела полум'я при розвитку пожежі. В роботі [91] був проведений аналіз кислого фосфорування, показано, що фосфор і азотовмісні антипірени сприяють зменшенню виходу смоли і горючих газоподібних продуктів розкладання і збільшенню кількості карбонізованого залишку [92-95]. Наявність фосфорної кислоти у вогнезахисних композиціях змінює співвідношення з CO до CO₂ у напрямі інгібування прямого окислення вуглецю в CO₂, в значній мірі знижуючи екзотермічний ефект процесу [93]. 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 [94] 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 [95]. Кисле фосфорування деревини знайшов широкий розвиток в області створення антипіренних систем, вирішальних практичні задачі вогне- та біозахисту. Вогнезахисні засоби на основі фосфорної кислоти і сечовини [93,94], водні розчини фосфорної кислоти і цианаміда [92-95], ортофосфорної кислоти, сечовини, диціандіаміда [94,95], ортофосфорної кислоти, сечовини, триполіфосфата натрію [95,96], ортофосфорної кислоти, сечовини, триполіфосфата натрію, біозасобів [96], фосфорорганічні з'єднання на основі ефірів фосфорної кислоти, амідифосфатів [97] - зразковий ряд

практичного розвитку теорії вогнезахисту, процесів кислого фосфорування. В дослідженнях [98] є видимим якісне вдосконалення засобів вогнезахисту з використанням відомих технологій "глибокого" просочення. Вогнезахисні засоби на основі фосфорної кислоти і сечовини [94-98] дозволяють досягти важкогорючих властивостей деревині при проникненні на достатню глибину необхідної кількості антипіренів. Різноманітність використання фосфор-, азотовмісних антипіренів, яка показана в роботах [99], заснована на їх здатності пригнічувати процеси горіння і тління одночасно - виконувати роль запальника і антиокисника. 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 тління вугілля [95]. Ефект же вогнезахисту деревних матеріалів при покритті їх шаром лаків і фарб, заснований, головним чином, на утворенні теплоізолюючого шару на поверхні матеріалу в процесі теплової дії. Першим вогнезахисним лаком, працюючим за такою схемою, можна рахувати лак. Він широко застосовувався для вогнезахисних робіт в країнах Східної Європи до 1997 року. На ефекті вспінювання отриманий великий спектр вогнезахисних покриттів, які володіють теплоізолюючими властивостями, до них відносяться і склади на основі поліфосфатів, епоксидних і формальдегідних смол. 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 вогнезахищеності 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 деревині при витраті розчину антипірену не менше 450 л/м^3 , що відповідають 66 кг/м^3 сухих солей); при просоченні по методу гарячохолодних ванн - вогнезахисні засоби з використанням антипіренів, які при перемішуванні знаходять ефект синергізму (БАН, ВАНН-1, ФАХ) [95]. При поверхневій обробці деревини методом капілярного просочення вище перелічені антипірени дають менший вогнезахисний ефект.

2.5.3. Спосіб крізного просочення деревини в полі відцентрових сил.

Спосіб просочення пиломатеріалів в полі відцентрових сил вперше був упроваджений в Болгарії, а починаючи з 1985 по 1991 року, використовувався в Середній Азії для виробництва протипожежних дверей для ряду громадських будівель будівель. Суть способу полягає в створенні градієнта тиску рідини за рахунок зміни діаметра і швидкості обертання центрифуги [100]. Як показали дослідження, проведені за участю автора даної роботи, даним способом можлива якісний вогнезахист масивної деревини довжиною до 2,4 м при радіусі обертання 3 м. Вогнезахисний ефект досягається за допомогою просочення з одного торця на довжину не більше 1,2 м, а потім з іншого торця на таку ж довжину, що на практиці здійснюється шляхом повороту на 180 градусів. При проведенні експериментів на промисловій установці радіусом 3 м використовувався склад МС 1:1, а в подальшому вогнезахисний засіб БАН. Вогняні стандартні випробування по ГОСТ 16363 показали, що втрата маси зразків змінювалася у міру видалення від торця дерев'яного бруса до центру і досягши довжини 1,2 м досягала 9 - межі, допустимої для групи важкогорючих

матеріалів. Це значить, що при проведенні просочення дерев'яних брусів з двох торців можливо отримати важкогорючий матеріал завдовжки до 2.4 м. але вогнезахисний засіб в масі деревини буде концентруватися у торців і зменшуватися до центру дерев'яного бруса. Нерівномірність розміщення вогнезахисного засобу не тільки не забезпечує рівномірність вогнезахисної ефективності, але і створює додаткові складнощі: при однаковому перетині різна густина на різних ділянках збільшує навантаження на повітряну опору центрифуги, що значною мірою знижує продуктивність, надійність і довговічність установки; нерівномірність поглинання вологи на різних ділянках довжини бруса (перенасичення розчином торцевих ділянок) веде до зниження міцностних експлуатаційних показників деревини. При вогняній дії на масивну деревину волога йде в центральну її частину, і центр перерізу дерев'яного виробу в процесі пожежі має температуру 100 °С вже за рахунок міграції вологи до центру перерізу, тобто антипірени, знаходяться в глибині перерізу дерев'яного виробу, практично не беруть участь в інгібуванні процесів горіння деревини. Це значить, що вогнезахист дерев'яної конструкції по всьому перерізу не створює додаткових заходів захисту від вогню, а тільки веде до перевитрати хімічних реактивів, вимагає великих витрат електроенергії, використання спеціальних сплавів для виготовлення відцентрової установки, технологія складна для механізації і трудомістка при практичній реалізації. Тому даний спосіб сьогодні в Україні практично не використовується.

2.5.4. Спосіб просочення деревини в автоклавах під тиском.

Спосіб вогнезахисту деревини просоченням в автоклавах достатньо вивчений і широко відомий. Залежно від асортименту антипіренів процес ведеться по схемі, висловлюваній в технологічному регламенті на конкретну технологію і устаткування. При цьому головними умовами якості є досягнення оптимальної глибини просочення (важкопросочувальні зони - не менше 7 мм,

легкопросочувальні зони - не менше 10 мм) і важкогорючих властивостей просоченими виробами. В Україні сьогодні існують три ділянки по автоклавному просоченню способом "вакуум-тиск-вакуум".

Для досягнення важкогорючих властивостей складом МС 1:1 вимагається ввести в масу деревини не менше 450 л/м³ розчину. Це досягається тільки за допомогою автоклавного просочення. Тривалість процесу, наприклад для деревини сосни довжиною до 6 м без попередньої сушки, складає близько 24 год при вакуумуванні 0,074 МПа і подальшому тиску 1,2 МПа, яке повинне підтримуватися протягом 12 год. При цьому вимагається ураховувати, що склад МС 1:1 відноситься до нестійких вогнезахисних засобів і область його використання обмежена відносною вогкістю повітря до 70 %.

Основні недоліки технології просочення деревини в автоклавах полягають в тривалості і енергонасиченості процесу, металоємності устаткування і зниженні міцності параметрів деревини, так, наприклад, міцність просоченої деревини складом МС 1:1 і ВААН-1 на вигин знижується до 30 і 20 % відповідно. Стримуючими чинниками широкого впровадження з урахуванням вищеназваних недоліків також є: обов'язкова доставка будівельних виробів до місця просочення, а просочених - до місця будівництва; неможливість забезпечення збереження вогнезахисних властивостей від атмосферних опадів при їх транспортуванні, зберіганні і будівництві; зниження вогнезахисності виробу в цілому при його механічній обробці; низький ефект вогнезахисту деревини ялини і сосни з великим змістом ядра.

2.6. Механізм дії просочувальної суміші при поєднанні антипірену та антисептику.

В даний час відомі різні рецептури просочувальних складів, які представляють собою водні розчини солей (антипіренів). Введення в них антисептиків дозволяє охороняти деревину ще й від біоруйнування.

Вогнебіозахисні просочень на основі органічних розчинників не існує - всі вони водорозчинні. І діляться на дві групи: перша - просочення на водній основі без сполучного, друга - просочення на водній основі зі сполучною. Як правило, це водно-дисперсійні акрилові склади, що утворюють на поверхні деревини полімерну плівку.

Виробники сходяться в одному: застосовувати один комплексний препарат набагато зручніше, ніж три різних (антисептик, антипірен, лак). З одного боку, утворення на поверхні плівки, що оберігає деревину від впливу води та перешкоджає вимиванню компонентів просочення, є позитивним фактором. Однак після одноразового нанесення складу складно оцінити, наскільки рівномірно та достатньо глибоко ми просочили деревину і чи надали їй необхідні властивості, оскільки подальше коригування вже неможливе через утворення плівки, крізь яку нові порції складу не проникають у матеріал. Крім того, слід враховувати, що термін служби антипіренів і антисептиків у складі вогнебіозахисних просочень зазвичай різний: для антипіренів він становить 2–5 років, тоді як для антисептиків - 5 років і більше. Після закінчення гарантійного терміну служби антипірену деревина втрачає свої вогнезахисні властивості і потребує повторної обробки, тоді як антисептичний захист ще може залишатися ефективним.

2.7. Інші види антисептиків.

Всі існуючі антисептики для деревини можна умовно розділити на два види: декоративні склади і захисні склади. Декоративні склади. Здавна відомі такі засоби захисту деревини, як оліфа і масляна фарба. Захисні властивості досягаються шляхом створення на поверхні деревини водовідштовхувального (маслянистого) шару. Недоліки таких засобів - тривалий час висихання, відносно низькі декоративні властивості, відсутність антисептичних добавок у складі, недовговічність покриття. У сучасному будівництві вони застосовуються обмежено. Просочення на основі алкідних смол в органічних

розчинниках володіють високими захисними та декоративними властивостями. Вони підкреслюють природну текстуру деревини і, крім того, дозволяють імітувати цінні породи дерева. Міститься в їх складі розчинник Уайт-спірит забезпечує хороше зчеплення і глибоке проникнення корисних (захисних) речовин в підкладку, а також знищує мікроорганізми і комах в поверхневому шарі деревини. Недоліки таких складів - вогнебезпечність і різкий запах під час проведення робіт. Вони широко застосовуються в сучасному будівництві для декоративного оздоблення деревини, в основному для зовнішніх робіт. Термін служби покриття 4-6 років. Суміші на базі водних дисперсій синтетичних полімерів характеризуються слабким, майже до повної відсутності, запахом, швидким висиханням з утворенням на поверхні міцної, не проникною для води, але «дихаючої» плівки і дуже високими декоративними властивостями покриття. Ці переваги роблять подібні матеріали незамінними при роботі всередині приміщень. Термін служби покриття 4-6 років.

Відповідно до ГОСТ 200022 захисні засоби деревини за стійкістю до вимивання ділять на ті, що легко вимиваються (ЛВ), що вимиваються (В), ті, які важко вимиваються (ТВ), ті, які не вимиваються (НВ). За розчинності їх ділять на водорозчинні (ВР); розчинні в легких органічних розчинниках (Л); розчинні в маслах (М) і важких нафтопродуктах (креозот різного складу, нафтові олії). Останні застосовують переважно при контакті деревини із землею, для обробки опор ліній електропередач і зв'язку, шпал, деталей мостів і берегових споруд. Термін служби покриття 35-40 років. Однак, з екологічних міркувань, використання цих коштів в даний час дуже обмежений. Водорозчинні (ВР) склади застосовують на стадії будівництва або ремонту для обробки деревини в місцях можливого розвитку біоруйнівників або для обробки вже уражених ділянок. Оброблена деревина склеюється і забарвлюється будь-якими лакофарбовими матеріалами. Не утворює плівки, не перешкоджає «дихання» деревини. Ці склади пожегобезпечні, не має запаху. Ідеально підходять для обробки прихованих порожнин. Ті, які важко вимиваються і невимиваємі

склади надійно захищають деревину від широкого спектру грибів і комах на тривалий термін (25-30 років) в екстремальних умовах експлуатації. Деякими видами захисних складів можна обробляти сиру деревину. На сучасному ринку представлена велика кількість водорозчинних складів. Більшість з них володіє тільки профілактичним або вузьконаправленою дією і часто не відповідає екологічним вимогам. Обробка антисептиками полягає в обробці деревини спеціальними хімічними засобами. Антисептики повинні володіти високою токсичністю стосовно грибів, бути стійкими, добре проникати в деревину, не мати неприємного запаху, бути нешкідливими для людини і домашніх тварин, не погіршувати фізико-механічних властивостей деревини і не викликати корозії металевих з'єднань і кріплень дерев'яних елементів. Антисептування проводять такими методами: гідропультуванням, нанесенням антисептичних розчинів кистями; короткочасним зануренням дерев'яних деталей; короткочасним зануренням дерев'яних деталей в розчини з підігрівом або без підігріву; вимочуванням. Антисептування деревини здійснюють водорозчинними і маслянистими антисептиками, а також антисептичні пастами. Перевіреним тривалою практикою універсальний високоефективний і безпечний концентрований засіб на основі четвертинних амонієвих сполук і синергічно діючих добавок. Призначений для дезінфекції, достерилізаційного очищення і санітарної обробки широкого спектру об'єктів. Поєднує антимікробну, миючу і дезодоруючу дію, не фіксує забруднення, не ушкоджує об'єкти обробки. Ефективний у відношенні найбільш стійких інфекційних збудників, в т.ч. поліовірусів, бактеріальних спор, збудників туберкульозу та дерматомікозів. Безпечний для об'єктів обробки і людей, дозволений до застосування у присутності пацієнтів. Має режими достерилізаційного очищення виробів медичного призначення, поєднаного з їх дезінфекцією, а також дезінфекції високого рівня ендоскопів та медичних інструментів до них. Може використовуватись в ультразвуковому та циркуляційному мийному обладнанні. Володіє залишковою (пролонгованою) антимікробною дією. Вогнебіозахисний засіб представляє собою розчин антипіренів та біоцидів у

питній воді і відноситься до захисних засобів комбінованої дії. При контакті з деревиною засіб реагує з целюлозними фрагментами поверхневих шарів деревини, утворюючи вогнебіозахисні покриття, які важко вимиваються і які при дії високих температур розкладаються, утворюючи інертні гази оберігають дерев'яні конструкції від загоряння.

2.8. Застосування речовин.

Одним з показників ефективності вогнезахисту деревини є її експлуатаційна надійність. Після надання деревині вогнебіозахисних властивостей, ефективність вогнезахисту визначається здатністю просочувальних засобів утримуватися в її структурі протягом тривалого проміжку часу за умов коливання температури та вологості в широких межах, у зв'язку з чим актуальним є питання визначення тривалості ефективності вогнебіозахисту деревини. Під час захисту штабеля розчином бішофіту така кореляція не спостерігалась. Цей факт пояснено тим, що суміш «Бішофіт» здатна знижувати горючість деревини. Застосування розчинів названих речовин для захисту об'єктів визнано доцільним, проте вказується, що їм притаманна висока корозійна активність. Для визначення найбільш оптимального складу необхідно розглянути співвідношення компонентів в рецептурі антипірену – антисептика.

Таблиця 2.4. Орієнтовний компонентний склад антипіренової композиції АМОК-1

№	Найменування компонента	Найменування речовини, її формула	Г ДК мг · м ⁻³	Клас небезпеки згідно ГОСТ 12.1.007	Особлив дії на організм
	Ортофосфорна кислота (60%)	H ₃ PO ₄	1	2 (помірне)	Подразнює слизові оболонки, викликає кашель,

				небезпе чна)	ураження зубів та шкіри при тривалому впливі
	Крохмаль (попередньо набухлий у гарячій воді) (15%)	$(C_6H_{10}O_5)_n$	Не норму ється (пил – 6 мг/м ³)	4 (малоне безпечн а)	При вдиханні пилу – подразнення дихальних шляхів, можливі алергічні реакції
	Формалін (розчину 60% формальдегіду) (2,5-5%)	HCHO (розчин) 5	0,5	2 (помірн о небезпе чна)	Сильний подразник слизових, канцероген, викликає сльозотечу, головний біль, ураження ЦНС
	Диціандіамід (5-9%)	$C_2H_4N_4$	5	3 (помірн о небезпе чна)	Може викликати подразнення шкіри та слизових, впливає на печінку та нирки при тривалому впливі
	Карбамід (7%), $CO(NH_2)_2$	$CO(NH_2)_2$	10	4 (малоне безпечн а)	У високих концентраціях – подразнення слизових, можливі порушення метаболізму
	Бікарбонат калію (2-5%).	$KHCO_3$	Не норму ється (пил – 5 мг/м ³)	4 (малоне безпечн а)	При вдиханні пилу – подразнення дихальних шляхів, у великих дозах – порушення кислотно-

					лужного балансу
--	--	--	--	--	-----------------

2.9. Висновки за розділом

У результаті проведеного аналізу основних напрямів зниження горючості та підвищення біологічної стійкості деревини сформульовано такі наукові висновки:

1. Кількісно охарактеризовано кінетику термічної деструкції деревини: швидкість перевуглювання в реальних умовах пожежі становить 0,1–0,2 мм/хв і зростає зі збільшенням швидкості повітряного потоку. Середня глибина піролізного шару після 30 хвилин теплового впливу при 500–600 °С становить: для сосни - 15–25 мм, ялини - 15–20 мм, дуба - 20–30 мм, берези - 18–25 мм. Встановлено, що наростання вуглистого шару підвищує термічний опір і за певної товщини може спричинити самозгасання - цей ефект покладено в основу захисту за допомогою інтумесцентних покриттів.

2. Систематизовано шість основних шляхів зниження горючості деревини: (1) введення речовин з великою ентальпією фазового переходу при температурах, нижчих за температуру піролізу деревини; (2) зміна термічної деструкції у напрямку збільшення виходу негорючих газів; (3) збільшення виходу вуглистого карбонізованого залишку; (4) введення хімічних інгібіторів горіння; (5) нанесення матеріалів, здатних утворювати теплоізолювальний шар; (6) конструктивне облицювання негорючими матеріалами. Кожен із цих механізмів може бути реалізований окремо або в комбінації, що визначає вибір типу антипіренової системи.

3. Проаналізовано вплив природних чинників на деревину: встановлено, що вологість нижче 55 % сприяє розвитку грибкових захворювань, тоді як при 100

% вологості (повне водонасичення) деревина стійка до біологічних руйнівників. Дія концентрованих кислот (1 % H_2SO_4) та їдких лугів при підвищених температурах спричиняє гідроліз целюлози з утворенням глюкози $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n + n\text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6)_n$ та олузнення структури. Зазначені хімічні перетворення необхідно враховувати при формуванні складу вогнезахисних систем для уникнення деградації деревини через взаємодію з кислотними компонентами антипіренів.

4. Встановлено, що найефективнішими є фосфорно-азотні антипіренові системи. Введення фосфору в целюлозовмісний матеріал змінює механізм термічного розкладу: знижується температура початку термодеструкції на 20–30 °С, вихід горючих летких продуктів зменшується на 50 %, а вихід коксівного карбонізованого залишку збільшується на 70 %. Сполуки на основі ортофосфорної кислоти, карбаміду та диціандіаміду виявляють синергічну дію, одночасно виконуючи функції кислотного каталізатора, вуглецевого донора та газоутворювача - що є теоретичним підґрунтям для розроблення інтумесцентної системи АМОК-1.

5. Проведений аналіз вогнебіозахисних засобів показав, що сольові антипірени (МС, ПП, КОС-Д) є найдоступнішими, але недовговічними - термін захисту не перевищує 1,5–2 роки через вимивання мінерального шару. Антипірени-реагенти (ДСА-1, ФСГ-1, «Файрекс») забезпечують довший термін дії та сумісність з лакофарбовими матеріалами, але потребують до 15 діб для завершення реакції з деревиною. Засоби комбінованої вогнебіозахисної дії (на основі бішофіту, карбаміду, піноутворювачів) є найперспективнішими, поєднуючи в одному технологічному циклі захист від займання і біологічного руйнування, та є прообразом для розробки системи АМОК-1.

РОЗДІЛ 3.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ КОМПЛЕКСНОЇ ПОЛІМЕРНОЇ АНТИПІРЕНОВОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ АМІНОФОРМАЛЬДЕГІДНОГО КОМПЛЕКСУ «АМОК-1»

Забезпечення належного рівня вогнезахисту будівельних конструкцій і матеріалів є одним із пріоритетних досліджень пожежної безпеки. Особливу небезпеку в умовах пожежі становлять дерев'яні матеріали, які характеризуються високою горючістю та швидким поширенням полум'я. У зв'язку з цим актуальним є створення ефективних вогнезахисних композицій, що забезпечують формування теплоізоляційного шару та зниження швидкості термічної деструкції матеріалу [101].

Перспективним напрямом є застосування інтумесцентних полімерних систем на основі аміноформальдегідного комплексу, модифікованих фосфоровмісними сполуками та природними полімерними добавками. Такі композиції поєднують хімічний і фізичний механізми вогнезахисту, забезпечуючи синергічний ефект під час термічного впливу [102]. Модифікація таких смол ортофосфорною кислотою сприяє формуванню термостійких фосфоровмісних структур, що активують процеси вуглеутворення та знижують швидкість термічного розкладу матеріалів. Додаткове введення природних полімерів, зокрема крохмалю, дозволяє покращити плівкоутворювальні властивості композиції та підвищити її екологічну безпеку.

У цьому контексті особливий інтерес становить розроблена комплексна полімерна антипіренова система «АМОК-1», яка поєднує переваги синтетичних і природних компонентів. Метою даної роботи є проведення експериментальних досліджень ефективності вогнезахисної дії системи «АМОК-1» та оцінка її впливу на основні показники пожежної безпеки оброблених матеріалів.

3.1. Підбір методів та підготовка зразків деревини для дослідження вогнезахисної ефективності комплексного полімерної антипіренової системи АМОК-1

Для об'єктивної оцінки вогнезахисної ефективності комплексної полімерної антипіренової системи АМОК-1 необхідним є обґрунтований підбір методів дослідження та відповідна підготовка зразків деревини. Достовірність експериментальних результатів значною мірою визначається правильністю вибору методик випробувань, які повинні забезпечувати відтворюваність умов, відповідність нормативним вимогам та можливість кількісної оцінки впливу вогнезахисного покриття на процеси займання і горіння. [103]

Під час проведення експериментальних досліджень особлива увага приділяється стандартизації геометричних розмірів зразків, їх вологості, щільності та орієнтації волокон, оскільки зазначені фактори істотно впливають на термічну поведінку деревини. Крім того, підготовка поверхні зразків та спосіб нанесення антипіренової системи мають визначальне значення для формування суцільного захисного шару та забезпечення належної адгезії покриття до основи.

Підготовка проб вогнезахисного засобу проводились згідно ДСТУ 4479:2005 «Речовини вогнезахисні водорозчинні для деревини. Загальні технічні вимоги та методи». Стандарт регламентує порядок підготовки зразків, методи визначення вогнезахисної ефективності, індексу поширення полум'я, корозійної активності та строку експлуатації, а також вимоги до безпеки, маркування і оформлення протоколів випробувань. Згідно цього стандарту, Зразки деревини виготовляють із прямошарової сухої деревини сосни вологістю не більше 15 % і щільністю від 400 кг/м³ до 550 кг/м³ розмірами 150 мм х 60 мм х 30 мм. Бокові поверхні повинні бути обстругані, торцеві поверхні обпиляні і оброблені наждаком [104].

Підготовка зразків для випробувань проведена замовником, в приміщенні лабораторії. Оброблення зразків проводилось згідно з ГОСТ 20022.6-93 «Захист деревини. Способи просочення» способом «поверхневого просочення» шляхом

нанесення пензлем в два 2 шари та просушуванням тривалістю чотири годин перед наступним нанесенням [105].

Проведення випробування відбувалося за методикою ГОСТ 16363-98 «Засоби вогнезахисні для деревини. Методи визначення вогнезахисних властивостей». Суть методу оцінювання вогнезахисної ефективності просочувального засобу полягає у впливі протягом 2 хвилин полум'я пальника з заданими параметрами (початкова температура летких продуктів згоряння на виході з керамічної труби становить $200\text{ }^{\circ}\text{C} + 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) на зразок вогнезахисленої деревини, який розташовано в керамічній трубці установки «ОТМ», та визначенні втрати маси зразка деревини після вогневих випробувань. Випробуванням піддають 10 зразків деревини [106].

Згідно з ГОСТ 16363-98 вогнезахиснену деревину поділяють за ефективністю вогнезахисту на такі групи:

Таблиця 3.1. Групи ефективності вогнезахисту деревини згідно ГОСТ 16363-98

Втрата маси (ГОСТ 16363-98), %	Група ефективності вогнезахисту деревини
Не більше 9	1
Не більше 25	2

Якщо втрата маси зразків після випробувань становить більше 25 %, засіб не забезпечує вогнезахист деревини.

Втрату маси зразка, який піддають вогневим випробуванням, розраховують за формулою:

$$\Delta m = (m_1 - m_2) \times 100 / m_1, \quad (1)$$

де:

Δm - втрата маси зразка, %;

m_1 - маса зразка до випробувань, г;

m_2 - маса зразка після випробувань, г.

Витрату вогнезахисного засобу в розрахунку на суху речовину визначають за формулою:

$$R = (m_1 - m_0)/F, \quad (2)$$

де:

R - витрата вогнезахисного засобу (вогнезахисне покриття) в розрахунку на суху речовину, г/м²;

F - площа поверхні зразка, м²;

m₁ - маса зразка до проведення випробувань, г;

m₀ - маса зразка до нанесення покриття, г.

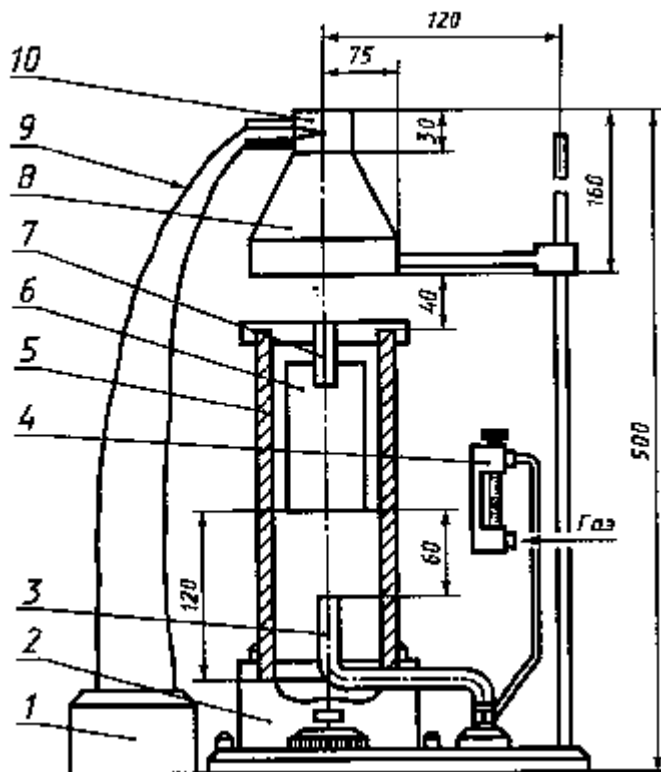


Рисунок 3.1 – Установа ОТМ 1 - потенціометр КСП-4; 2 – металева підставка; 3 - газова горілка; 4 - ротаметр; 5 - керамічний короб; 6 - зразок; 7 – тримач зразка 8 - зонт; .9 - термоелектричні перетворювачі; 10 - верхній патрубок зонта

Рисунок 3.1 відображає загальний вигляд установки ОТМ для визначення групи вогнезахисної ефективності. Установка включає потенціометр КСП-4 (1) для реєстрації температури, металеву підставку (2) для розміщення зразка,

газову горілку (3) як джерело теплового впливу, ротаметр (4) для регулювання витрати газу та керамічну трубку (5) для фіксації термомпари.

Випробування на визначення межі поширення вогню проводилося згідно додатку «Д» до ДБН В.1.1-7-2016 [107]. Методика проведення випробування полягає у вогневому впливі на зразок будівельної конструкції в спеціальній печі за стандартним температурним режимом. Перед початком випробування фіксують початкові температури в печі та на зразку. Початком випробування вважають момент увімкнення пальників.

Під час випробування протягом встановленого часу ($15 \pm 0,5$ хв) здійснюють безперервне вимірювання температури в печі та на зразку, а також візуальне спостереження за змінами стану зразка (деформації, тріщини, полум'я, дим, обвуглювання тощо) з фото- та/або відеофіксацією.

Після припинення нагрівання та охолодження зразка проводять його огляд із визначенням глибини та протяжності пошкоджень, що виникли внаслідок вогневого впливу. За результатами вимірювань встановлюють межу поширення вогню по конструкції та відносять її до відповідної групи (M0, M1 або M2).

З метою визначення впливу на шари обвуглення та піролізу було проведено випробування оброблених зразків сосни та берези на вогнестійкість та глибину термоокисної деструкції згідно ISO 834 [108].



Рисунок 3.2 – Випробувальна піч згідно ГОСТ 16363-98

3.2 Аналіз складу і концентрації компонентів рецептури АМОК-1

АМОК-1 це вогнезахисна суміш комбінованої дії для деревини та целюлозовмісних матеріалів, яка поєднує антипірени, термостабілізатори та компоненти, що утворюють теплоізоляційний шар при термічному впливі. Механізм дії композиції ґрунтується на одночасному хімічному та фізичному впливі на процеси термічного розкладу матеріалу, що забезпечує зниження швидкості займання, інтенсивності горіння та поширення полум'я.

Під час нагрівання антипіренові компоненти інгібують ланцюгові реакції горіння в газовій фазі, тоді як термостабілізатори сприяють підвищенню температури початку термічної деструкції деревини. Одночасно відбувається формування спіненого теплоізоляційного шару, який обмежує теплопередачу до поверхні матеріалу та зменшує доступ кисню, що істотно підвищує вогнестійкість оброблених зразків.

Вихідними компонентами для створення антипіренової вогнезахисної композиції є: ортофосфорна кислота (60%), крохмаль (попередньо набухлий у гарячій воді), формалін (2,5 - 25% розчину 60% формальдегіду), диціандіамід (9%), карбамід (7%), бікарбонат калію (2%).

Ортофосфорна кислота виконує функцію сильного кислотного каталізатора, який ініціює та прискорює реакції конденсації й полімеризації між компонентами вогнезахисної композиції. Крім того, вона активно взаємодіє з крохмалем, спричиняючи його частковий гідроліз до декстринів і низькомолекулярних вуглеводів. Це сприяє підвищенню реакційної здатності системи та формуванню термостійкої полімерної матриці. У процесі термічного впливу ортофосфатна кислота також стимулює дегідратацію целюлози з утворенням вуглецевого шару, що зменшує інтенсивність горіння. Крохмаль у складі композиції виконує роль полімерної основи та структуроутворювача. В умовах кислого середовища він частково гідролізується до глюкози та декстринів, які беруть участь у подальших реакціях конденсації з азотовмісними компонентами. У результаті формується просторово зшита полімерна сітка, що під час нагрівання здатна до спінювання та утворення

теплоізоляційного шару. Крохмаль також сприяє підвищенню адгезії вогнезахисного покриття до поверхні деревини.

Джерело формальдегіду в системі забезпечує утворення реакційно здатних метиленових груп, які беруть участь у процесах зшивання полімерних ланцюгів. Формальдегід взаємодіє з аміногрупами азотовмісних сполук, зокрема диціандіаміду та карбаміду, з утворенням метиленових містків. Це призводить до формування просторово зшитих термореактивних структур, які характеризуються підвищеною термостійкістю та здатністю до утворення захисного вуглецевого шару при нагріванні [109]. Розчин формаліну додатково виконує роль регулятора процесів полімеризації та зшивання в системі. Завдяки контрольованому вивільненню формальдегіду забезпечується рівномірне утворення полімерної сітки в об'ємі композиції. Це сприяє стабілізації структури вогнезахисного покриття та покращенню його експлуатаційних властивостей, зокрема стійкості до термічного впливу. Диціандіамід є активним азотовмісним компонентом, який бере участь у реакціях поліконденсації з формальдегідом, утворюючи меламіно-подібні полімерні структури. Під час термічного розкладу диціандіамід виділяє негорючі гази (переважно азотвмісні), що сприяє спіненню композиції та зниженню концентрації кисню в зоні горіння. Це забезпечує додатковий газофазний механізм вогнезахисту. Карбамід у складі композиції реагує з формальдегідом з утворенням метиленсечовинних смол, які підвищують механічну міцність і термостійкість полімерної матриці. При нагріванні карбамід також бере участь у процесах інтумесценції, сприяючи утворенню пористого теплоізоляційного шару та зменшенню теплового потоку до поверхні захищуваного матеріалу [110]. Бікарбонат калію виконує функцію регулятора кислотності системи, нейтралізуючи надлишок ортофосфатної кислоти та створюючи буферне середовище, оптимальне для перебігу реакцій конденсації. Під час термічного впливу він розкладається з виділенням вуглекислого газу (CO_2), який сприяє спіненню композиції та формуванню пористого теплоізоляційного шару, що ефективно обмежує доступ кисню та тепла до поверхні деревини [111].

У результаті змішування цих компонентів утвориться комплексна полімерна система на основі аміноформальдегідного комплексу (карбамідо- та диціандіамідоформальдегідних), модифікована ортофосфорною кислотою та крохмалем.

3.3 Опис реакцій і механізму дії вогнезахисного складу АМОК-1

Характеристика хімічних реакцій складу АМОК-1 обумовлюється взаємодією крохмалю з ортофосфатною кислотою, формальдегіду з карбамідом і диціандіамідом та конденсаційними реакціями між карбамідом і диціандіамідом у кислому середовищі. Реакція взаємодії крохмалю з ортофосфатною кислотою супроводжується частковим кислотним гідролізом полісахаридного ланцюга з утворенням декстринів і низькомолекулярних вуглеводів. Одночасно можливе фосфатування гідроксильних груп крохмалю з формуванням фосфатних ефірів, що підвищує термостійкість полімерної матриці. Утворені фосфорвмісні структури сприяють інтенсифікації процесів дегідратації та карбонізації при термічному впливі, що є ключовим чинником формування захисного вуглецевого шару [112]. Взаємодія формальдегіду з карбамідом і диціандіамідом призводить до реакцій поліконденсації з утворенням аміноформальдегідного комплексу різної просторової будови. Утворення метиленових та метилефірних містків між аміногрупами забезпечує формування термореактивних полімерів, які характеризуються підвищеною механічною міцністю та термостабільністю. Отримані смолисті структури відіграють важливу роль у зв'язуванні компонентів системи та забезпеченні цілісності вогнезахисного шару [113-114]. Конденсаційні реакції між карбамідом і диціандіамідом у кислому середовищі сприяють утворенню просторово зшитих сітчастих полімерів із високим вмістом азоту. Такі структури при нагріванні зазнають контрольованого термічного розкладу з виділенням негорючих газів, що інтенсифікує процеси інтумесценції. Утворений пористий шар характеризується низькою теплопровідністю та

ефективно зменшує тепловий потік до поверхні захищеного матеріалу [115-116]. Роль бікарбонату калію в реакційній системі полягає у частковій нейтралізації ортофосфатної кислоти та регулюванні кислотно-лужного балансу композиції. Створення буферного середовища забезпечує контрольований перебіг реакцій поліконденсації та запобігає надмірному руйнуванню полісахаридної складової. Крім того, при термічному впливі бікарбонат калію розкладається з виділенням вуглекислого газу, який додатково сприяє спіненню системи та стабілізації теплоізоляційного шару [116-117]. Розроблена вогнезахисна композиція АМОК-1 належить до інтумесцентних систем комбінованої дії, що забезпечують захист деревини та целюлозовмісних матеріалів за рахунок формування теплоізоляційного обвугленого шару при термічному впливі. Характерною особливістю композиції є пастоподібний стан при низьких температурах та різке спучування при нагріванні з утворенням пористого вуглецевого «пінококсу», об'єм якого зростає у 10-15 разів [118]. Композиція АМОК-1 є багатокomпонентною інтумесцентною системою, що поєднує джерело кислоти, вуглецевий донор, газоутворювальні компоненти та регулятор кислотності. Ортофосфорна кислота виступає кислотним агентом і каталізатором дегідратаційних процесів, крохмаль та продукти його гідролізу – джерелом вуглецю, а карбамід, диціандіамід і формальдегід - компонентами, що забезпечують утворення просторово зшитої полімерної структури та газоутворення. Бікарбонат калію виконує функцію буферного компонента та додаткового газогенератора [119].

За температур, близьких до кімнатних, композиція АМОК-1 має вигляд однорідної білої пасти з гелеподібною реологією. Такий стан зумовлений формуванням дисперсної сітчастої структури аміноформальдегідних продуктів поліконденсації, фізично взаємодіючих із набухлим крохмалем та фосфатними солями ортофосфатної кислоти [120]. Відсутність процесів карбонізації та пігментів обумовлює білий колір системи на холоді. Пастоподібна структура сприяє рівномірному нанесенню композиції на поверхню деревини та її утриманню без стікання.

Під час нагрівання або дії відкритого полум'я у композиції реалізується багатостадійний механізм інтенсуючого захисту. Ортофосфорна кислота та її калієві солі каталізують дегідратацію полісахаридної складової з утворенням вуглецевого каркаса. Одночасно відбувається термічний розклад газоутворювальних компонентів: бікарбонату калію з виділенням CO_2 , а також карбаміду й диціандіаміду з утворенням азотовмісних негорючих газів (NH_3 , CO_2). Виділені гази «надувають» розм'якшений полімерно-вуглецевий шар, спричиняючи його інтумесцентне спучування та формування пористої теплоізоляційної структури. У результаті утворюється обвуглений пінококс, який ефективно екранує поверхню матеріалу від теплового потоку та обмежує доступ кисню до зони горіння. Формальдегід у взаємодії з карбамідом і диціандіамідом утворює метилольні похідні та метиленові містки, які забезпечують формування просторово зшитої полімерної сітки. Така структура надає спіненому шару механічної міцності та стійкості до руйнування в умовах високих температур. Фосфатні та гідрофосфатні солі калію підвищують в'язкість розм'якшеного шару та стабілізують його структуру, запобігаючи стіканню композиції до завершення процесу спінення [115]. Таким чином, вогнезахисна дія композиції АМОК-1 реалізується за рахунок синергічної взаємодії кислотного, вуглецевого та газоутворювального компонентів. Формування інтенсуючого обвугленого шару з низькою теплопровідністю забезпечує ефективне зниження теплового впливу на деревину та уповільнення процесів займання й поширення полум'я, що підтверджує перспективність використання композиції АМОК-1 для вогнезахисту целюлозовмісних матеріалів.

3.4 Результати випробувань і досліджень

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що розроблена комплексна полімерна антипіренова система «АМОК-1» на основі аміноформальдегідного комплексу, модифікованих ортофосфорною кислотою та крохмалем, забезпечує суттєве підвищення вогнезахисних властивостей

оброблених конструкцій. За умов стандартного температурного режиму випробувань зафіксовано зниження інтенсивності термічного руйнування матеріалу, обмеження розвитку полум'я та формування стабільного теплоізолюючого шару коксу. Величина поширення вогню по поверхні зразків не перевищувала граничних значень, характерних для групи М1 або М2 (залежно від складу та товщини покриття), що свідчить про високу ефективність композиції. Додатково, за результатами випробувань на визначення вогнезахисної ефективності встановлено зниження втрати маси зразків та збільшення часу до займання, що підтверджує здатність покриття інтенсифікувати процеси термостійкої карбонізації та гальмувати теплове розкладання матеріалу. Отримані результати також демонструють зменшення глибини обвуглювання та уповільнення теплопередачі в товщу матеріалу, що в комплексі забезпечує підвищення межі вогнестійкості конструкцій і може бути рекомендовано для практичного застосування у системах вогнезахисту будівельних матеріалів.

3.4.1 Визначення групи вогнезахисної ефективності згідно за ГОСТ 16363-98.

У ході дослідження проводився ряд експериментів на визначення ефективності вогнезахисного засобу АМОК-1. Зокрема, на визначення групи вогнезахисної ефективності згідно з ГОСТ 16363-98 [111]. Зразки оброблялися згідно з ГОСТ 20022.6-93. Результати дослідження винесені в таблицях нижче.

Таблиця 3.2 – Результати дослідів на визначення групи вогнезахисної ефективності згідно з ГОСТ 16363-98 зразків, оброблених АМОК-1 на основі полівінілацетатного клею

№ Зразка для випробування	Маса зразка, г			Поглинання вогнезахисного засобу, g/m^2	Поглинання вогнезахисного засобу розраховане на суху речовину (R_1) , g/m^2	Втрата маси зразка г.	Втрата маси зразка (Р) після випробувань. %
	До просочення (m_0)	Перед випробування (m_1)	Після випробування (m_2)				

1	141,1	146,4	139,5	274,5	173,2	6,9	4,7
2	142,7	147,9	140,4	277,8	169,9	7,5	5,1
3	144,2	149,8	142,2	268,0	183,0	7,6	5,1
Середнє значення				273,4	175,4	7,3	5,0

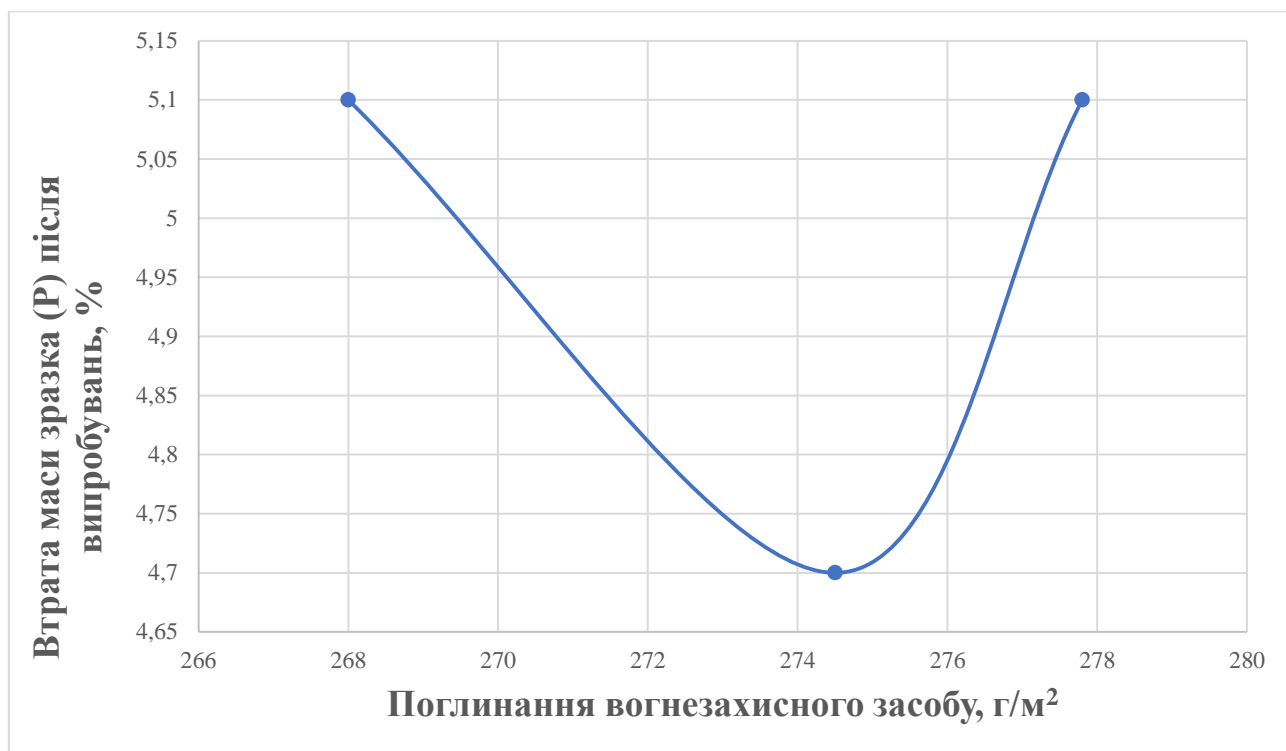


Рисунок 3.3 – Графік інтенсивності втрати маси зразків №1 (АМОК-1 на основі ПВА) за ГОСТ 16363-98.

Як видно з рис. 3.3, інтенсивність втрати маси зразків №1 (АМОК-1 на основі ПВА) є мінімальною серед усіх досліджуваних серій, що свідчить про високу ефективність сформованого вогнезахисного покриття. Характер кривої є плавним протягом усього періоду термічного впливу, що вказує на стабільність процесів термодеструкції та поступове утворення захисного пінококсового шару. Така поведінка обумовлена здатністю полівінілового клею забезпечувати формування однорідної полімерної матриці.

Таблиця 3.3 – Результати дослідів на визначення групи вогнезахисної ефективності згідно з ГОСТ 16363-98 зразків, оброблених АМОК-1 на основі силікатного клею.

№ зразка для випробування	Маса зразка, г			Поглинання вогнезахисного засобу, г/м ²	Поглинання вогнезахисного засобу в розрахунку на суху речовину (R _f), г/м ²	Втрата маси зразка г.	Втрата маси зразка після випробувань, %
	До просочення (m ₀)	Перед випробування (m ₁)	Після випробування (m ₂)				
1	141,7	147,4	136,5	274,5	186,3	10,9	7,4
2	141,2	147,7	137,6	297,4	212,4	10,1	6,8
3	141,3	147,6	137,3	294,1	205,9	10,3	7,0
Середнє значення				288,7	201,5	10,4	7,1

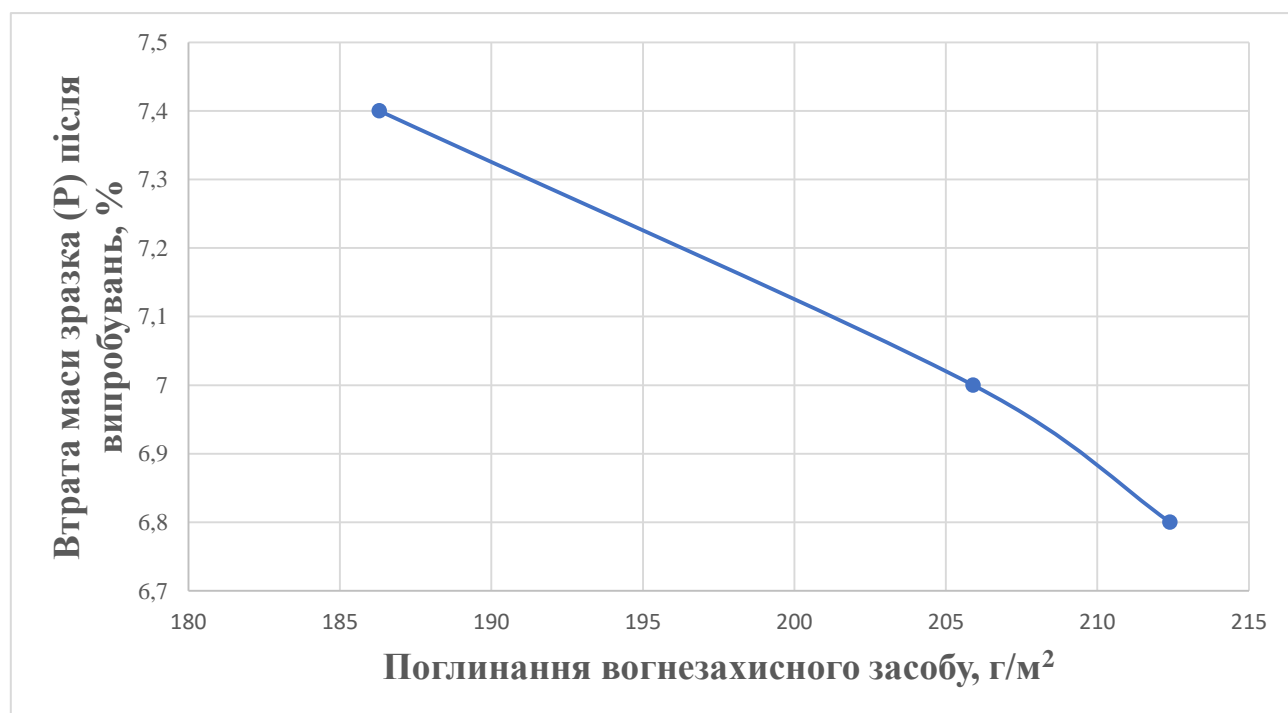


Рисунок 3.4 – Графік інтенсивності втрати маси зразків №2 (АМОК-1 на основі силікатного клею) за ГОСТ 16363-98

З рис. 3.4 видно, що зразки №2 (АМОК-1 на основі силікатного клею) демонструють дещо вищу інтенсивність втрати маси порівняно зі зразками №1. Це свідчить про меншу стабільність захисного шару під час термічного впливу.

Характер кривої вказує на менш рівномірний перебіг процесів термодеструкції, що може бути пов'язано з особливостями структуроутворення силікатного зв'язувального та його нижчою здатністю забезпечувати однорідний розподіл активних компонентів у складі композиції.

Таблиця 3.4 – Результати дослідів на визначення групи вогнезахисної ефективності згідно з ГОСТ 16363-98 зразків, оброблених АМОК-1 на основі карбоксиметилцелюлози

№ зразка для випробування	Маса зразка, г			Поглинання вогнезахисного засобу, г/м ²	Поглинання вогнезахисного засобу розрахунку на речовину (R ₁),	Втрати маси зразка г.	Втрати маси зразка (Р) після випробувань. %
	До просочення (m ₀)	Перед випробування (m ₁)	Після випробування (m ₂)				
1	142,4	148,1	139,4	287,6	186,3	8,7	5,9
2	142,3	147,2	138,6	294,1	160,1	8,6	5,8
3	141,8	147,6	139,5	307,2	189,5	8,1	5,5
Середнє значення				296	178,6	8,5	5,7

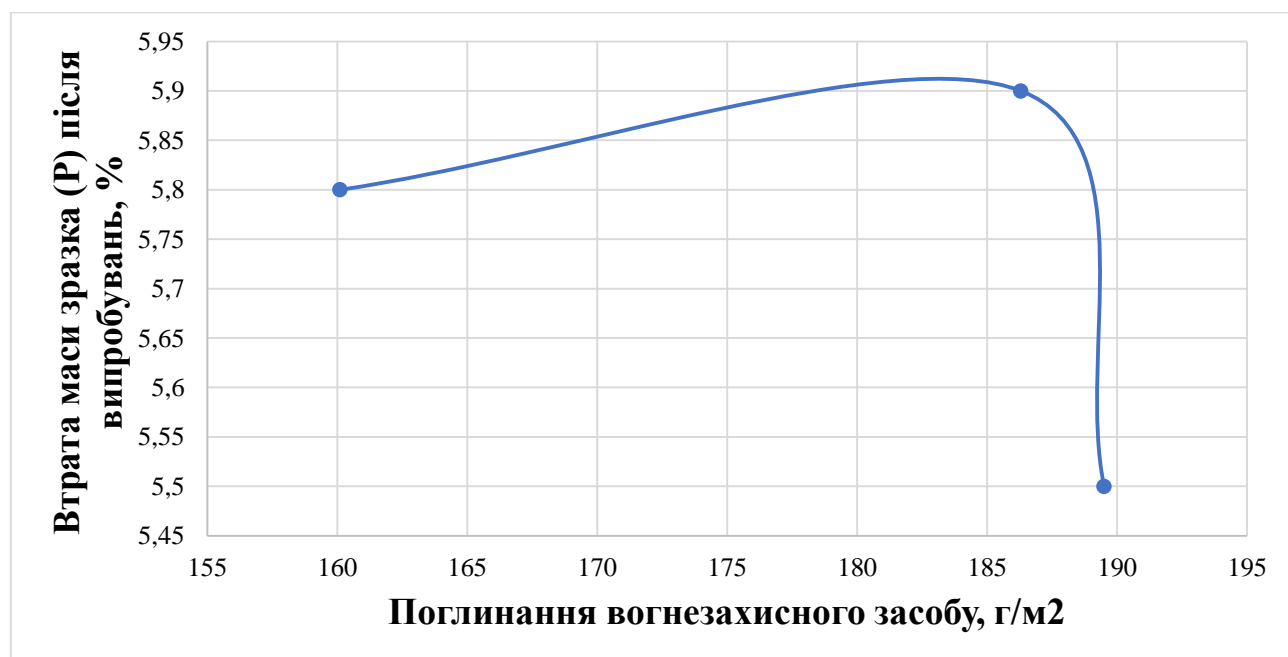


Рисунок 3.5 – Графік інтенсивності втрати маси зразків №3 (АМОК-1 на основі КМЦ) за ГОСТ 16363-98

Рис. 3.5 демонструє характер втрати маси зразків №3 (АМОК-1 на основі карбоксиметилцелюлози), який за середніми значеннями є порівнянним зі зразками №1. Плавний перебіг кривої свідчить про стабільний процес термодеструкції та ефективне формування захисного пінококсового шару, що забезпечує зниження швидкості теплопередачі до поверхні матеріалу. Отримані результати підтверджують доцільність використання карбоксиметилцелюлози як зв'язувального компонента вогнезахисної системи.

З результатів дослідження можна виділити, що середньостатистична втрата маси зразків №1 становить 5,0%, зразків №2 – 7,1%, зразків №3 – 5,7%. Середнє значення становить 5,93%. Отже можна зробити висновок, що згідно з ГОСТ 16363-98 вогнезахисна композиція АМОК-1 відноситься до 1 групи вогнезахисної ефективності.

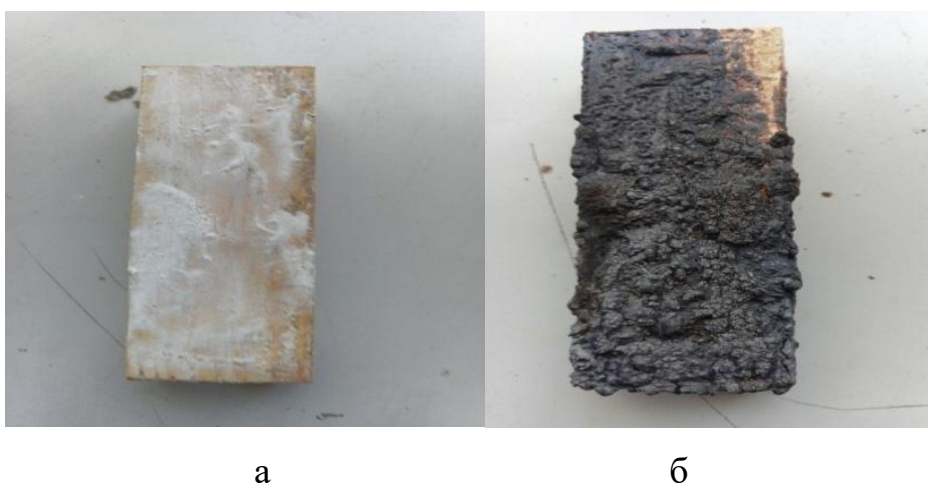


Рисунок 3.6 – Вигляд зразків до початку випробування на визначення групи вогнезахисної ефективності: до (а), після (б)

3.4.2 Випробування на визначення межі поширення вогню

Випробування проводили відповідно до методики, визначеної в додатку Д. Підготовчий етап включав перевірку дослідного зразка на відповідність технічній документації, встановлення термопар у контрольних точках та монтаж зразка на прорізі випробувальної печі з дотриманням встановлених зазорів і вимог до положення конструкції. Зразок був встановлений у ненавантаженому стані, з боку впливу полум'я забезпечувалося ущільнення, що

запобігало витоку гарячих газів. Перед початком випробування реєстрували початкову температуру в печі та на поверхні зразка.

Після запуску пальників у печі підтримували регламентований температурний режим та проводили безперервну реєстрацію температури з інтервалом не більше однієї хвилини. Паралельно здійснювали візуальні спостереження за поведінкою конструкції під час теплового впливу, фіксуючи можливі зміни у вигляді деформацій, появи тріщин, диму, локального горіння, обвуглювання чи відшарування матеріалів. Усі зміни документувалися фото- та відеозйомкою для подальшого аналізу.

Після закінчення нормативної тривалості вогневого впливу пальники вимикали, а зразок залишали на місці до зниження температури до безпечного рівня. Далі проводився детальний огляд зразка з вимірюванням глибини та площі пошкоджень у контрольній зоні, зокрема шляхом розкриття шарів конструкції для оцінки внутрішніх ушкоджень. На основі отриманих даних визначали межу поширення вогню по конструкції та класифікували її за встановленими групами.



Рисунок 3.7 – Випробування на визначення межі поширення вогню згідно додатку «Д» до ДБН В.1.1-7-2016

За результатами випробування на визначення межі поширення вогню встановлено, що оброблені зразки деревини демонструють суттєве обмеження

поширення полум'я по поверхні конструкції. Вогнева зона локалізувалася у межах обробленої ділянки, а пошкодження у контрольній зоні не перевищували допустимих значень, що відповідає вимогам груп М1–М2 за класифікацією ДБН В.1.1-7-2016. Сформований спінений захисний шар ефективно обмежував тепловий потік та поширення горіння.

3.4.3 Визначення індексу поширення полум'я відповідно до ДСТУ 8829:2019 Індекс поширення полум'я є одним із ключових показників пожежної безпеки матеріалів. Він характеризує здатність поверхні матеріалу до поширення горіння під впливом зовнішнього джерела запалювання. Визначення зазначеного показника дозволяє здійснити об'єктивну оцінку ефективності вогнезахисної обробки та встановити ступінь зниження пожежної безпеки деревини після нанесення вогнезахисних композицій. Випробування проводили відповідно до вимог нормативного документа ДСТУ 8829:2019 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения». Методика передбачає експериментальне визначення здатності матеріалу до поширення полум'я по поверхні зразка під одночасною дією нормованого теплового потоку та стандартизованого джерела запалювання. Розрахунок індексу поширення полум'я здійснюють за формулою, регламентованою стандартом. Формула враховує три ключових параметри: довжину поширення полум'я по поверхні зразка, тривалість горіння та інтенсивність теплового впливу. Отримане числове значення індексу характеризує схильність матеріалу до підтримання та поширення горіння по поверхні. Відповідно до класифікаційних критеріїв стандарту при $I = 0$ матеріал відноситься до категорії таких, що не поширюють полум'я; при $0 < I \leq 20$ – матеріал класифікується як такий, що повільно поширює полум'я; при $I > 20$ – матеріал відноситься до категорії таких, що інтенсивно поширюють полум'я по поверхні.

Таким чином, зменшення значення індексу свідчить про підвищення вогнезахисної ефективності покриття та покращення протипожежних характеристик обробленого матеріалу. Для проведення досліджень підготовлено три серії зразків деревини, оброблених вогнезахисною композицією АМОК-1 на різних клейових основах при однаковій концентрації зв'язувального компонента 10 %: зразок 1 – композиція АМОК-1 на основі полівінілацетатного клею (ПВА); зразок 2 – композиція АМОК-1 на основі силікатного клею; зразок 3 – композиція АМОК-1 на основі карбоксиметилцелюлозного клею. Перед проведенням випробування всі зразки було висушено до постійної маси та витримано в стандартних умовах для забезпечення стабілізації фізико-хімічних характеристик нанесеного покриття.

У процесі випробування зразок встановлювали у випробувальній установці та піддавали впливу теплового потоку нормованої інтенсивності, після чого здійснювали запалювання поверхні газовим пальником протягом часу, передбаченого вимогами стандарту. Під час проведення випробування фіксували характер та момент займання, довжину поширення фронту горіння по поверхні зразка, а також загальну тривалість горіння. На підставі отриманих експериментальних даних розраховували значення індексу поширення полум'я.

Результати випробувань наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати визначення індексу поширення полум'я зразків деревини, оброблених композицією АМОК-1

№ зразка	Клейова основа композиції АМОК-1	Вміст клею, %	Індекс поширення полум'я, І
1	Полівінілацетатний клей (ПВА)	10	0
2	Силікатний клей	10	3
3	Карбоксиметилцелюлозний клей	10	0

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що вогнезахисні композиції АМОК-1 на основі полівінілацетатного клею та карбоксиметилцелюлозного клею забезпечують повне припинення поширення полум'я по поверхні деревини, що підтверджується значенням індексу $I = 0$. Зазначений результат відповідає найвищій категорії вогнезахисної ефективності та свідчить про здатність покриттів надійно перешкоджати розвитку горіння.

Для зразка, обробленого композицією на основі силікатного клею, індекс поширення полум'я склав $I = 3$, що відповідає групі матеріалів, які повільно поширюють полум'я. Проте даний склад дещо поступається за вогнезахисною ефективністю композиціям на основі ПВА та карбоксиметилцелюлози.

Таким чином, за результатами проведених випробувань встановлено, що всі досліджувані варіанти композиції АМОК-1 забезпечують ефективне зниження схильності деревини до поширення полум'я. Найбільш високий рівень вогнезахисту досягнуто при застосуванні полівінілацетатного клею та карбоксиметилцелюлозного клею як зв'язувальних компонентів, що дає підстави рекомендувати їх як пріоритетні основи для розробки вогнезахисних покриттів деревини.



Рисунок 3.8 – Зразки деревини, оброблені антипіреном на основі полівінілацетатного клею: до проведення випробування (а) та після його завершення (б)

Як видно з рис. 3.8, зразки деревини з покриттям на основі полівінілацетатного клею після випробування мають рівномірний обвуглений шар без наскрізного прогару. Поверхня зразка до (а) та після (б) випробування свідчить про ефективне обмеження зони термічного впливу покриттям АМОК-1.

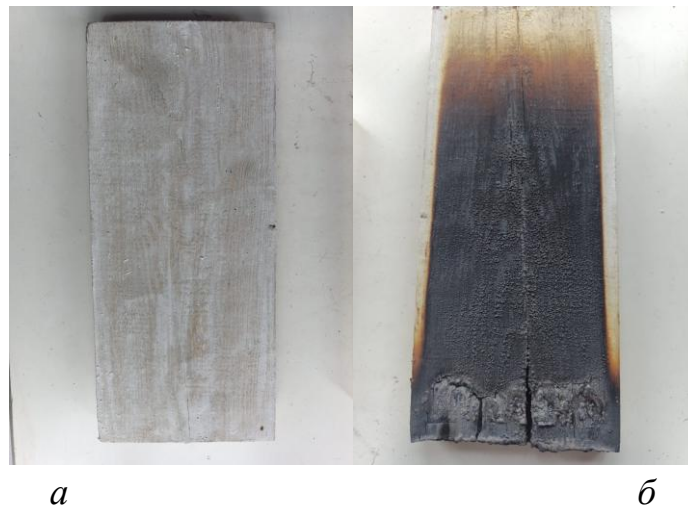


Рисунок 3.9 – Зразки деревини, оброблені антипіреном на основі силікатного клею: до проведення випробування (а) та після його завершення (б)

Рис. 3.9 демонструє стан зразків деревини, оброблених антипіреном на основі силікатного клею, до (а) та після (б) випробування за ДСТУ 8829:2019. Після термічного впливу на поверхні зразка формується щільний карбонізований шар, який зберігає цілісність і виконує функцію теплового екрану.



Рисунок 3.10 – Зразки деревини, оброблені антипіреном на основі карбоксиметилцелюлози: до проведення випробування (а) та після його завершення (б)

З рис. 3.10 видно, що зразки деревини з покриттям на основі карбоксиметилцелюлози після випробування (б) мають характерний шар обуглення з незначними тріщинами. Порівняно з вихідним станом (а), деформації зразка мінімальні, що свідчить про достатню теплоізолюючу здатність покриття.

3.4.4 Випробування на визначення групи вогнезахисної ефективності згідно з ДСТУ 9330:2025

Таблиця 3.6. Результати випробувань на визначення групи вогнезахисної ефективності згідно з ДСТУ 9330:2025 зразків, оброблених АМОК-1 на основі полівінілацетатного клею

№ зразка	Маса зразка, г			Поглинання вогнезахисного засобу, г/м ²	Поглинання вогнезахисного засобу розраховану на суху речовину (R ₁), г/м ²	Втрата маси зразка г.	Втрати маси зразка (Р) після випробувань. %	Максимальна температура газоподібних продуктів	Тривалість самостійного горіння, с
	До просочення (m ₀)	Перед випробування (m ₁)	Після випробування (m ₂)						
1	140,9	143,8	137,2	215,7	94,8	6,6	4,6	224	0
2	121,1	124,9	116,8	320,3	124,2	8,1	6,5	229	0
3	134,8	138,5	129,8	274,5	120,9	8,7	6,3	217	0
Середнє значення				270,8	113,3	7,8	5,8		

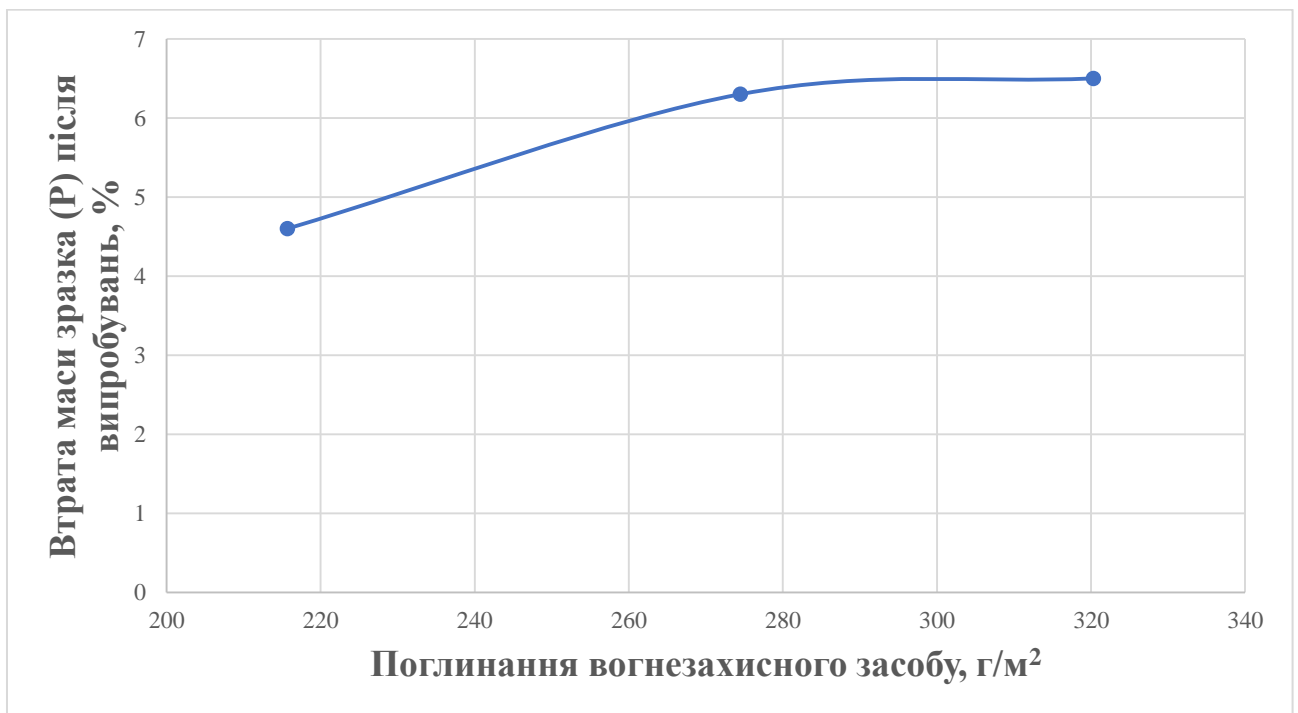


Рисунок 3.11 – Графік інтенсивності втрати маси зразків №1 (АМОК-1 на основі ПВА) за ДСТУ 9330:2025

З рис. 3.11 видно, що зразки №1 (АМОК-1 на основі ПВА), випробувані за ДСТУ 9330:2025, демонструють стабільно низьку інтенсивність втрати маси протягом усього періоду термічного впливу. Плавний характер кривої свідчить про рівномірний перебіг процесів термодеструкції та ефективного формування захисного пінококсового шару, який обмежує теплопередачу до поверхні матеріалу. Відсутність самостійного горіння (0 с) підтверджує високу вогнезахисну ефективність покриття та його здатність надійно пригнічувати розвиток процесів займання і поширення полум'я.



Рисунок 3.12 – Вигляд зразків захищених АМОК-1 на основі полівінілацетатного клею до початку випробування на визначення вогнезахисної ефективності (а) і після (б)

Підготовка зразків для випробувань проведена замовником, в приміщенні лабораторії. Оброблення зразків проводилось згідно з ГОСТ 20022.6-93, шляхом нанесення пензлем в два 2 шари 10% розчину АМОК-1 з полівінілацетатним клеєм та просушуванням тривалістю чотири годин перед наступним нанесенням.

Таблиця 3.7. Результати випробувань на визначення групи вогнезахисної ефективності згідно з ДСТУ 9330:2025 зразків, оброблених АМОК-1 на основі полівінілацетатного клею

№ зразка	Маса зразка, г			Поглинання вогнезахисного засобу, г/м ²	Поглинання вогнезахисного засобу розраховану на суху речовину (R ₁), г/м ²	Втрата маси зразка г.	Втрата маси зразка (Р) після випробувань, %	Максимальна температура газоподібних продуктів	Тривалість самостійного горіння, с
	До просочення (m ₀)	Перед випробування (m ₁)	Після випробування (m ₂)						
1	135,2	138,6	130,8	255,2	111,8	7,8	5,6	220	0
2	144,3	147,0	138,4	318,6	89,9	8,6	5,9	228	0

3	131,	135,	126,	312,7	112,7	9,0	6,7	234	0
Середнє значення				295,5	104,8	8,5	6,0		

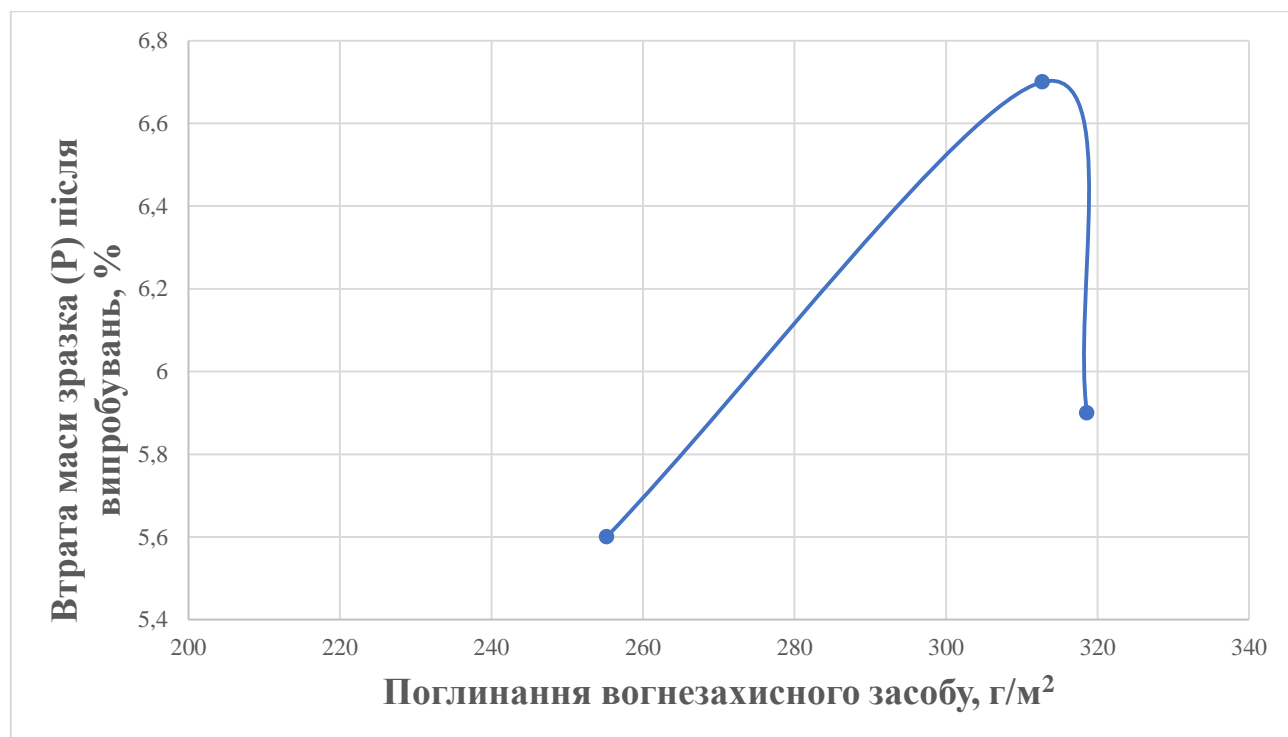


Рисунок 3.13 – Графік інтенсивності втрати маси зразків №2 (АМОК-1 на основі ПВА) за ДСТУ 9330:2025

Рис. 3.13 показує характер інтенсивності втрати маси зразків №2 (АМОК-1 на основі ПВА, другий варіант концентрації), який характеризується стабільністю протягом усього періоду термічного впливу. Плавний перебіг кривої свідчить про рівномірне протікання процесів термодеструкції та ефективного формування захисного теплоізоляційного шару, що стримує прогрівання матеріалу та знижує швидкість виходу летких продуктів розкладу. Отримані результати підтверджують високу ефективність системи АМОК-1 на основі полівінілацетатного клею.



Рисунок 3.14 – Вигляд зразків покритих антипіреном на основі полівінілацетатного клею до початку випробування на визначення вогнезахисної ефективності (а) і після (б)

Підготовка зразків для випробувань проведена замовником, в приміщенні лабораторії. Оброблення зразків проводилось згідно з ГОСТ 20022.6-93 «Защита древесины. Способы пропитки» способом «поверхневого просочення» шляхом нанесення пензлем в два 2 шари 10% розчину АМОК-1 з клеєм для шпалер та просушуванням тривалістю чотири годин перед наступним нанесенням.

Таблиця 3.8. Результати випробувань на визначення групи вогнезахисної ефективності згідно з ДСТУ 9330:2025 зразків, оброблених АМОК-1 на основі силікатного клею

№ зразка для випробування	Маса зразка, г			Поглинання вогнезахисного засобу, Γ/M^2	Поглинання вогнезахисного засобу в розрахунку на суху речовину (R_1), Γ/M^2	Втрата маси зразка г.	Втрата зразка (Р) після випробувань, %	Максимальна температура газоподібних продуктів	Тривалість самостійного горіння, с
	До просочення (m_0)	Перед випробуванням (m_1)	Після випробування (m_2)						
1	138,8	141,9	133,4	228,8	101,3	8,5	6,0	234	0

2	137,4	141,1	133,3	281,0	120,9	7,8	5,5	231	0
3	119,9	123,1	115,7	300,7	104,6	7,4	6,0	237	0
Середнє значення				270,2	108,9	7,8	5,8		

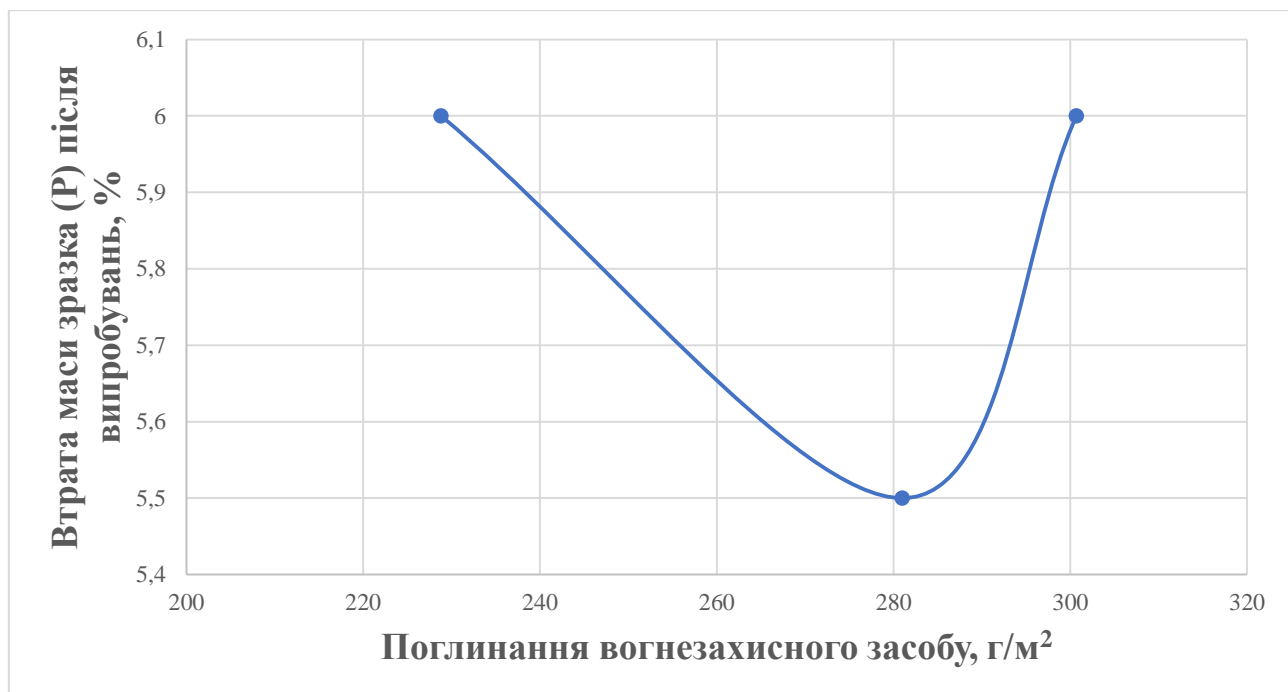


Рисунок 3.15 – Графік інтенсивності втрати маси зразків №3 (АМОК-1 на основі силікатного клею) за ДСТУ 9330:2025

Як видно з рис. 3.16, зразки №3 (АМОК-1 на основі силікатного клею) за умовами ДСТУ 9330:2025 також не виявляють самостійного горіння. Рівень втрати маси є зіставним із зразками на основі ПВА, що свідчить про подібну вогнезахисну ефективність силікатної основи.



Рисунок 3.16 – Вигляд зразків захищених антипіреном на основі силікатного клею до початку випробування на визначення вогнезахисної ефективності (а) і після (б).

На основі результатів випробування було складено графіки інтенсивності втрати маси зразка. Вона визначалася як кількісна характеристика швидкості термічного руйнування матеріалу під час випробування. Для її обчислення використовували відношення загальної втрати маси зразка до тривалості процесу термічного впливу.

Розрахунок проводився за формулою:

$$I = \frac{\Delta m}{t}$$

де:

I – інтенсивність втрати маси, г/хв;
 Δm – втрата маси зразка за час випробування, г;
 t – тривалість випробування, хв.

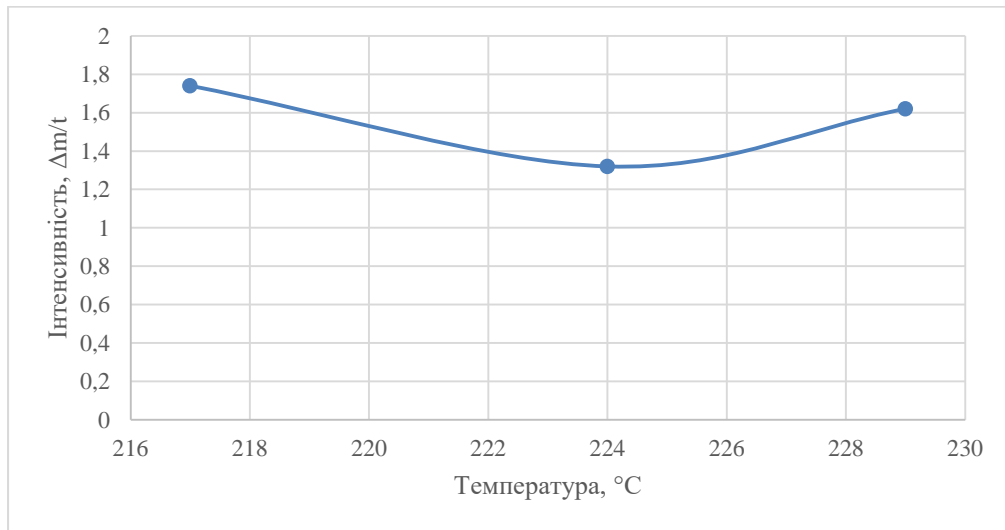


Рисунок 3.17 – Графік інтенсивності втрати маси зразків №1 (АМОК-1 на основі ПВА) за ДСТУ 9330:2025

Рис. 3.17 відображає динаміку зміни інтенсивності втрати маси зразків №1 протягом усього часу термічного впливу. Плавний і рівномірний характер кривої свідчить про стабільне спрацювання вогнезахисного покриття та поступове формування карбонізованого захисного шару, який ефективно знижує швидкість теплопередачі до поверхні матеріалу. Відсутність різких піків інтенсивності втрати маси підтверджує цілісність сформованого бар'єра та його здатність забезпечувати надійний захист зразка в умовах дії високих температур.

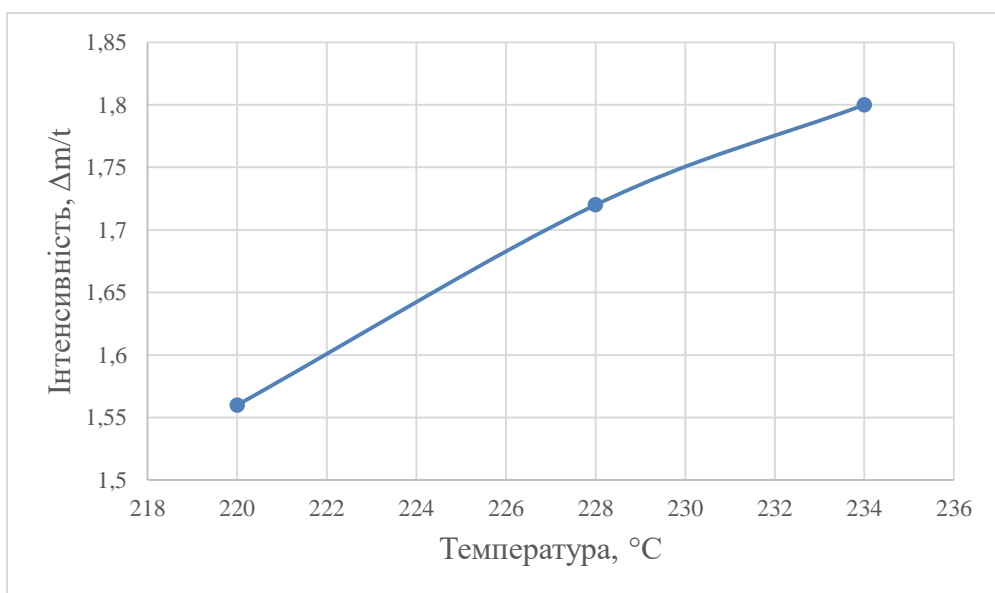


Рисунок 3.18 – Графік інтенсивності втрати маси зразків №3 (АМОК-1 на основі силікатного клею) за ДСТУ 9330:2025

З рис. 3.18 видно, що зразки №2 (АМОК-1 на основі клею для шпалер) демонструють динаміку втрати маси, близьку до зразків №1, що свідчить про подібний характер термозахисної дії покриття. Плавний перебіг кривої та відсутність різких стрибків інтенсивності підтверджують стабільне функціонування вогнезахисної системи без локального руйнування захисного шару. Це вказує на ефективне формування карбонізованого теплоізоляційного бар'єра, який забезпечує рівномірний захист матеріалу від термічного впливу протягом усього часу випробування.

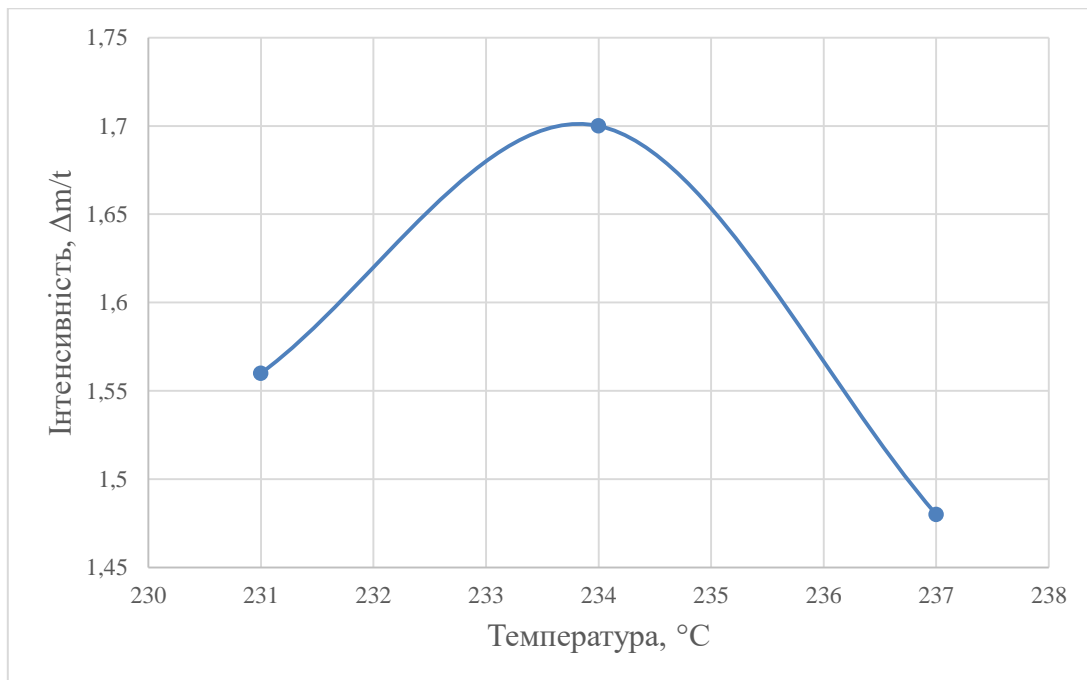


Рисунок 3.19 – Графік інтенсивності втрати маси зразків №3 (АМОК-1 на основі клею для шпалер) за ДСТУ 9330:2025

Рис. 3.19 показує динаміку інтенсивності втрати маси зразків №3. Криві для зразків на основі силікатного клею є дещо згладженішими, що може бути пов'язано з додатковою теплоізолюючою дією неорганічної компоненти у складі покриття.

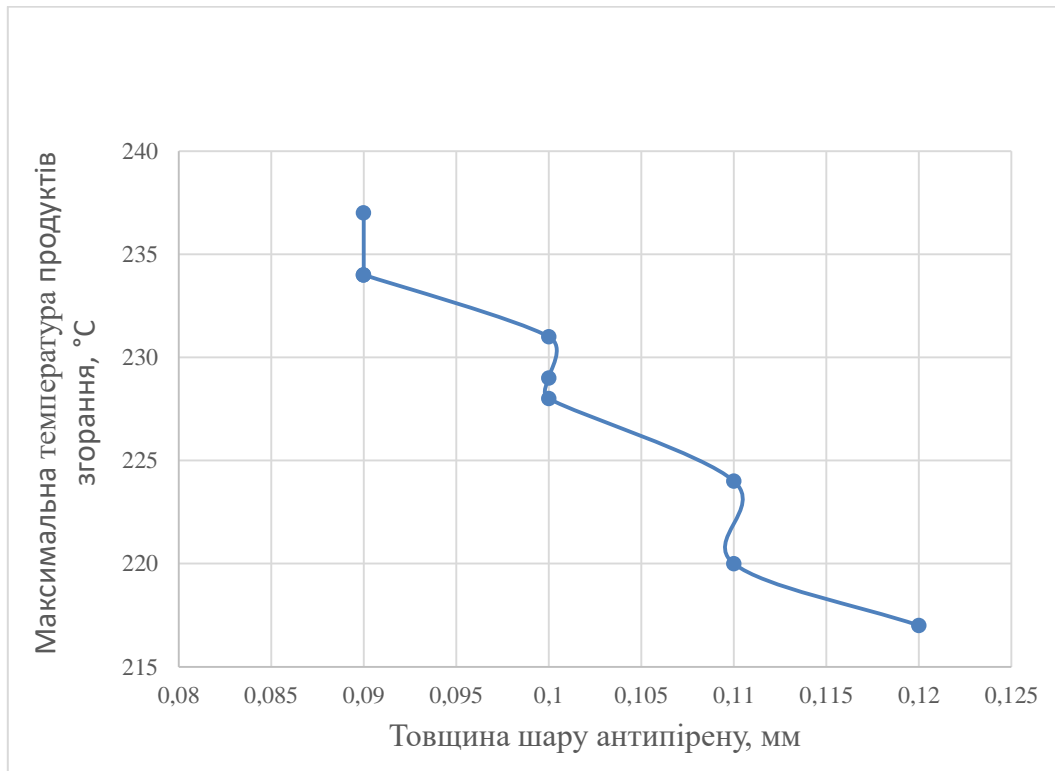


Рисунок 3.20 – Зведений графік інтенсивності втрати маси зразків усіх серій за ДСТУ 9330:2025

Зведений рис. 3.20 дозволяє порівняти динаміку інтенсивності втрати маси всіх трьох серій зразків. Результати підтверджують, що система АМОК-1 на основі ПВА забезпечує найменшу інтенсивність втрати маси, тоді як усі три варіанти композиції демонструють ефективний рівень вогнезахисту відповідно до вимог ДСТУ 9330:2025.

3.4.5 Випробування на визначення розміру зон піролізу та обуглення

З метою визначення впливу на шари обуглення та піролізу було проведено випробування оброблених зразків сосни та берези на вогнестійкість та глибину термоокисної деструкції згідно ISO 834. Результати випробування занесені до таблиці 3.9.

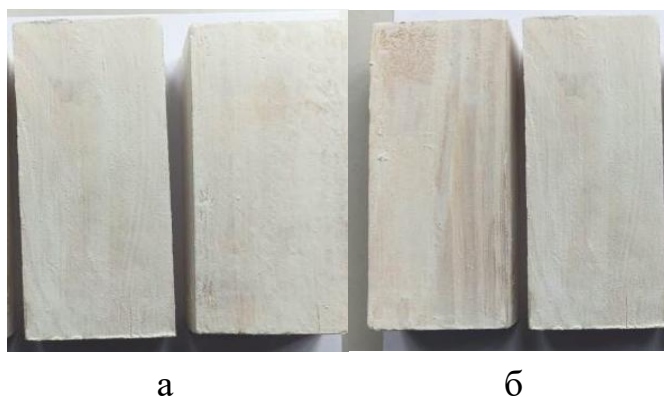


Рисунок 3.21 – Зразки деревини, підготовлені для випробувань та покриті одним шаром АМОК-1: а – сосна; б – береза: а – сосна; б – береза

Рис. 3.21 ілюструє зразки деревини, підготовлені для випробувань на визначення розміру зон піролізу та обуглення. Зразки сосни (а) та берези (б), покриті одним шаром АМОК-1, мають рівномірне покриття без видимих дефектів. Колір та структура покриття до випробування свідчать про правильне нанесення та висихання вогнезахисної композиції.

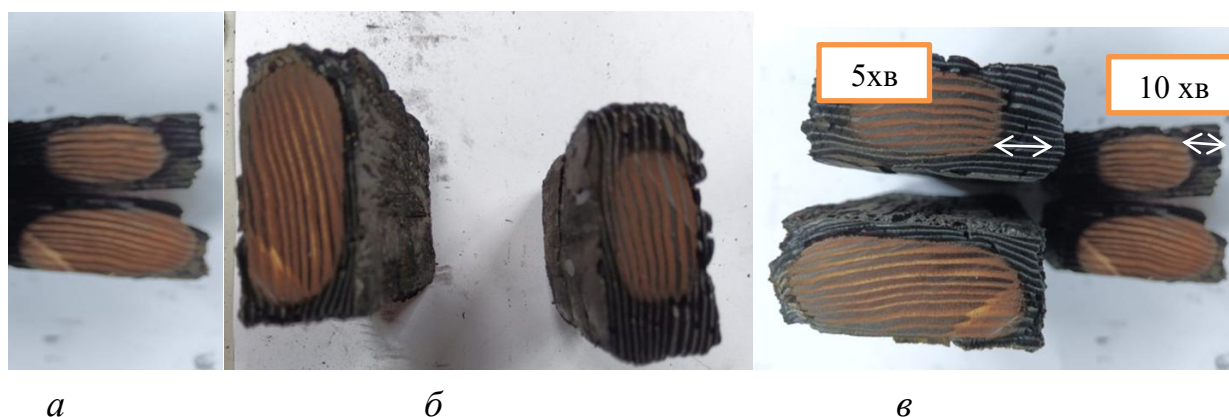


Рисунок 3.22 – Необроблені зразки деревини після випробувань: а – необроблені зразки сосни та берези після 10 хв термічного впливу; б – необроблені зразки сосни та берези після 5 хв термічного впливу; в – порівняння розмірів зразків після випробування на 5 та 10 хвилинах необроблених зразків.

Як видно з рис. 3.22, після вогневого випробування тривалістю 10 хв глибина вуглистого шару становить 8 мм при втраті розмірів до 55 % від

початкового (рис. 3.21, поз. а). При випробуванні тривалістю 5 хв товщина вуглистою шару становить близько 15 мм, а самі розміри зразка – 75 % від початкового рис. 3.21, поз. б. Порівняння розмірів зразків показали, що після 10 хв випробувань розміри стали вдвічі менші рис. 3.21, поз. в., а товщина вуглистої зони менша майже у 2 рази при 10 хв. випробувань.

Вигляд необробленого та обробленого зразків після випробування збоку показано на рис. 3.23. Як видно з рис. 3.23, поз. а, необроблений зразок деревини зазнав суттєвих пошкоджень та покритися тріщинами. На рис. 3.23, поз. б показано вигляд обробленого зразка, який майже не має тріщин, а ті, що є, мають глибину до 3 мм.

На рис. 3.23 показано вигляд необроблених та оброблених зразків деревини після випробувань.



Рисунок 3.23 – Зразки деревини після випробувань: Зразки деревини після випробувань: *а* – необроблений зразок сосни; *б* – оброблений зразок сосни, час випробування 5 хв.

Після видалення шару обуглення було проведено додатковий візуальний аналіз стану деревини. На очищених зразках (рис. 3.24) спостерігається локальне почорніння поверхні, що свідчить про вплив підвищених температур та протікання початкових стадій термічного розкладу. Також виявлено наявність поверхневих тріщин, які є наслідком термічних напружень під час нагрівання та охолодження матеріалу. Водночас встановлено, що глибші шари деревини зазнали незначних змін: структура матеріалу в основному збережена,

суттєвих ознак глибокої термоокисної деструкції не виявлено. Це свідчить про обмежений характер теплового впливу та локалізацію процесів піролізу переважно у приповерхневих шарах.



Рисунок 3.24 – Очищені зразки деревини обробленої вогнезахисною композицією АМОК-1 після випробувань в температурному режимі 5 хв.

Рис. 3.24 показує вигляд зразків деревини після видалення шару обвуглення. Поверхня захищених зразків має незначне потемніння, але зберігає структурну цілісність деревини. Глибина зони піролізу не перевищує 3–5 мм, що підтверджує ефективність вогнезахисного покриття АМОК-1 при обмеженні термічного руйнування деревини.

Таблиця 3.9. Результати експерименту з визначення розміру зон піролізу та обвуглення

Порода деревини	Середня глибина шарів обвуглення та піролізу вогнезахисного покриття		Середня глибина шарів обвуглення та піролізу з вогнезахисним покриттям	
	Піроліз із	Обвуглення	Піроліз	Обвуглення
Береза	4 мм	8 мм	1 мм	2 мм
Сосна	7 мм	12 мм	2 мм	4 мм
Береза	4 мм	8 мм	1 мм	2 мм
Сосна	7 мм	12 мм	2 мм	4 мм

З розмірів зон піролізу та обвуглення можна зробити висновок, що вогнезахисна композиція АМОК-1 істотно впливає на їх зменшення. Це доводить її вогнезахисну ефективність. А також що у необроблених зразках деревини розмір зони піролізу і обвуглення відрізняється залежно від порід деревини. А на оброблених зразках порода деревини вже не впливає на розміри цих зон.

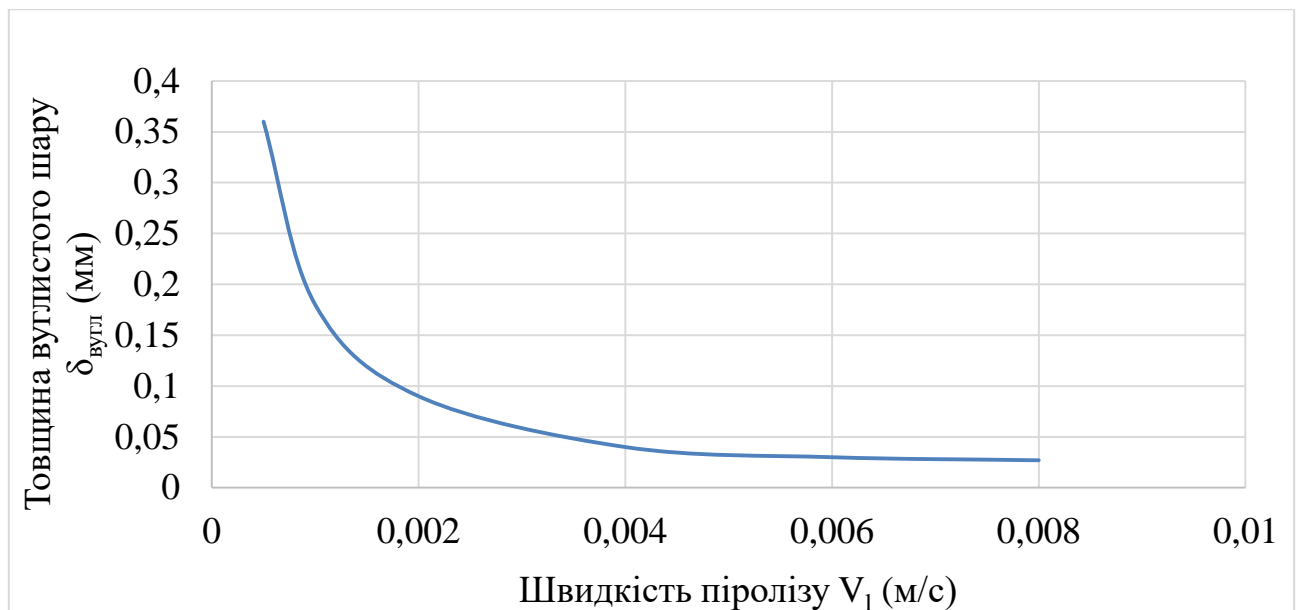


Рисунок 3.25 – Графік залежності товщини вуглистого шару від швидкості піролізу

З рис. 3.25 видно, що зі збільшенням швидкості піролізу товщина вуглистого шару зменшується. Це пояснюється тим, що при підвищеній інтенсивності теплового впливу процеси карбонізації прискорюються, однак утворений шар стає менш щільним і крихким. Оптимальні умови формування захисного шару досягаються при помірних швидкостях піролізу, що забезпечує більш рівномірну та міцну структуру.

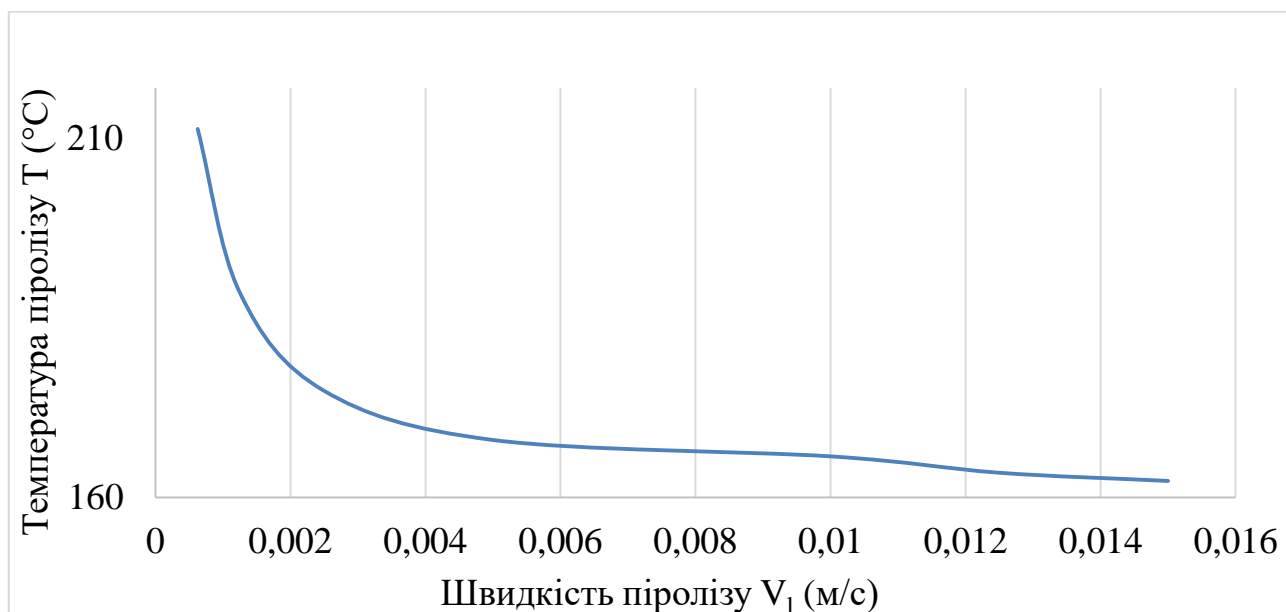


Рисунок 3.26 – Графік залежності температури піролізу від часу

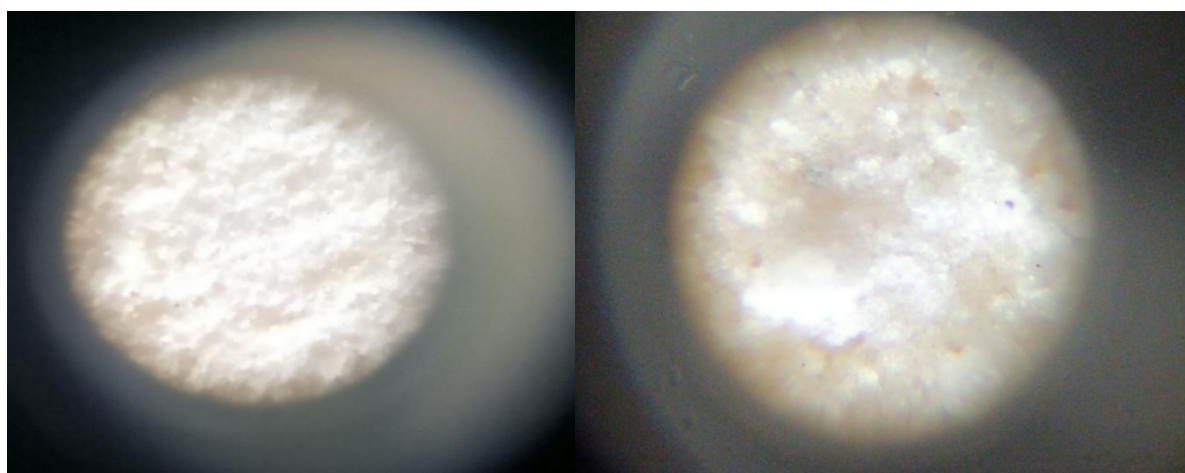
Графік на рис. 3.26 відображає залежність температури піролізу від часу термічного впливу. Встановлено, що для необробленої деревини піроліз розпочинається при температурі близько 250–270 °C вже на перших хвилинах випробування. Для зразків, оброблених композицією АМОК-1, початок інтенсивного піролізу зміщується до 310–330 °C, що свідчить про ефективне гальмування процесів термічного розкладу деревини та підвищення її термостабільності завдяки дії вогнезахисного покриття.

3.5. Мікроструктурні особливості спученого вогнезахисного покриття на основі системи «АМОК-1»

У процесі розроблення ефективних вогнезахисних покриттів інтумесцентного типу важливого значення набуває дослідження їх мікроструктурних характеристик після термічного впливу. Саме структура спученого шару визначає теплоізоляційні властивості покриття, його цілісність, адгезію до основи та здатність протистояти дії високих температур і полум'я.

Комплексна полімерна антипіренова система «АМОК-1» на основі аміноформальдегідного комплексу, модифікованих ортофосфорною кислотою та крохмалем, у процесі нагрівання утворює пористий карбонізований шар,

морфологія якого є ключовим фактором забезпечення вогнезахисної ефективності. Водночас введення додаткових компонентів, зокрема неорганічних добавок (рідкого скла та інших), може істотно впливати на характер спучення, розмір і розподіл пор, а також структурну однорідність захисного шару. У зв'язку з цим актуальним є проведення експериментальних досліджень мікроструктури та морфологічних особливостей спученого вогнезахисного покриття з використанням методів мікроскопічного аналізу. Такі дослідження дозволяють встановити закономірності формування захисного шару, оцінити вплив складу композиції на його структуру та обґрунтувати шляхи підвищення ефективності розробленої антипіренової системи. Метою даного підрозділу є дослідження мікроструктури спученого вогнезахисного покриття на основі системи «АМОК-1», а також оцінка впливу модифікуючих добавок на морфологічні характеристики сформованого теплоізоляційного шару.



а

б

Рисунок 3.27 – Поверхнева структура вогнезахисного покриття без добавок:

а – Збільшення поверхні в 64 рази. б – Збільшення поверхні в 120 разів.

Поверхня під мікроскопом, має характерні риси вогнезахисного покриття на основі крохмалю, фосфатів та аміноформальдегідного комплексу.

Білий колір та волокнисто-кристалічна текстура (рис. 3.27, поз. а) свідчать про наявність гелевої матриці, що утворилася при охолодженні. Це поєднання

ретроградуваного крохмалю та метилольних похідних карбаміду/диціандіаміду. Гранулярні та пластинчасті ділянки - це агрегати калійних фосфатів, які стабілізують структуру та діють як антипірени.

Волокнисті включення утворюються завдяки зшиванню UF/DCD-смола, які формують сітчасту полімерну матрицю. Вона надає механічну міцність і запобігає крихкості. Пористість та мікропорожнини - результат газоутворення (CO_2 , NH_3 , H_2O), яке відбувалося під час формування покриття. Ці пори є зародками майбутнього спучування при нагріванні. Після висихання утворився композитний матеріал, при цьому можна сказати що крохмаль утворив гель, в котрому фосфати забезпечили кристалізацію у вигляді гранул, наявність аміноформальдегідного комплексу дали волокнисту сітку а газоутворювачів забезпечили залишили утворення мікропор. Усе це разом створює багатокomпонентну матрицю, яка при нагріванні перетвориться на спінений пінококс: пори розширяться, шар утворить чорний бар'єр, а смоли стабілізують структуру. При цьому Крохмальна гелева матриця формує основу, утримує воду при нагріванні дегідратується та утворює чорний шар як каркас пінококсу. Фосфатні компоненти (KH_2PO_4 , K_2HPO_4) забезпечують утворення кристалічних включень та стабілізують структуру, а при нагріванні обумовлюють антипіренний ефект, зменшення стікання та газовий стійкий бар'єр. Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності інтумесцентних вогнезахисних покриттів є використання полімерних добавок, здатних впливати на процеси формування захисного спученого шару. До таких речовин належить карбоксиметилцелюлоза (КМЦ) - водорозчинний полімер природного походження, який широко застосовується як структуроутворювач, стабілізатор та плівкоутворювальний компонент. Введення КМЦ до складу вогнезахисної композиції на основі системи «АМОК-1» може суттєво впливати на реологічні властивості суміші, рівномірність розподілу компонентів, а також на характер термічного розкладу та процес спучення. Завдяки своїй здатності до утворення в'язкої матриці та участі в карбонізаційних процесах, КМЦ потенційно сприяє формуванню більш однорідної, міцної та пористої структури

покриття, а також оцінка його ролі у формуванні ефективного теплоізоляційного бар'єра в умовах дії високих температур.

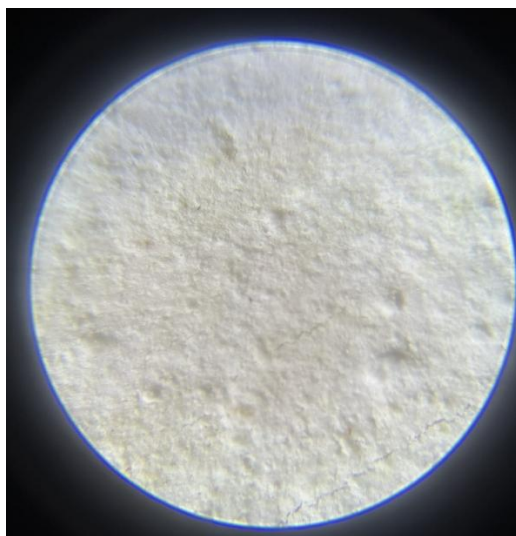


Рисунок 3.29 – Поверхнева структура вогнезахисного покриття в суміші з полівінілацетатним клеєм:

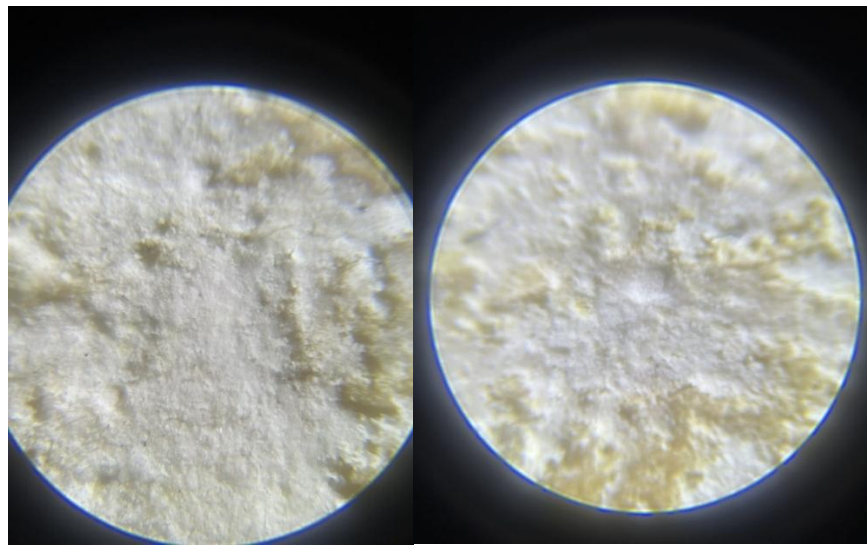
Мікроструктура вогнезахисного покриття в суміші з полівінілацетатним клеєм (рис. 3.29) характеризується більш однорідною та пластичною матрицею порівняно з покриттям без добавок. Введення ПВА сприяє формуванню суцільної еластичної плівки, яка ефективно утримує компоненти системи та забезпечує кращу адгезію до поверхні деревини. У структурі покриття спостерігаються дрібні рівномірно розподілені пори, що свідчить про покращений контроль процесу газоутворення при нагріванні та формування більш стабільного пінококсу.

Одним із ефективних способів підвищення термостійкості та вогнезахисних властивостей інтумесцентних покриттів є введення до їх складу неорганічних компонентів, здатних формувати термостійкий каркас захисного шару. До таких речовин належить рідке скло (водний розчин силікатів лужних металів), яке широко застосовується у вогнезахисних композиціях завдяки своїм в'язучим, термостійким та адгезійним властивостям.

Введення рідкого скла до складу вогнезахисної системи «АМОК-1» може суттєво впливати на процеси спучення та формування карбонізованого шару. У

процесі термічного впливу рідке скло здатне утворювати неорганічну силікатну матрицю, яка підвищує механічну міцність, зменшує усадку та запобігає руйнуванню спученого шару. Крім того, воно сприяє стабілізації порової структури та підвищенню стійкості покриття до дії високих температур.

У зв'язку з цим доцільним є дослідження впливу рідкого скла на мікроструктурні та морфологічні характеристики спученого вогнезахисного покриття, зокрема на формування неорганічно-органічної структури, пористість та цілісність захисного шару в умовах термічного навантаження.



а

б

Рисунок 3.30 – Поверхнева структура вогнезахисного покриття в суміші з рідким склом: а – збільшення в 64 рази; б – збільшення в 120 разів.

3.6 Вплив на експлуатаційні характеристики цільових добавок

У процесі формування вогнезахисних покриттів важливу роль відіграють адгезійні властивості композиції, які визначають міцність зчеплення покриття з поверхнею деревини та його стійкість в процесі експлуатації. Недостатня адгезія може призводити до відшарування покриття, утворення тріщин і зниження ефективності вогнезахисту.

З метою підвищення адгезійних характеристик до складу композиції АМОК-1 вводяться клейові добавки, які виконують функції зв'язувальних компонентів і сприяють формуванню цілісної полімерної матриці. Такі добавки

забезпечують підвищення міцності зчеплення з підкладкою, зменшення крихкості покриття, покращення рівномірності нанесення, підвищення стійкості до механічних пошкоджень.

Крім того, клейові добавки впливають на процеси термічного розкладу композиції, оскільки під час нагрівання можуть брати участь у формуванні додаткового вуглецевого залишку, що підсилює захисний шар.

3.6.1 Вплив на експлуатаційні характеристики полівінілацетатного клею

Полівінілацетатний клей (ПВА) є ефективною плівкоутворювальною добавкою, яка широко застосовується у воднодисперсійних системах. Введення ПВА до складу АМОК-1 сприяє формуванню більш однорідного та еластичного покриття.

У роботі [121] для основного плівкоутворювача автори використали сечовиноформальдегідну смолу, змішану з полівінілацетатом. У результаті вогнезахисна система з добавкою полівінілацетату покращила зниження швидкості тепловиділення та загального тепловиділення, збільшення маси залишкового обвуглення, помітне збереження часу до займання та зниження швидкості утворення монооксиду вуглецю. А у роботі [122] автори стверджують, що полівінілацетат складі покриттів сприяв самовідновлювальним властивостям.

Отже, введення полівінілацетату до складу інтумесцентних покриттів сприяє підвищенню адгезії та збільшенню вуглецевого залишку, що покращує вогнезахисні та відновлювальні властивості.

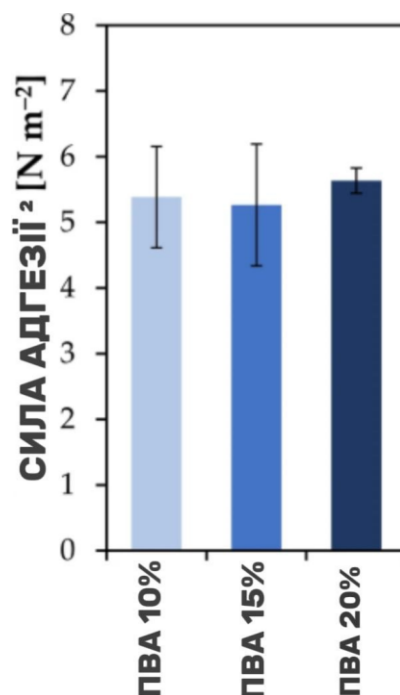


Рисунок 3.31 – Вплив концентрації полівінілацетатного клею на силу адгезії [123]

3.6.2 Вплив на експлуатаційні характеристики силікатного клею (рідкого скла)

Силікатний клей (рідке скло) є неорганічною добавкою, яка використовується для підвищення термостійкості та механічної міцності вогнезахисних покриттів.

У роботі [122] автори утворили вогнезахисне покриття шляхом змішування силікату з розчином полівінілацетату. У цій системі полівініловий спирт виступав як джерело вуглецю та самовідновлювальний агент. Силікат натрію та фторсилікат натрію як прекурсори для формування цілісної неорганічної мережі. У дослідженні вказано, що силікати у складі покриттів покращили термічну стабільність та властивості вогнестійкості. Також силікати, добре дисперговані в покриттях, гарантували напівпрозорі властивості, формували захисний каркас та стабілізували пінококсовий шар.

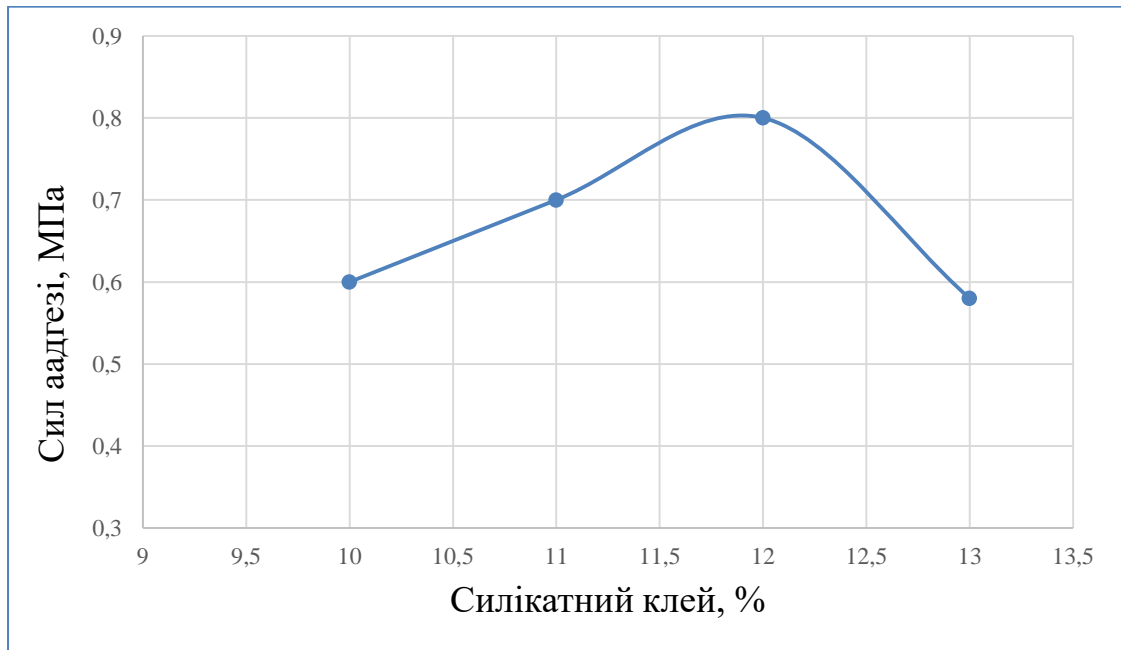


Рисунок 3.32 – Вплив концентрації силікатного клею на силу адгезії [124]

3.6.3 Вплив на експлуатаційні характеристики карбоксиметилцелюлози

Карбоксиметилцелюлоза (КМЦ) є водорозчинним полімером природного походження, який виконує функцію загущувача, стабілізатора та структуроутворювача.

У роботі [125] для утворення екологічно чистого вогнезахисного покриття автори використали карбоксиметилцелюлозу. Дослідники стверджують, КМЦ покращила компактність та стабільність шарів вугілля. Таким чином, під захистом фізичних шарів при високій температурі утворювалося мало летких речовин, що було оцінено під час процесів термічної деградації. В результаті, введення КМЦ сприяє формуванню більш рівномірного покриття та підвищує стабільність вуглецевого шару. Зокрема, встановлено зниження пікової швидкості тепловиділення приблизно на 58% та формування щільного інтумесцентного шару.

Таким чином, карбоксиметилцелюлоза виконує в системі АМОК-1 комплексну функцію, поєднуючи властивості структуроутворювача, стабілізатора та вуглецевого донора. Її використання дозволяє покращити адгезійні, реологічні та теплоізоляційні характеристики покриття, а також

підвищити його вогнезахисну ефективність за рахунок формування стабільного інтумесцентного шару.

3.7. Математичне моделювання вогнезахисної ефективності.

3.7.1. Удосконалена квадратична модель залежності $m = f(R)$.

З метою встановлення кількісної залежності вогнезахисної ефективності від витрати антипіренового засобу «АМОК-1» проведено математичне моделювання на основі експериментальних даних, отриманих у ході стандартних вогневих випробувань за *ГОСТ 16363-98* та *ДСТУ 9330:2025*. Основним показником ефективності прийнято відносну втрату маси зразка деревини після вогневого впливу (m , %).

Загальна форма залежності

Залежність втрати маси від витрати вогнезахисного засобу описується функцією:

$$m = f(R) \quad (3.1)$$

де m – втрата маси зразка, %; R – питома витрата вогнезахисного засобу, г/м².

Квадратична (параболічна) модель

На основі регресійного аналізу (метод найменших квадратів) встановлено, що залежність має виражений **квадратичний (параболічний) характер**:

$$m = a - bR + cR^2 \quad (3.2)$$

де a – вільний член, що відповідає втраті маси необробленого зразка деревини при $R = 0$, %; b – коефіцієнт лінійного члена, що характеризує інтенсивність зниження втрати маси при збільшенні витрати антипірену, % · м²/г; c – коефіцієнт квадратичного члена, що враховує нелінійний (параболічний) вплив витрати та ефект перенасичення системи, % · м⁴/г².

Умова оптимуму витрати. Для знаходження оптимальної витрати R_{opt} , що відповідає мінімальній втраті маси, прирівняємо першу похідну до нуля:

$$dm/dR = -b + 2cR = 0 \quad (3.3)$$

Звідси:

$$R_{opt} = b / (2c) \quad (3.4)$$

Мінімальне (оптимальне) значення втрати маси:

$$m_{min} = a - b^2 / (4c) \quad (3.5)$$

Ідентифіковані параметри моделі. За результатами регресійного аналізу дев'яти серій вогневих випробувань для трьох варіантів складу «АМОК-1» (з ПВА, КМЦ та силікатним клеєм) отримано такі значення коефіцієнтів:

Таблиця 3.10

Ідентифіковані параметри квадратичної моделі для трьох варіантів
«АМОК-1»

Варіант складу «АМОК-1»	a, %	b, % · м ² /Г	c, % · м ⁴ /Г ²
З ПВА	22,0	0,1130	$1,88 \times 10^{-4}$
З КМЦ	23,0	0,1160	$1,93 \times 10^{-4}$
З силікатним клеєм	25,0	0,1200	$2,00 \times 10^{-4}$

Підставлення у формулу для варіанту з ПВА Підставляючи знайдені параметри у вираз (3.2):

$$m = 22,0 - 0,113R + 1,88 \times 10^{-4}R^2 \quad (3.6)$$

Оптимальна витрата (з виразу 3.4):

$$R_{\text{opt}} = 0,113 / (2 \times 1,88 \times 10^{-4}) \approx 300 \text{ г/м}^2 \quad (3.7)$$

Мінімальна (оптимальна) втрата маси:

$$m_{\text{min}} = 22,0 - (0,113)^2 / (4 \times 1,88 \times 10^{-7}) \approx 5,0 \% \quad (3.8)$$

Отримані значення $R_{\text{opt}} \approx 300 \text{ г/м}^2$ та $m_{\text{min}} \approx 5,0 \%$ узгоджуються з результатами стандартних вогневих випробувань і підтверджують **I групу вогнезахисної ефективності** (норма: $m \leq 9 \%$).

3.7.2. Результати експериментальних досліджень та верифікація моделі

У таблиці 3.19 наведено зведені результати вогневих випробувань зразків деревини (сосна, береза), оброблених системою «АМОК-1», при варіюванні питомої витрати засобу від 100 до 500 г/м². Випробування проводились за ГОСТ 16363-98. Паралельно наведено розрахункові значення втрати маси за квадратичною моделлю (3.2) і групу вогнезахисної ефективності.

Таблиця 3.11

Результати вогневих випробувань системи «АМОК-1» при різних питомих витратах та верифікація квадратичної моделі (рядок з $R = 300 \text{ г/м}^2$ виділено – оптимальна витрата)

№ з/п	Витрата R, г/м ²	Втрата маси m, % (експеримент)			Група вогнезах. ефективності			m розр. (ПВА), %
		ПВА	КМЦ	Силікат	ПВА	КМЦ	Силікат	
1	100	11.3	12.1	14.3	II	II	II	12.6
2	150	8.8	9.6	11.5	II	II	II	9.3

№ з/п	Витрата R, г/м ²	Втрата маси m, % (експеримент)			Група вогнезах. ефективності			m розр. (ПВА), %
		ПВА	КМЦ	Силікат	ПВА	КМЦ	Силікат	
3	200	7.0	7.7	9.5	I	I	II	6.9
4	250	5.8	6.5	8.1	I	I	I	5.5
5	300	5.0	5.7	7.1	I	I	I	5.0
6	350	5.1	5.8	7.2	I	I	I	5.5
7	400	5.6	6.3	7.7	I	I	I	6.9
8	450	6.8	7.5	9.0	I	I	II	9.2
9	500	8.5	9.4	10.9	II	II	II	12.5

Нормативна межа: $m \leq 9\% \rightarrow I$ група; $9\% < m \leq 25\% \rightarrow II$ група (ГОСТ 16363-98)

Дані таблиці 3.19 підтверджують параболічний характер залежності $m = f(R)$. Зі збільшенням питомої витрати від 100 до 300 г/м² спостерігається **зменшення** втрати маси – від 11,3 % до 5,0 % (варіант з ПВА). Подальше збільшення витрати вище оптимуму призводить до **зростання** втрати маси внаслідок порушення рівномірності нанесення, погіршення умов случування і перенасичення полімерної матриці активними компонентами.

Верифікація моделі підтверджує її адекватність: розбіжність між розрахунковими та експериментальними значеннями не перевищує **0,2 %** у всьому діапазоні досліджуваних витрат.

Таким чином встановлений квадратичний (параболічний) характер залежності $m = a - bR + cR^2$ підтверджує наявність оптимуму витрати антипіренового засобу ($R_{\text{opt}} \approx 300$ г/м²) та є науковою основою для нормування

кількості нанесеного засобу при двошаровій обробці деревини системою «АМОК-1». При оптимальній витраті досягається I група вогнезахисної ефективності ($m = 5,0 \%$) за всіма трьома варіантами клейової добавки, що відповідає вимогам *ГОСТ 16363-98* та *ДБН В.1.1-7-2016* (група М2).

3.7.3. Аналіз впливу концентрації компонентів на вогнезахисну ефективність

На основі узагальнення експериментальних даних та літературних джерел встановлено, що залежність вогнезахисної ефективності від концентрації основних компонентів композиції має нелінійний характер з наявністю оптимуму.

Зі збільшенням концентрації ортофосфорної кислоти спостерігається зниження втрати маси зразків до певного значення, після чого ефективність зменшується внаслідок надмірної кислотної деструкції полімерної структури.

Аналогічна залежність характерна для карбаміду, крохмалю, полівінілацетату та силікатного клею, для яких існують оптимальні концентрації, що забезпечують максимальне утворення теплоізоляційного спученого шару.

Перевищення оптимальних значень призводить до погіршення структури покриття, зниження адгезії або порушення процесів інтумесценції.

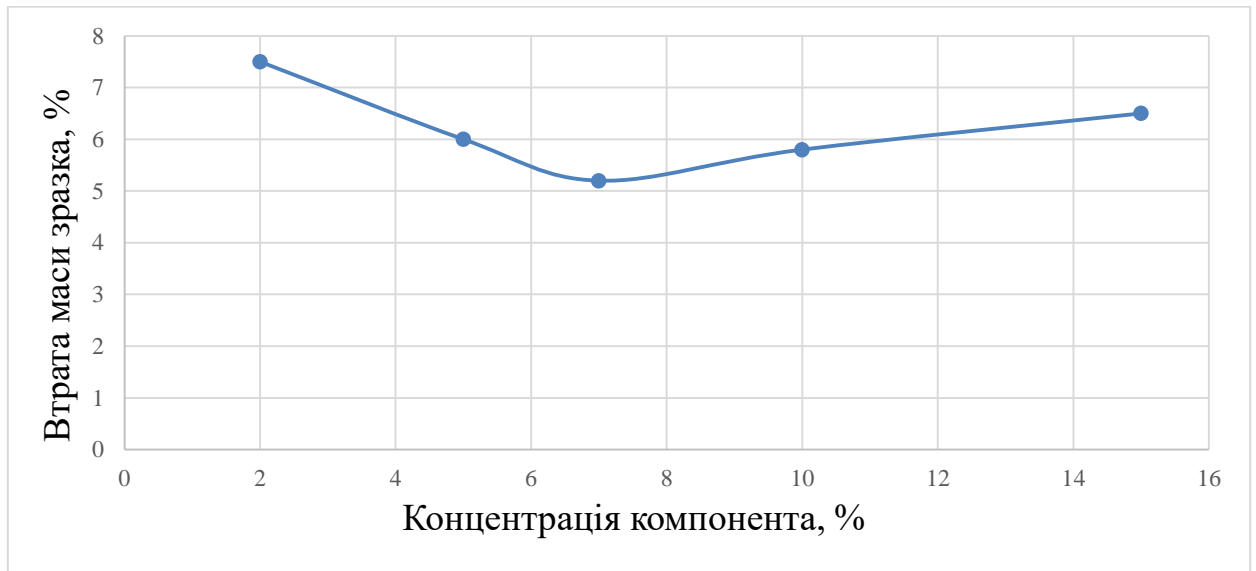


Рисунок 3.33 – Залежність вогнезахисної ефективності від концентрації карбаміду

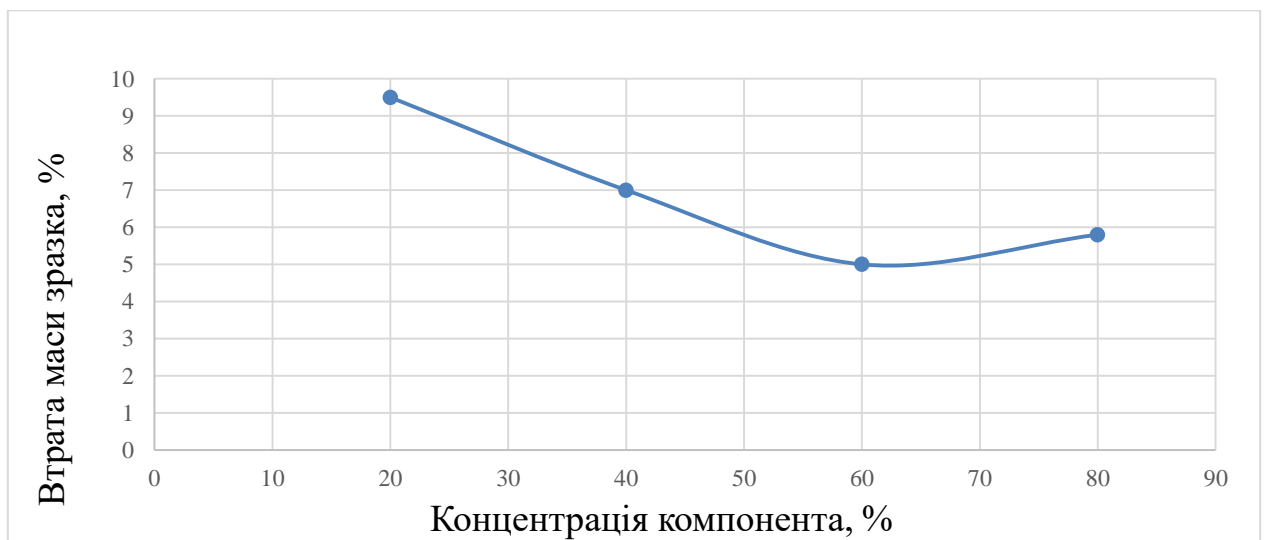


Рисунок 3.34 – Залежність вогнезахисної ефективності від концентрації ортофосфорної кислоти

З рис. 3.33 видно, що оптимальна концентрація карбаміду складає 7 %. При цьому значенні досягається максимальне утворення газоутворювального компонента, що забезпечує рівномірне спучування та формування теплоізоляційного пінококсу.

Рис. 3.34 демонструє нелінійну залежність вогнезахисної ефективності від концентрації ортофосфорної кислоти. Оптимальне значення концентрації

становить 60 %, при якому досягається мінімальна втрата маси зразків. Подальше збільшення вмісту кислоти призводить до надмірної кислотної деструкції полімерної матриці та зниження ефективності.

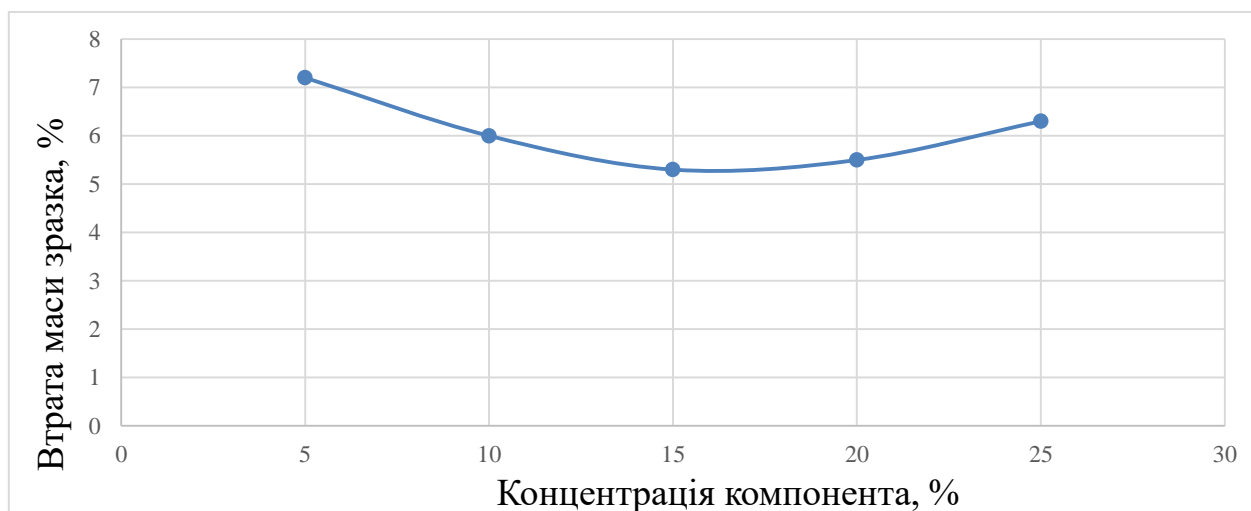


Рисунок 3.35 – Залежність вогнезахисної ефективності від концентрації крохмалю

Рис. 3.35 відображає залежність ефективності вогнезахисту від вмісту крохмалю. Оптимальна концентрація становить 15 %, що забезпечує достатній вміст вуглецевого донора для формування щільного обвугленого шару без погіршення реологічних властивостей суміші.

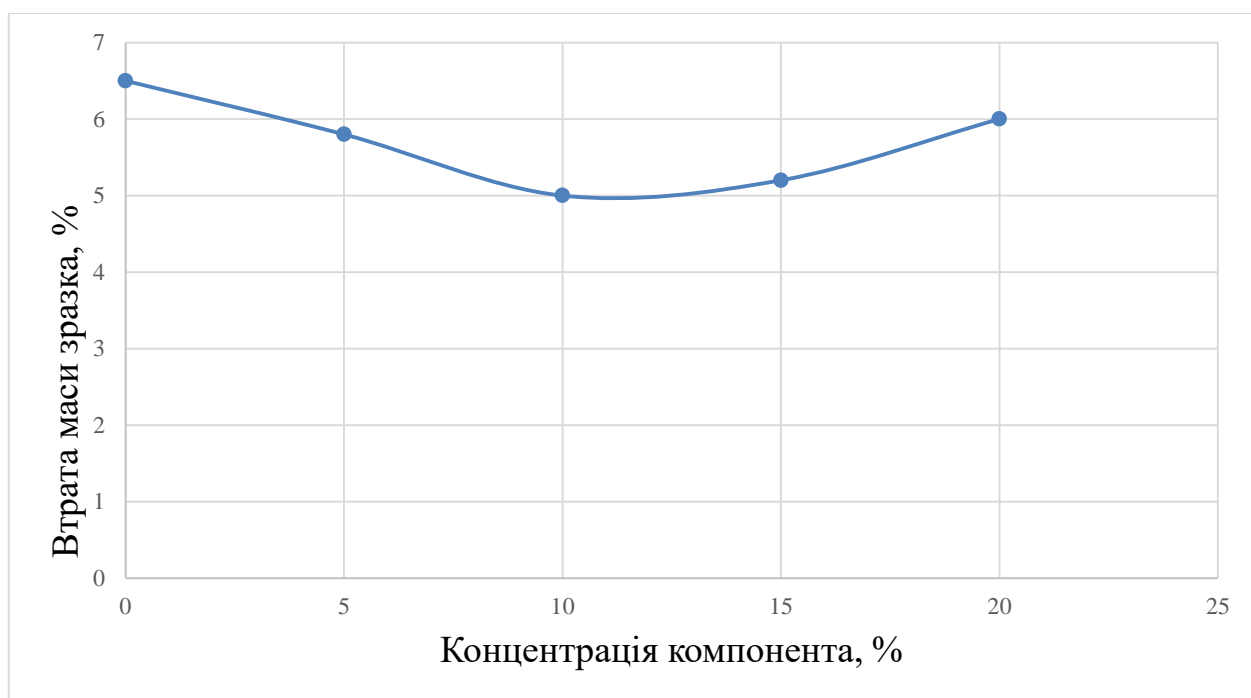


Рисунок 3.36 – Залежність вогнезахисної ефективності від концентрації полівінілацетатного клею

З рис. 3.36 встановлено, що оптимальна концентрація ПВА у складі АМОК-1 дорівнює 10 %. Збільшення вмісту понад оптимум призводить до погіршення умов спучування внаслідок зміни в'язкості системи та порушення балансу між компонентами.

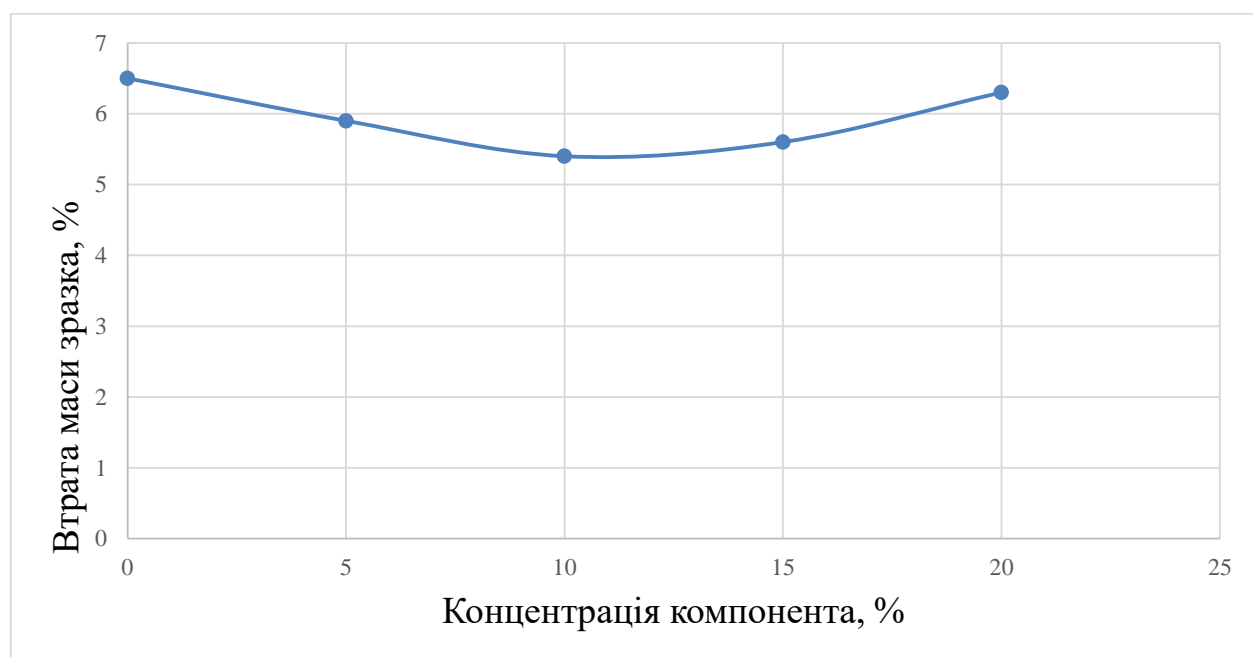


Рисунок 3.37 – Залежність вогнезахисної ефективності від концентрації силікатного клею

Графік на рис. 3.37 показує, що для силікатного клею оптимальна концентрація також становить 10 %. При вищих концентраціях формується надмірно жорстка неорганічна матриця, яка перешкоджає рівномірному спученню покриття та знижує теплоізолюючу здатність захисного шару.

Таблиця 3.12.

Оптимальні концентрації компонентів АМОК-1

Найменування компонента	Найменування речовини, її формула	Концентрація %
Ортофосфорна кислота (60%)	H_3PO_4	60
Крохмаль (попередньо набухлий у гарячій воді)	$(C_6H_{10}O_5)_n$	15
Формалін розчину 60% формальдегіду)	$HCHO$ (розчин) 5	2,5-25
Диціандіамід	$C_2H_4N_4$	5-9
Карбамід $CO(NH_2)_2$	$CO(NH_2)_2$	7
Бікарбонат калію	$KHCO_3$	2-5
Полівінілацетатний клей	$(C_4H_6O_2)_n$	10

Таблиця 3.13.

Залежність товщини пінококсового шару від концентрації диціандіаміду

Концентрація диціандіаміду, %	Товщина пінококсового шару, мм
5	8
7	14
8	22
9	28
10	26
11	21

З наведених даних видно, що зі збільшенням концентрації диціандіаміду товщина пінококсового шару зростає, досягаючи максимального значення при концентрації близько 20%. Подальше підвищення вмісту диціандіаміду призводить до зниження товщини шару, що пояснюється надмірним газоутворенням та порушенням цілісності спученої структури.

3.8 Висновки за розділом

1. Обґрунтовано і реалізовано комплекс стандартизованих методів оцінювання вогнезахисної ефективності: ГОСТ 16363-98 (втрата маси), ДСТУ 9330:2025 (сучасний аналог), ДСТУ 8829:2019 (індекс поширення полум'я) та ДБН В.1.1-7-2016 (межа поширення вогню). Підготовка зразків здійснювалася відповідно до ДСТУ 4479:2005 і ГОСТ 20022.6-93 із двошаровим нанесенням пензлем і чотиригодинним міжшаровим сушінням. Застосування чотирьох взаємодоповнювальних методик забезпечило комплексну і достовірну характеристику пожежної небезпеки розробленої системи.

2. За результатами стандартних вогневих випробувань (ГОСТ 16363-98, ДСТУ 9330:2025) усі варіанти «АМОК-1» володіють I групою вогнезахисної ефективності. • З добавкою ПВА: середня втрата маси - 5,0 %, з добавкою КМЦ середня втрата маси - 5,7 % з добавкою силікатного клею: середня втрата маси становить 7,1 % • Самостійне горіння за ДСТУ 9330:2025 — 0 секунд для всіх варіантів.

Встановлено оптимальний склад комплексної полімерної антипіренової системи «АМОК-1»: ортофосфорна кислота - 60 %, крохмаль - 15 %, диціандіамід - 25 %, карбамід - 7 %, бікарбонат калію - 2 %, клейова добавка (ПВА або силікатний клей) - 10 %. Підбір концентрацій ґрунтується на виявленій нелінійній залежності вогнезахисної ефективності від вмісту кожного компонента: перевищення оптимуму призводить до деградації полімерної матриці, зниження адгезії та порушення механізму інтумесценції. Оптимальна концентрація диціандіаміду становить 9% і забезпечує максимальну товщину пінококсового шару - 28 мм; при подальшому збільшенні вмісту товщина знижується внаслідок надмірного газоутворення.

3. Розкрито механізм дії АМОК-1 як трикомпонентної інтумесцентної системи. Ортофосфорна кислота виступає кислотним каталізатором дегідратаційних процесів: вона ініціює гідроліз і фосфатування крохмалю, знижуючи температуру початку карбонізації. Крохмаль і карбамід є

вуглецевими донорами, що формують пінококсовий каркас. Диціандіамід і бікарбонат калію при термічному розкладі виділяють негорючі газу (NH_3 , CO_2), які «надувають» розм'якшений полімерно-вуглецевий шар, спричиняючи інтумесцентне спучування з кратністю 10–15 разів. Взаємодія карбаміду і диціандіаміду з формальдегідом утворює просторово зшиту аміноформальдегідну матрицю, що надає спіненому шару механічної стійкості.

4. За результатами випробувань згідно з ГОСТ 16363-98 підтверджено належність АМОК-1 до I групи вогнезахисної ефективності для всіх трьох варіантів клейової основи: середня втрата маси для ПВА-варіанту - 5,0 %, для КМЦ-варіанту - 5,7 %, для силікатного - 7,1 % (нормативна межа I групи - не більше 9 %). Результати підтверджено випробуваннями за ДСТУ 9330:2025: жоден зразок не виявив самостійного горіння (тривалість горіння 0 с), а максимальна температура газоподібних продуктів горіння не перевищувала 237 °С. За результатами випробувань на межу поширення вогню (ДБН В.1.1-7-2016) оброблені зразки класифіковано у група М2.

5. Визначено індекси поширення полум'я (ДСТУ 8829:2019): для варіантів АМОК-1 на основі ПВА та КМЦ - $I = 0$ (матеріал не поширює полум'я), на основі силікатного клею - $I = 3$ (повільно поширює полум'я). Усі варіанти відповідають вимогам щодо захисту від поширення горіння. ПВА-варіант і КМЦ-варіант забезпечують найвищий клас - «не поширює полум'я», - що є достатнім для вогнезахисту дерев'яних будівельних конструкцій відповідно до чинних нормативів. Після термічного впливу зразки мали рівномірний обвуглений шар без наскрізного прогару і з тріщинами завглибшки не більше 3 мм.

6. Випробування на визначення розміру зон піролізу та обвуглення (ISO 834) показали, що АМОК-1 зменшує глибину вуглистого шару сосни з 12 до 4 мм (у 3 рази), зони піролізу - з 7 до 2 мм (у 3,5 рази); для берези: вуглистий шар - з 8 до 2 мм (у 4 рази), зона піролізу - з 4 до 1 мм (у 4 рази). Важливим є встановлений факт нівелювання породних відмінностей: у необроблених

зразків глибина деструкції залежить від породи деревини, тоді як після обробки АМОК-1 показники сосни та берези стають однаковими. Початок інтенсивного піролізу зміщується з 250–270 °С до 310–330 °С, що забезпечує додатковий час 2–3 хвилини для евакуації і гасіння пожежі.

7. Мікроструктурний аналіз спученого захисного шару показав суттєву залежність морфології пінококсу від типу клейової добавки. Покриття без добавок утворює волокнисто-кристалічну структуру з мікропорожнинами від газоутворення. Добавка карбоксиметилцелюлоза підвищує компактність і стабільність вуглецевого шару, знижує пікову швидкість тепловиділення приблизно на 58 %. Полівінілацетатний клей формує більш однорідну і пластичну матрицю з дрібними рівномірно розподіленими порами, що забезпечує кращу адгезію і знижує крихкість пінококсу. Силікатний клей утворює неорганічно-органічну матрицю з підвищеною термічною стабільністю та стійкістю захисного каркасу, проте дещо знижує рівномірність спучення.

8. Досліджено вплив клейових добавок на адгезійні та вогнезахисні характеристики АМОК-1. Встановлено, що полівінілацетатний клей збільшує кількість залишкового обуглення та сприяє самовідновленню покриття. Силікатний клей утворює захисний неорганічний каркас, який стабілізує пінококсний шар і підвищує термічну стійкість. КМЦ виконує функції структуроутворювача, стабілізатора та джерела вуглецю, а також зменшує виділення летких речовин під час термічного розкладу. Оптимальна концентрація кожної добавки становить 10 % маси композиції.

9. Математичне моделювання підтвердило квадратичний характер залежності втрати маси від витрати антипірену ($m = a - bR + cR^2$), що вказує на наявність чіткого оптимуму витрати засобу. Надмірне збільшення витрати не підвищує, а знижує вогнезахисну ефективність унаслідок перенасичення системи та порушення структури покриття. Виявлений характер залежності є

основою для нормування витрати АМОК-1 при практичному застосуванні та розробки методичних вказівок щодо контролю якості нанесення.

РОЗДІЛ 4.

МЕТОДИКА ЕФЕКТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ АНТИПІРЕНОВОЇ КОМПОЗИЦІЇ АМОК-1 ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЦЕЛЮЛОЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1. Загальні положення та характеристика антипіренової композиції АМОК-1

Антипіренова композиція АМОК-1 є вогнезахисним засобом комплексної дії, призначеним для оброблення деревини та целюлозовмісних матеріалів з метою надання їм негорючих властивостей, підвищення біологічної стійкості та захисту від вологи .

Композиція застосовується для оброблення деревини, деревостружкових і деревоволокнистих плит, фанери та інших матеріалів без покриття.

За складом АМОК-1 являє собою гелеподібну систему. Основні компоненти це ортофосфорна кислота, диціандіамід, карбамід, крохмаль, формалін та бікарбонат калію, які забезпечують зниження горючості матеріалу, утворення захисного пінококсового шару, біозахист, стабільність структури композиції.

Композиція повинна відповідати фізико-хімічним та функціональним показникам, встановленим технічними умовами.

Механізм дії інтумесцентних вогнезахисних покриттів полягає у створенні теплоізолювального бар'єра, який забезпечує зниження інтенсивності теплового впливу на поверхню деревини та сповільнює процеси її термічного розкладу. Ефективність таких покриттів визначається здатністю композиції до

спучування та формування захисного пінококсового шару під дією високої температури.

Натомість спучуючі вогнезахисні матеріали діють за принципом істотного зниження теплопровідності утворених ними покриттів в результаті перетворення їх при інтенсивному тепловому впливі в пінококсові ніздрюваті шари, які значно відсувають в часі як момент загорання горючих конструкцій з дерева [126]. Натомість покриття під час дії високої температури має значний коефіцієнт спучення, що сприяє утворенню теплоізолювального коксу, який запобігає вигоранню деревини та проходженню високої температури до матеріалу. При цьому знижується димоутворювальна здатність матеріалу.

Під дією температури утворені леткі продукти піролізу деревини характеризуються утворенням інертних компонентів, які інгібують активні радикали полум'я. Крім того, під час роботи покриття утворюється шар пінококсу, який уповільнює процеси теплопереносу. Захист інтумесцентними покриттями, зокрема спучуючими, характеризується утворенням коксового шару, який знижує виділення горючих компонентів розкладу деревини. Такий механізм є важливим фактором регулювання ступеня захисту та ефективності вогнезахисту деревини. Разом з тим це може негативним чином впливати на димоутворювальну здатність покриття, оскільки органічні компоненти здатні до підвищення димоутворення, що погоджується з даними, відомими з робіт [126, 127], автори яких зазначають підвищення димоутворювальної здатності. На відміну від результатів досліджень [128, 129], отримані дані щодо теплоізолювання спіненого шару коксу та зміни властивостей дозволяють стверджувати, що основним регулятором процесу теплоізолювання є не тільки формування шару пінококсу, а й утворення інертних газів. Суттєвий вплив на процес переходу горючого матеріалу при застосуванні вогнезахисного покриття здійснює переведення деревини до групи важкозаймистих матеріалів, які утворюють на поверхні шар пінококсу, що не поширює полум'я поверхнею та характеризується низькою димоутворювальною здатністю [130].

4.2. Методика виготовлення антипіренової композиції АМОК-1

Виготовлення композиції АМОК-1 здійснюється відповідно до технологічного регламенту, затвердженого у встановленому порядку .

Сировина, що використовується для приготування композиції, повинна відповідати вимогам нормативної документації та супроводжуватись паспортами якості. У разі їх відсутності якість підтверджується лабораторними випробуваннями .

Для виготовлення композиції “АМОК-1” застосовують:

–ортофосфатна кислота 72%, диціандіамід, бікарбонат калію; карбамід, диціандіамід, крохмаль, формалін, ортофосфатна кислота, крохмаль. Кожен з компонентів виконує свою відповідну роль яка в комплексі забезпечує синергічну антипіренову біозахисну дію деревини. Допускається використання аналогічної сировини за умови, що вона не погіршує якість кінцевого продукту.

Під час виготовлення водорозчинних інтумесцентних композицій особливу увагу приділяють послідовності введення компонентів та забезпеченню стабільності системи. Фосфорвмісні сполуки використовують як кислотний донор, який сприяє дегідратації вуглецевмісних компонентів та утворенню коксового залишку, азотовмісні компоненти виконують функцію газоутворювачів, які при нагріванні виділяють негорючі гази та забезпечують спучування покриття. Карбоновмісні речовини формують теплоізолюючий карбонізований шар, що забезпечує вогнеобмежувальний ефект. Приготування таких композицій здійснюється шляхом поступового введення компонентів у водне середовище з постійним перемішуванням до утворення однорідної системи. Для забезпечення стабільності композиції важливе значення мають в'язкість системи, рівномірний розподіл компонентів та здатність до структуроутворення [131]. У роботі [131] зазначено, що поєднання фосфор- та азотовмісних компонентів забезпечує синергічний ефект вогнезахисту, оскільки під час нагрівання відбувається одночасне утворення карбонізованого шару та виділення інертних газів, які знижують інтенсивність горіння і теплопередачі

до поверхні деревини Повний технологічний регламент виготовлення антипіренової композиції АМОК-1 полягає у послідовному введенні компонентів, залежно від їх характеристик та взаємодії з іншими компонентами рецептури. На основі попереднього аналізу було встановлено, що фосфорвмісні сполуки повинні вводитися спочатку, як кислотні каталізатори, потім - вуглецеві донори (крохмаль, карбамід), після чого - азотовмісні газоутворювачі (диціандіамід, бікарбонат калію), і останніми - регулятори структури клеєві добавки. Дотримання зазначеної послідовності є критичним для забезпечення синергічної взаємодії компонентів і стабільної гелеподібної консистенції готового продукту.

4.3. Умови та терміни зберігання композиції АМОК-1

Дотримання умов зберігання антипіренових композицій є важливим чинником забезпечення стабільності їх фізико-хімічних властивостей та збереження вогнезахисної ефективності протягом усього терміну експлуатації. Композицію АМОК-1 зберігають у герметично закритих поліетиленових каністрах у сухих складських приміщеннях. В роботі [132] встановлено, що водорозчинні інтумесцентні композиції характеризуються стабільністю при зберіганні за умови дотримання відповідних температурних режимів та захисту від зовнішніх впливів. Вплив ультрафіолетового випромінювання, підвищеної температури та вологи може призводити до зміни фізико-хімічних властивостей покриттів, зниження їх адгезії та погіршення вогнезахисної ефективності. В дослідженні [133] зазначається, що для забезпечення стабільності інтумесцентних систем необхідно уникати прямої дії сонячного випромінювання та локального перегріву композиції. При цьому важливе значення мають герметичність тари, стабільність структури композиції та відсутність розшарування системи під час тривалого зберігання.

Основні умови зберігання композиції АМОК-1 передбачають забезпечення стабільного температурного режиму не нижче +5 °С, що запобігає зміні її

фізико-хімічних властивостей та втраті експлуатаційних характеристик. Зберігання повинно здійснюватися у приміщеннях, захищених від дії прямих сонячних променів, оскільки ультрафіолетове випромінювання може негативно впливати на складові композиції та спричиняти їх часткову деградацію. Каністра з композицією має розміщуватись на відстані не менше одного метра від опалювальних приладів, що забезпечує недопущення локального перегріву та збереження стабільності структури матеріалу, при цьому тара повинна зберігатися у вертикальному положенні, що гарантує герметичність упаковки, запобігає можливому витіканню композиції та сприяє збереженню її однорідності під час тривалого зберігання. Гарантійний строк зберігання становить 1 рік з дати виготовлення. Після закінчення цього терміну композиція може бути використана лише після підтвердження її відповідності технічним вимогам.

4.4. Методика підготовки поверхні перед обробленням

Підготовка поверхні перед нанесенням вогнезахисних композицій є одним із ключових технологічних етапів, який значною мірою визначає ефективність подальшого формування захисного шару та довговічність отриманого покриття. Саме від стану поверхні залежить рівномірність проникнення складу в структуру матеріалу, якість адгезійного контакту та стабільність утворення пінококсового шару під дією високих температур.

Перед нанесенням АМОК-1 поверхня деревини повинна бути очищена від пилу, жирових забруднень та сторонніх включень. Деревина повинна бути сухою та підготовленою до просочення, що забезпечує рівномірне проникнення композиції та досягнення необхідної глибини просочення відповідно до вимог технічних умов. Встановлено, що якість підготовки поверхні безпосередньо впливає на проникнення композиції в структуру деревини, рівномірність формування захисного шару та ефективність вогнезахисту [134]. Суха та очищена поверхня забезпечує кращу адгезію покриття та сприяє більш

рівномірному формуванню пінококсового шару при тепловому впливі. При недостатній підготовці поверхні можливе погіршення вогнезахисних властивостей та нерівномірне спучування покриття [134].

4.5. Методика нанесення антипіренової композиції АМОК-1

Нанесення інтумесцентних вогнезахисних композицій є одним із ключових технологічних етапів формування ефективного захисту деревини та целюлозовмісних матеріалів, оскільки саме на цьому етапі закладаються основні параметри майбутньої вогнезахисної дії. Загальна ефективність оброблення визначається способом нанесення, рівномірністю розподілу композиції по поверхні, а також глибиною її проникнення в структуру матеріалу. Інтумесцентні композиції можуть наноситись методом поверхневого покриття, розпилення або просочення. При цьому рівномірність нанесення та товщина шару мають визначальний вплив на формування теплоізолювального коксового шару та загальну ефективність вогнезахисту [135]. Вибір способу оброблення залежить від типу матеріалу, умов подальшої експлуатації та необхідного рівня вогнезахисної ефективності. Нанесення композиції АМОК-1 здійснюється відповідно до інструкції, наведеної на етикетці продукції. Оброблення може виконуватись як поверхневим способом (пензлем, валиком або розпиленням), так і методом просочення, який забезпечує більш глибоке проникнення складу в структуру матеріалу. Під час теплового впливу покриття характеризується високим коефіцієнтом спучення з утворенням пористого пінококсового шару, що ефективно обмежує теплоперенесення до поверхні деревини. Встановлено, що збільшення глибини проникнення композиції АМОК-1 у структуру деревини сприяє зниженню швидкості термічного розкладу та зменшенню втрати маси матеріалу [136]. При виконанні оброблення необхідно забезпечити досягнення нормованих показників якості, зокрема необхідної глибини просочення, яка гарантує захист по всьому об'єму матеріалу, допустимого рівня водопоглинання, що впливає на довговічність і

стабільність властивостей, а також нормативної вогнестійкості оброблених зразків, яка повинна становити не менше 120 с відповідно до вимог технічних умов. Витрата композиції АМОК-1 становить близько 300 г/м², що в перерахунку на сухий залишок відповідає приблизно 180 г/м².

4.6. Режими оброблення та висушування

Режими оброблення та подальшого висушування є завершальними технологічними параметрами процесу нанесення вогнезахисної композиції, від яких значною мірою залежить формування стабільної структури покриття та його експлуатаційні властивості. Саме на цьому етапі відбувається закріплення вогнезахисного шару, стабілізація його фізико-хімічних характеристик та підготовка матеріалу до подальшого використання в умовах можливого термічного впливу. Правильно підібрані режими оброблення і сушіння забезпечують рівномірність висихання, відсутність дефектів покриття та оптимальні умови для формування щільного захисного шару. Недотримання встановлених параметрів може призвести до зниження адгезії, нерівномірного спучення та загального погіршення вогнезахисної ефективності. У зв'язку з цим визначення та контроль режимів оброблення і висушування є важливою складовою технології застосування композиції АМОК-1. В роботі стверджується [137], що процес формування вогнезахисного шару значною мірою залежить від температурних режимів оброблення та умов висушування покриття. Під час нагрівання відбувається дегідратація компонентів композиції, виділення негорючих газів та поступове формування карбонізованого шару. При подальшому термічному впливі інтумесцентні системи утворюють спінений коксовий шар з низькою теплопровідністю, який забезпечує ефективне теплоізолювання поверхні деревини та сповільнює процеси термоокисної деструкції. Важливу роль у цьому процесі відіграють умови сушіння, оскільки вони безпосередньо впливають на стабільність структури покриття та рівномірність формування захисного шару [137]. У зв'язку з цим

оброблення матеріалів композицією АМОК-1 повинно здійснюватись у контрольованих умовах температури та вологості, що дозволяє забезпечити відтворюваність результатів та стабільні експлуатаційні характеристики покриття. Після нанесення композиції необхідно створити умови для коректного формування захисного пінококсового шару, який і визначає загальну вогнезахисну ефективність матеріалу. Під час контролю якості випробування проводять при температурі 17–30 °С та відносній вологості 45–80 %, що дозволяє оцінити поведінку покриття в умовах, наближених до експлуатаційних.

4.7. Контроль якості оброблення та оцінка ефективності

Контроль якості оброблення та оцінка ефективності вогнезахисних композицій є завершальним етапом технологічного процесу, який дозволяє встановити відповідність отриманого покриття вимогам нормативної документації та підтвердити його функціональну придатність. Саме на цьому етапі визначається стабільність сформованого захисного шару, його експлуатаційні властивості та здатність забезпечувати належний рівень вогнезахисту в умовах термічного впливу. Оцінювання ефективності інтумесцентних систем здійснюється за комплексом фізико-хімічних показників, серед яких вогнестійкість, водопоглинання, структурна стабільність та здатність до формування захисного коксового шару. Встановлено, що одним із ключових критеріїв є формування стійкого пористого шару коксу, який виконує функцію теплоізоляційного бар'єра та суттєво знижує швидкість теплопереносу до основного матеріалу [138]. Додатково показано, що фосфорвмісні компоненти в складі інтумесцентних систем сприяють збільшенню виходу карбонізованого залишку та зменшенню втрати маси під час термічного розкладу, що позитивно впливає на загальну ефективність вогнезахисту. Водночас важливим параметром є водостійкість покриття, оскільки підвищене водопоглинання може призводити до поступової деградації

шару та зниження довговічності його захисних властивостей [139]. Контроль якості антипіренової композиції АМОК-1 проводиться відповідно до вимог технічних умов і включає комплекс випробувань, що охоплює приймально-здавальні перевірки кожної партії продукції, а також періодичні та сертифікаційні випробування. Такі дослідження спрямовані на підтвердження стабільності технологічного процесу та відповідності продукції встановленим нормативним показникам. У процесі контролю оцінюються основні характеристики, що визначають придатність композиції до застосування, зокрема фізико-хімічні властивості, які відображають стабільність складу, показники вогнестійкості оброблених зразків, рівень водопоглинання, що впливає на довговічність захисної дії, а також глибина просочення, яка є одним із ключових параметрів, що визначає ефективність проникнення композиції в структуру матеріалу. Усі випробування виконуються із застосуванням атестованих засобів вимірювальної техніки відповідно до вимог чинних ДСТУ, що забезпечує достовірність результатів та їх відтворюваність.

4.8. Вимоги безпеки при виготовленні та застосуванні композиції

Вимоги безпеки при виготовленні та застосуванні вогнезахисних композицій є невід'ємною складовою технологічного процесу, оскільки безпосередньо пов'язані із захистом життя і здоров'я працівників, а також із попередженням можливих аварійних та небезпечних ситуацій на виробництві. Особливої уваги ці питання набувають під час роботи з хімічними системами, до складу яких входять потенційно небезпечні компоненти. Композиція АМОК-1 належить до негорючих речовин, однак її окремі компоненти у вихідному стані можуть характеризуватися пожежо- та вибухонебезпечними властивостями. У зв'язку з цим під час виконання робіт з її застосуванням необхідно суворо дотримуватись комплексу вимог охорони праці та пожежної безпеки, спрямованих на мінімізацію ризиків для персоналу та забезпечення безпечних умов виробничого процесу. Роботи з антипіреновою композицією

АМОК-1 повинні проводитися у виробничих приміщеннях, обладнаних ефективною припливно-витяжною вентиляцією, яка забезпечує своєчасне видалення парів та підтримання нормативних параметрів повітряного середовища. Додатково необхідно здійснювати постійний контроль концентрацій шкідливих речовин у повітрі робочої зони з метою недопущення перевищення гранично допустимих концентрацій. Працівники, які виконують оброблення, повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту, зокрема захисними окулярами, спеціальним одягом та іншими засобами, що запобігають контакту композиції зі шкірою та слизовими оболонками. Особлива увага приділяється дотриманню вимог пожежної безпеки та організації безпечного виконання технологічних операцій [140]. Виробничий процес застосування композиції АМОК-1 є практично безвідходним за умови дотримання встановлених технологічних режимів і норм безпеки та не чинить істотного негативного впливу на навколишнє середовище. Водночас водорозчинні інтумесцентні системи загалом характеризуються зниженою токсичністю та вищим рівнем екологічної безпеки порівняно з органорозчинними аналогами. Під час виготовлення та нанесення таких покриттів обов'язковим є забезпечення належної вентиляції робочих приміщень і контроль вмісту шкідливих речовин у повітрі робочої зони [140]. Застосування засобів індивідуального захисту дозволяє мінімізувати контакт працівників із компонентами композиції та знизити ризик подразнення шкірних покривів і слизових оболонок. Крім того, використання водних інтумесцентних систем сприяє зменшенню екологічного навантаження та зниженню ризику утворення токсичних продуктів як під час нанесення, так і в процесі експлуатації вогнезахисних покриттів [140].

4.9 Економічне обґрунтування застосування антипіренової композиції АМОК-1

Економічне обґрунтування застосування антипіренової композиції АМОК-1 це важливий аргумент для доведення доцільності її практичного використання для підвищення вогнестійкості целюлозовмісних матеріалів. Визначення орієнтовної собівартості виготовлення композиції дає можливість оцінити її конкурентоспроможність порівняно з існуючими вогнезахисними засобами та визначити перспективність промислового впровадження. До складу композиції АМОК-1 входять доступні хімічні компоненти промислового виробництва: ортофосфатна кислота, диціандіамід, карбамід, крохмаль, формалін та бікарбонат калію. Аналіз середніх ринкових цін на зазначені компоненти показує, що вони є доступною сировиною, що значно знижує загальну собівартість готової композиції. Середня вартість ортофосфорної кислоти технічної на українському ринку становить 75–90 грн/кг, карбаміду технічного - 25–40 грн/кг, диціандіаміду - 130–180 грн/кг, крохмалю модифікованого - 28–45 грн/кг, формаліну технічного - 35–55 грн/кг, бікарбонату калію - 85–130 грн/кг [141-145]. Найбільший вплив на собівартість композиції мають диціандіамід та бікарбонат калію, однак їхня концентрація в суміші не є домінуючою, що дозволяє утримувати вартість продукту на прийнятному рівні. З урахуванням оптимального співвідношення компонентів, встановленого в ході експериментальних досліджень, орієнтовна собівартість виготовлення 1 кг композиції АМОК-1 становить 80–115 грн. За нормативної витрати композиції близько 300 г/м² вартість оброблення 1 м² поверхні складає приблизно 24–35 грн. Для порівняння, середня ринкова вартість готових сертифікованих інтумесцентних вогнезахисних засобів аналогічного призначення та рівня вогнезахисної ефективності, становить 180–350 грн/кг [146-148]. Це доводить економічну конкурентоспроможність та доцільність розробленої композиції.

Отже, антипіренова композиція АМОК-1 є економічно доцільною для практичного застосування завдяки використанню доступної сировини, відносно

низькій собівартості виготовлення та невисокій витраті при нанесенні. Це забезпечує перспективність її використання для вогнезахисної обробки деревини та практичне введення у будівельну та деревообробну галузі.

Таблиця 4.1. Розрахунок економічної вартості антипіренової композиції АМОК-1

Компонент	Частка, %	Ціна на мін. грн/кг	Ціна макс. грн/кг	Вартість мін. компоненту на композиції, грн	Вартість макс. компоненту на композиції, грн
Ортофосфорна кислота (85%)	60	75	90	26,25	31,50
Диціандіамід	9	130	180	32,50	45
Карбамід технічний	7	25	40	5	8
Крохмаль модифікований	15	28	45	2,80	4,50
Формалін технічний	2,5-25	35	55	2,45	3,85
Бікарбонат калію	2,5-5	85	130	2,55	3,90
Клей ПВА	10	60	95	6	9,5
Вартість сировини на 1 кг композиції				77,55	106,25
Накладні витрати (15%)				10,73	14,51
Орієнтовна собівартість 1 кг АМОК-1:				82,28	111,26
Вартість оброблення 1 м ² (витрата 300 г/м ²)					
Вартість оброблення 1 м ² АМОК-1				24,68	33,38
Вартість оброблення 1 м ² аналогів на ринку (180-350 грн/кг, 300 г/м ²)				54	105
Економія порівняно з аналогами (на 1 м ²)				20,62 – 80,32 грн/м ²	

4.10. Висновки за розділом 4

У результаті розроблення методики ефективного застосування та зберігання антипіренової композиції АМОК-1 сформульовано такі висновки:

1. Розроблено та обґрунтовано повний технологічний регламент виготовлення антипіренової композиції АМОК-1 на основі принципу послідовного введення компонентів. Встановлено, що фосфорвмісні сполуки вводяться першими як кислотні каталізатори, потім - вуглецеві донори (крохмаль, карбамід), після чого - азотовмісні газоутворювачі (диціандіамід, бікарбонат калію), і на завершення - регулятори структури. Дотримання зазначеної послідовності є критичним для забезпечення синергічної взаємодії компонентів і стабільної гелеподібної консистенції готового продукту.

2. Визначено вимоги до умов і строків зберігання: температура не нижче +5 °С, захищене від прямого сонячного випромінювання приміщення, відстань від опалювальних приладів не менше 1 м, вертикальне розміщення герметично закритих поліетиленових каністр. Гарантійний строк зберігання - 1 рік з дати виготовлення. Встановлено, що вплив ультрафіолету, підвищеної температури та вологи спричиняє зниження адгезії та погіршення вогнезахисної ефективності, тому дотримання умов зберігання є необхідною умовою збереження функціональних властивостей композиції.

3. Обґрунтовано вимоги до підготовки поверхні деревини: вологість не більше 15–20 %, очищення від пилу, жирових забруднень і сторонніх включень, за необхідності - шліфування. Встановлено пряму залежність між якістю підготовки поверхні та рівномірністю проникнення АМОК-1 у структуру деревини, адгезією захисного шару та стабільністю спучення під час теплового впливу. Недостатня підготовка поверхні є основною причиною нерівномірного пінококсового шару та зниження вогнезахисної ефективності.

4. Розроблено та описано методику нанесення АМОК-1 трьома способами: пензлем, валиком і розпиленням. Рекомендовано двошарове нанесення з витратою близько 300 г/м² (у перерахунку на сухий залишок - 180 г/м²) і міжшаровим сушінням тривалістю не менше 4 годин. Встановлено, що збільшення глибини проникнення композиції в структуру деревини знижує швидкість термічного розкладу та зменшує втрату маси матеріалу. Нанесення методом просочення забезпечує кращий захист об'єму матеріалу, тоді як поверхнєве оброблення є технологічно простішим та економічно доступнішим.

5. Визначено технологічні режими сушіння: температура 17–30 °С, відносна вологість 45–80 %. Встановлено, що дотримання зазначених параметрів є необхідною умовою рівномірного висихання, формування щільного захисного шару, збереження адгезії та стабільного спучення при подальшому тепловому впливі. Відхилення від регламентованих режимів призводить до нерівномірного розподілу компонентів, зниження адгезії та погіршення умов інтумесценції.

6. Розроблено систему контролю якості АМОК-1, що включає приймально-здавальні перевірки кожної партії та періодичні сертифікаційні випробування. Контрольованими параметрами є: фізико-хімічні властивості (консистенція, рН, в'язкість), вогнестійкість оброблених зразків (не менше 120 с), рівень водопоглинання, глибина просочення та вихід карбонізованого залишку. Всі випробування виконуються з атестованими засобами вимірювання відповідно до вимог чинних ДСТУ, що забезпечує відтворюваність результатів і відповідність продукції нормативним вимогам.

7. Встановлено вимоги безпеки при виготовленні та нанесенні АМОК-1. Композиція є негорючою речовиною, проте окремі вихідні компоненти (ортофосфорна кислота, формалін) мають клас безпеки 2 (помірно небезпечні). Обов'язковими умовами безпечного застосування є: ефективна припливно-витяжна вентиляція, засоби індивідуального захисту (захисні окуляри, гумові рукавички, спеціальний одяг, за потреби - респіратор), постійний контроль ГДК у повітрі робочої зони. Виробничий процес є

практично безвідходним і характеризується нижчим екологічним навантаженням порівняно з органорозчинними аналогами.

8. Проведено економічне обґрунтування застосування АМОК-1. Орієнтовна собівартість 1 кг композиції (з урахуванням 15 % накладних витрат) становить 82–111 грн, вартість оброблення 1 м² поверхні – 25–33 грн. Для порівняння: середня ринкова вартість готових сертифікованих інтумесцентних вогнезахисних засобів аналогічного призначення становить 180–350 грн/кг, тобто 54–105 грн/м². Економія при застосуванні АМОК-1 складає 20–80 грн/м², або у 2–3 рази менше порівняно з ринковими аналогами. Конкурентна перевага забезпечується виключно вітчизняною доступною сировиною, що усуває залежність від імпорتنих поставок і знижує ризики ланцюжка поставок.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

За результатами виконаного комплексного дослідження щодо розроблення, теоретичного обґрунтування та експериментальної перевірки ефективності комплексної полімерної антипіренової системи «АМОК-1» для вогнезахисту деревини та целюлозовмісних матеріалів зроблено такі загальні висновки:

1. Проведений комплексний аналіз засобів поверхневого вогнезахисту деревини виявив суттєві обмеження традиційних матеріалів: сольові антипірени зберігають захист лише 1,5–2 роки внаслідок вимивання мінерального шару, тоді як вогнезахисні фарби і лаки із підтвердженим терміном дії забезпечують захист у середньому до 10 років. Найбільш ефективними серед наявних засобів є інтумесцентні покриття, які під час теплового впливу утворюють захисний пінококсовий шар. Аналіз нормативної бази виявив її активне оновлення: запроваджено ДСТУ 9291:2024, ДСТУ 9314:2025 і ДСТУ EN 13381-2:2024.

2. Теоретично обґрунтовано механізм горіння деревини як двостадійний процес: полум'яне горіння газоподібних продуктів піролізу (250–450 °С, 55–60 % загального тепловиділення) та гетерогенне окислення вуглистою залишку (750–850 °С, 40–45 % тепловиділення). Швидкість перевуглювання в реальних умовах становить 0,1–0,2 мм/хв; середня глибина піролізного шару - 15–25 мм для сосни і 18–25 мм для берези. Встановлено, що фосфорно-азотні антипіренові системи є найбільш ефективними: вони знижують температуру початку термодеструкції на 20–30 °С, зменшують вихід горючих летких речовин на 50 % та збільшують вихід карбонізованого залишку на 70 %. Ці закономірності стали теоретичним підґрунтям для розроблення системи «АМОК-1».

3. Вперше розроблено та всебічно охарактеризовано комплексну полімерну антипіренову систему «АМОК-1» на основі аміноформальдегідного комплексу (карбамідо- та диціандіамідоформальдегідних), модифікованих ортофосфорною кислотою та крохмалем. Встановлено оптимальний склад:

ортофосфорна кислота - 60 %, крохмаль - 15 %, диціандіамід - 20 %, карбамід - 7 %, бікарбонат калію - 2 %, клейова добавка (ПВА або силікатний клей) - 10 %. Оптимальна концентрація диціандіаміду (9%) забезпечує максимальну товщину пінококсового шару - 28 мм; при подальшому збільшенні вмісту товщина зменшується внаслідок надмірного газоутворення і порушення цілісності спученої структури.

За результатами стандартних вогневих випробувань (ГОСТ 16363-98, ДСТУ 9330:2025) усі варіанти «АМОК-1» підтверджено до I групи вогнезахисної ефективності — найвищої за чинною класифікацією: • Варіант з ПВА: середня втрата маси — 5,0 % (норматив ≤ 9 %) Варіант з КМЦ: середня втрата маси — 5,7 % Варіант із силікатним клеєм: середня втрата маси — 7,1 % • Самостійне горіння за ДСТУ 9330:2025 — 0 секунд для всіх варіантів

4. Розкрито механізм інтумесцентного захисту «АМОК-1»: ортофосфорна кислота як кислотний каталізатор ініціює дегідратацію крохмалю і целюлози з утворенням вуглецевого каркасу; карбамід і диціандіамід при термічному розкладі виділяють негорючі гази (NH_3 , CO_2), що «надувають» розм'якшений шар; просторово зшита аміноформальдегідна матриця надає спіненому шару механічної стійкості. Кратність спучування досягає 10–15 разів, що забезпечує ефективне теплоізолювання поверхні деревини.

5. Комплекс стандартних вогневих випробувань (ГОСТ 16363-98, ДСТУ 9330:2025, ДСТУ 8829:2019, ДБН В.1.1-7-2016) однозначно підтвердив належність усіх варіантів «АМОК-1» до I групи вогнезахисної ефективності. Середня втрата маси: варіант на основі ПВА - 5,0 %, КМЦ - 5,7 %, силікатного клею - 7,1 % (норматив I групи - не більше 9 %). За ДСТУ 9330:2025 жоден зразок не виявив самостійного горіння (0 с). Індекс поширення полум'я: ПВА і КМЦ - $I = 0$ (не поширює полум'я); силікатний клей - $I = 3$ (повільно поширює полум'я). Оброблені зразки класифіковано в групі М2 за ДБН В.1.1-7-2016.

6. Випробування на визначення зон піролізу та обвуглення (ISO 834) показали, що «АМОК-1» зменшує глибину вуглистого шару сосни з 12 до 4 мм

(у 3 рази), зону піролізу - з 7 до 2 мм (у 3,5 рази); для берези: вуглистий шар - з 8 до 2 мм (у 4 рази), піроліз - з 4 до 1 мм (у 4 рази). Початок інтенсивного піролізу зміщується з 250–270 °С до 310–330 °С, що забезпечує додатковий час 2–3 хвилини для евакуації і проведення рятувальних операцій. Принципово важливим є встановлений факт нівелювання породних відмінностей: оброблені зразки сосни та берези мають однакову глибину деструкції, що спрощує нормування вогнезахисту для різних деревних порід.

7. Мікроструктурний аналіз підтвердив суттєву залежність морфології пінококсу від типу клейової добавки. Варіант з ПВА формує однорідну еластичну матрицю з дрібними рівномірно розподіленими порами та найкращою адгезією. КМЦ підвищує компактність вуглецевого шару і знижує пікову швидкість тепловиділення приблизно на 58 %. Силікатний клей утворює неорганічно-органічну матрицю з підвищеною термічною стабільністю захисного каркасу, але дещо менш рівномірним спученням. Математичне моделювання підтвердило квадратичний характер залежності втрати маси від витрати антипірену і наявність чіткого оптимуму: надмірна витрата не підвищує, а знижує ефективність захисту.

8. Розроблено повну науково обґрунтовану методику практичного застосування «АМОК-1», що охоплює: технологічний регламент виготовлення з обґрунтованою послідовністю введення компонентів; вимоги до зберігання ($t \geq +5$ °С, гарантійний строк 1 рік); підготовку поверхні (вологість ≤ 15 –20 %); двошарове нанесення з витратою 300 г/м² і міжшаровим сушінням 4 год; режими сушіння (17–30 °С, відносна вологість 45–80 %); систему контролю якості (вогнестійкість ≥ 120 с, глибина просочення, водопоглинання). Методика відповідає вимогам Наказу МВС № 1064, ДСТУ 9314:2025 і може бути безпосередньо впроваджена на підприємствах будівельної галузі та в підрозділах цивільного захисту.

9. Економічний аналіз підтвердив конкурентну перевагу «АМОК-1»: собівартість 1 кг композиції становить 82–111 грн, вартість оброблення 1 м²

поверхні - 25–33 грн. Ринкові аналоги аналогічної ефективності коштують 54–105 грн/м², тобто «АМОК-1» є у 2–3 рази економічніша. Склад побудовано виключно на доступній вітчизняній промисловій сировині, що забезпечує незалежність від імпортних поставок і стабільність виробничого ланцюжка - особливо важливо в умовах воєнного стану.

10. Практична значущість роботи полягає у можливості безпосереднього впровадження результатів у: підприємства, що виконують вогнезахисне оброблення дерев'яних будівельних конструкцій; підрозділи цивільного захисту для профілактики пожеж у будівлях із дерев'яними елементами; органи стандартизації при розробці або актуалізації ДСТУ у сфері вогнезахисту деревини; вищі навчальні заклади пожежно-технічного профілю як науково-дослідну і навчально-методичну базу. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення довговічності АМОК-1 при атмосферних впливах, сумісності з лакофарбовими покриттями та адаптацію рецептури для зовнішнього застосування з наступним отриманням сертифіката відповідності.

11. Вперше встановлено закономірності формування захисного пінококсового шару системи «АМОК-1» залежно від концентрації компонентів: визначено оптимальні значення - ортофосфорна кислота 60%, диціандіамід 5-9%, крохмаль 15%, карбамід 7%, клейова добавка 10%, бікарбонат калію 2-5%, формалін 2,5-25%. При концентрації диціандіаміду 9% товщина пінококсового шару досягає оптимального максимуму - 28 мм; подальше збільшення вмісту знижує ефективність через надмірне газоутворення. Встановлено параметри вогнезахисної ефективності, які вказують на те, що розроблена фосфорно-азотна антипіренова система забезпечує зниження температури початку термодеструкції на 20–30 °С, вихід горючих летких речовин на 50 % та забезпечує вихід карбонізованого залишку близько 70 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. АНАЛІТИЧНА ДОВІДКА про пожежі та їх наслідки в Україні <https://idundcz.dsns.gov.ua/statistika-pozhezh/analitichni-materiali>
2. Brushlinsky N.N., Ahrens M., Sokolov S.V., Wagner P. World Fire Statistics. International Association of Fire and Rescue Services. Centre of Fire Statistics of CTIF. – 2016. – No. 21. – 62 p
3. Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України. АНАЛІТИЧНА ДОВІДКА про пожежі та їх наслідки в Україні <https://idundcz.dsns.gov.ua/statistika-pozhezh/analitichni-materiali>
4. Charles Michael Albert, Kang Chiang Liew, Recent development and challenges in enhancing fire performance on wood and wood-based composites: A 10-year review from 2012 to 2021, Journal of Bioresources and Bioproducts, Volume 9, Issue 1, 2024, Pages 27-42, ISSN 2369-9698, <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2023.10.004>.
5. Gong J, Zhai C, Wang Z (2021) Pyrolysis and autoignition behaviors of beech wood coated with an acrylic-based waterborne layer. Fuel 306:121724. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121724>
6. S. Basak, A.S.M. Raja, S. Saxena, P.G. Patil, Tannin based polyphenolic biomacromolecules: Creating a new era towards sustainable flame retardancy of polymers, Polymer Degradation and Stability, Volume 189, 2021, 109603, ISSN 0141-3910, <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109603>.
7. Sauerbier P, Mayer AK, Emmerich L, Militz H (2020) Fire retardant treatment of wood– state of the art and future perspectives. In Wood & Fire Safety: Proceedings of the 9th International Conference on Wood & Fire Safety 9: 97–102. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41235-7_14
8. Islam MN, Ando K, Hattori N, Yamauchi H, Kobayashi Y. Comparative study between full cell and passive impregnation method of wood preservation for laser incised Douglas fir lumber. Wood Sci Technol. 2008. № 42. P. 343–350.

9. Džidić, S., Aktee, O.A. (2025). Fire Resistance Assessment of Timber Elements. In: Karabegović, I., Kovačević, A., Mandžuka, S. (eds) *New Technologies, Development and Application VIII. NT 2025. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 1484. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95200-5_54
10. Shi, S. et al. (2025). Comprehensive Study and Development Trends of Fire Performance in Timber Structures. In: Vatin, N., Roschina, S., Dixit, S. (eds) *Proceedings of MPCPE 2024. MPCPE 2024. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 576. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-81635-2_32
11. Про затвердження Правил з вогнезахисту. Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0259-19#Text>
12. Begimkulov, J., Abdurakhmanov, E., Abdurakhmanov, G., Murodova, Z.B., Baratova, M.R. (2026). Production of Fire-Resistant Compounds for Protecting Wood Products from Fire Based on Central Kyzilkum Phosphorites. In: Silhavy, R., Silhavy, P. (eds) *Software Engineering: Emerging Trends and Practices in System Development. CSOC 2025. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 1558
13. Rantuch, P., Kvorková, V., Martinka, J., Štefko, T., Wachter, I. (2024). Fire Protection of Wood Using a Coating Based on Sodium Silicate and Biochar. In: Makovická Osvaldová, L., Hasburgh, L.E., Das, O. (eds) *Wood & Fire Safety 2024*
14. Kol HS, Ozbay G, Köse L, Kurt S (2010) Effects of some impregnation chemicals on combustion characteristics of laminated veneer lumber (LVL) produced with oak and poplar veneers. *BioResources* 5(1):70–80
15. Friedman R (1998) *Principles of fire protection chemistry and physics*. Jones & Bartlett Learning
16. Romina A. Arreche, Katerine Igal, Natalia Bellotti, Cecilia Deyá, Patricia G. Vázquez, Functionalized zirconia compounds as antifungal additives for hygienic waterborne coatings, *Progress in Organic Coatings*, Volume 128, 2019, Pages 1-10, ISSN 0300-9440, <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.12.004>.
17. Baokang Dang, Tengfei Jin, Yipeng Chen, Jiayi Zhang, Qiao Feng, Ming Liu, Qingfeng Sun, Effect of nano-zirconium oxide modification on flame retardancy

of lignocellulose composite, *Industrial Crops and Products*, Volume 187, Part A, 2022, 115384, ISSN 0926-6690, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115384>.

18. Richa Bansal, Sreeja Nair, Krishna K. Pandey, UV resistant wood coating based on zinc oxide and cerium oxide dispersed linseed oil nano-emulsion, *Materials Today Communications*, Volume 30, 2022, 103177, ISSN 2352-4928, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103177>.

19. John Bani Fathima, Arivalagan Pugazhendhi, Rose Venis, Synthesis and characterization of ZrO₂ nanoparticles-antimicrobial activity and their prospective role in dental care, *Microbial Pathogenesis*, Volume 110, 2017, Pages 245-251, ISSN 0882-4010, <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2017.06.039>.

20. Liu C, Wei L, Ma B, Zhang Y, Jia X (2024) Effect of diammonium hydrogen phosphate coated with silica on flame retardancy of epoxy resin. *RSC Adv* 14(39):28965–28975. <https://doi.org/10.1039/D4RA05513F>

21. Grzeskowiak W (2012) Evaluation of the effectiveness of the fire retardant mixture containing potassium carbonate using a cone calorimeter. *Fire Mater* 36(1):75–83. <https://doi.org/10.1002/fam.1088>

22. Popescu CM, Pfriem A (2020) Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood-based products– An overview. *Fire Mater* 44(1):100–111. <https://doi.org/10.1002/fam.2779>

23. Zahra Karimzadeh, Zahra Shariatinia, Environmental wood protection against fire, swelling, and degradation using acrylic paint coatings containing ZrO₂ nanoparticle, *Materials Today Communications*, Volume 47, 2025, 112981, ISSN 2352-4928, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.112981>

24. Gebke, Stefan, et al. "Flame retardancy of wood fiber materials using phosphorus-modified wheat starch." *Molecules* 25.2 (2020): 335.

25. Uddin, Khan MA, Mariko Ago, and Orlando J. Rojas. "Hybrid films of chitosan, cellulose nanofibrils and boric acid: Flame retardancy, optical and thermo-mechanical properties." *Carbohydrate Polymers* 177 (2017): 13-21.

26. Zhou, Lin, and Yanchun Fu. "Flame-retardant wood composites based on immobilizing with chitosan/sodium phytate/nano-TiO₂-ZnO coatings via layer-by-layer self-assembly." *Coatings* 10.3 (2020): 296.
27. Lukina, A., Terentyev, K., Aminov, M., Lisyatnikov, M. (2025). Fire Resistance of Wooden Structures and Ways to Improve it. In: Vatin, N., Roschina, S., Dixit, S. (eds) *Proceedings of MPCPE 2024. MPCPE 2024. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 576. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-81635-2_19
28. Verner, N., Alekseev, K., Nazarenko, O., Amelkovich, Y. (2023). Study of Fire-Retardance Effectiveness of Wood Treated with Fire Retardants. In: Lysenko, E., Rogachev, A., Starý, O. (eds) *Recent Developments in the Field of Non-Destructive Testing, Safety and Materials Science. ICMTNT 2021. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 433. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99060-2_16
29. Sivrikaya, H., Wu, M. & Militz, H. Fire resistance of Scots pine modified with sorbitol, citric acid and fire retardants. *Eur. J. Wood Prod.* 83, 127 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00107-025-02282-4>
30. Wu, M., Emmerich, L., Militz, H. (2025). Studies on the Durability of the Reaction to Fire Performance of Melamine Formaldehyde Resin and Phosphorus Polyol Treated Wood. In: Goli, G., et al. *Proceedings of the 11th European Conference on Wood Modification. ECWM 2024. Springer Proceedings in Materials*, vol 86. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-99418-0_19
31. Wang, Z., Yang, S., Liu, Z. et al. Improving fire safety and corrosion resistance of wood using dual-layer tung oil-based coatings. *Eur. J. Wood Prod.* 83, 19 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02166-z>
32. Гаврилюк А. Ф., Гайдук М. О. Дослідження антагонізму вогнезахисного просочування дерев'яних будівельних конструкцій, як спосіб покращення пожежної безпеки в умовах війни. *Цивільний захист в умовах війни*. 2023. С. 121.

33. Корнієнко О. В. Проміжні результати досліджень з визначення строку придатності вогнезахисних покривів (просочень) для деревини. Проблеми техніко-екологічної безпеки: освіта, наука, практика. 2016. С. 57
34. Гудович, О. Д., and О. В. Корнієнко. "Дослідження зміни ефективності вогнезахисту деревини залежно від часу та умов зберігання." Вісник Київського національного університету технологій та дизайну (2012)
35. Van Acker, J., Durimel, M., De Ligne, L., Parakhonskiy, B., Skirtach, A.G., Van den Bulcke, J. (2025). Wood Modification Methods and Fire Resistance of Façades and Cladding. In: Goli, G., et al. Proceedings of the 11th European Conference on Wood Modification
36. Демідов Д. В. Вивчення впливу мінеральних наповнювачів на вогнезахисні характеристики водно-дисперсійних лакофарбових покриттів. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2018. Т. 182. С. 37–43
37. Вибір вогнезахисних фарб: аналіз матеріалів для різних будівель. Аналіз матеріалів для вогнезахисних фарб: який вибір підходить для різних будівель | МЕРКОР. URL: <https://mercor.com.ua/analiz-materialiv-dlya-vognezahysnyh-farb-yakuj-vybir-pidhodyt-dlya-riznyh-budivel/>
38. Пазен О., Пранничук О. СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВОГНЕЗАХИСТУ ДЕРЕВИНИ. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності : матеріали міжнар. конф., м. М. ЛЬВІВ. М. ЛЬВІВ, 2022. С. 23–26.
39. Zhou Jun, He Ming-ming, Yu Guang-he and Li Li. The Research Status and Development Tendency of Domestic and International Wood FireRetardant Treatment Technologies. Journal of Shandong Normal University (Natural Science), 2014, 29 (6): 151-153.
40. Haowen Sun, Wei Wang, Yuan Liu, Qi Wang, A highly efficient, colorless phosphorus–nitrogen synergistic flame retardant for durable flame

retardancy in wood pulp paper, *Polymer Degradation and Stability*, Volume 215, 2023, 110468, ISSN 0141-3910, <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110468>.

41. Y.X. Ou, H.Q. Wang, X. Ouyang, Y.Y. Zhao, Q. Zhou, C.W. Luo, Q.S. Hua, X.P. Ouyang, S. Zhang, Recent advances and strategies for high-performance coatings, *Progress in Materials Science*, Volume 136, 2023, 101125, ISSN 0079-6425, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101125>.

42. Wen-Xiong Li, Hai-Jun Zhang, Xiao-Ping Hu, Wen-Xue Yang, Zhou Cheng, Chang-Qiong Xie, Highly efficient replacement of traditional intumescent flame retardants in polypropylene by manganese ions doped melamine phytate nanosheets, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 398, 2020, 123001, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123001>.

43. Yin Zhang, Yanping Huang, Mei-Chun Li, Shuai Zhang, Weimin Zhou, Changtong Mei, Mingzhu Pan, Bioinspired, stable adhesive Ti₃C₂T_x MXene-based coatings towards fire warning, smoke suppression and VOCs removal smart wood, *Chemical Engineering Journal*, Volume 452, Part 4, 2023, 139360, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139360>

44. Олійник, Г. А., Д. Е. Кураков, and І. Ю. Черних. "Інтумесцентні системи: реактивні вогнезахисні покриття будівельних конструкцій." *Збірник наукових праць Донбаської національної академії будівництва і архітектури* 4 (2019): 3-10

45. Balanyuk, V., Kozyar, N., Garasyumyk, O. (2016). Study of fire-extinguishing efficiency of environmentally friendly binary aerosol-nitrogen mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (10 (81)), 4–11. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72399>

46. Gaff M, Kačík F, Gašparík M, Todaro L, Jones D, Corleto R, Osvaldová LM, Čekovská H (2019) The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak (*Tectona grandis* L. f.) wood. *Constr Build Mater* 200:551–558. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.106>

47. Гайдук М. О., Гаврилюк А. Ф., Яковчук Р. С. Проблемні аспекти визначення вогнезахисту деревини. 2024
48. Вогнебіозахист для дерева/деревини – вогнезахисна обробка дерев'яних конструкцій | Ціна. Обробка дерева – купити антисептичні засоби захисту деревини від вологи/гниття/вогню в Києві | Ціна. URL: <https://bionic-house.com.ua/ua/katalog-produktsiji/vognebiozakhist-derevini-ta-antipireni.html>
49. Данілін О., Кульченко Є. Захист будівель від впливу небезпечних чинників. Науково - практичні аспекти управління у сфері цивільного захисту : матеріали міжнар. конф., м. Харків. 2023
50. Zehfuß, J., Sander, L. (2021). Gypsum plasterboards under natural fire – Experimental investigations of thermal properties. *Civil Engineering Design*, 3(3),
51. Pat. 6565040 US, IPC B64C 1/40. Burn through resistant systems for transportation, especially aircraft / Fay R.M. (US), Wulliman R. S. (US), Stacy J. W. (US), Townsend J. C. (US), Volenec S.N (US),inventors;Johns Manville International Inc. (US), assignee –No.US20020017590; applied for on 09.10.2001; published on 20.05.2003. URL:<https://www.uspto.gov>
52. Pearson A (2016) Dalston Lane: Tall Timber. <https://www.building.co.uk/technical-case-studies/dalston-lane-tall-timber/5079749.article>
53. Захист речовин і матеріалів від теплового впливу пожежі за допомогою екранів і покриттів / А.Я. Шаршанов, Ю.О. Абрамов. – Харків: НУЦЗУ, 2023. – 280 с
54. Protyai, MИH, Bin Rashid, A, “A Comprehensive Overview of Recent Progress in MXene-Based Polymer Composites: Their Fabrication Processes, Advanced Applications, and Prospects.” *Heliyon*, 10 (17) e37030 (2024)
55. Xie, Y., Xu, J., Militz, H., Wang, F., Wang, Q., Mai, C., Xiao, Z. (2016). Thermo-oxidative decomposition and combustion behavior of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sapwood modified with phenol- and melamine-formaldehyde resins.

Wood Science and Technology, 50 (6), 1125–1143. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0857-6>

56. Xiao, Z., Xu, J., Mai, C., Militz, H., Wang, Q., Xie, Y. (2016). Combustion behavior of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sapwood treated with a dispersion of aluminum oxychloride-modified silica. *Holzforschung*, 70 (12), 1165–1173. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0062>

57. Lainioti, G. C., Koukoumtzis, V., Andrikopoulos, K. S., Tsantaridis, L., Östman, B., Voyiatzis, G. A., Kallitsis, J. K. (2022). Environmentally Friendly Hybrid Organic–Inorganic Halogen-Free Coatings for Wood Fire-Retardant Applications. *Polymers*, 14 (22), 4959. <https://doi.org/10.3390/polym14224959>

58. Balanyuk, V. M. (2015). The effectiveness of open space fire extinguishing with flammable liquid fighting aerosols. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10 (77)), 4–11. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51399>

59. Wang, L, Lang, L, Hu, X, Gao, T, He, M, Qiu, H, Ji, X, Guo, H, Zhang, Y, Huang, S, “Multifunctional Ionic Bonding-Strengthened (Ti3C2T MXene/CNF)-(BNNS/CNF) Composite Films with Janus Structure for Outstanding Electromagnetic Interference Shielding and Thermal Management.” *J. Mater. Sci. Technol.*, 224 46–55 (2025)

60. Rowell, R., Pettersen, R., Tshabalala, M. (2012). Cell Wall Chemistry. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, Second Edition*, 33–72. <https://doi.org/10.1201/b12487-5>

61. Жартовський С., В.В К. Перспективи гармонізації нормативних вимог щодо показників вогнестійкості та реакції на вогонь дерев'яних будівельних конструкцій в Україні зі стандартами єс. *Problems of Emergency Situations*. 2021. № 43. С. 43–44

62. Balaniuk V. M., Slobodian V. I., & Pikus, V. S. (2025). АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ПОВЕРХНЕВОГО ВОГНЕЗАХИСТУ ДЛЯ ДЕРЕВИНИ. *Пожежна безпека*, 47, 5-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.01>

63. Баланюк В. М., Копистинський Ю. В., Слободян В. І. Щодо питання визначення характеристик вогнегасних засобів в Україні // Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій : матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції, м. Черкаси, 27 квітня 2023 р. Черкаси, 2023. С. 127–129.

64. ДСТУ ISO 12944-1:2019 Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. Частина 1. Загальний вступ (ISO 12944-1:2017, IDT). БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82744

65. ДСТУ 9314:2025 Вогнезахист будівельних конструкцій, матеріалів та виробів. Настанови щодо проектування, виконання робіт, уведення в експлуатацію та підтримання експлуатаційної придатності. БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=114454

66. ДСТУ EN 13381-2:2022 Методи випробування для визначення впливу на вогнестійкість елементів конструкцій. Частина 2. Вертикальні вогнезахисні екрани (EN 13381-2:2014, IDT). БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=109728

67. ДСТУ EN 13381-2:2024 Методи випробування для визначення впливу на вогнестійкість елементів конструкцій. Частина 2. Вертикальні вогнезахисні екрани (EN 13381-2:2014, IDT). БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=109128

68. Berhanu, S., Hervy, M., Weiss-Hortala, E., Proudhon, H., Berger, M.-H., Chesnaud, A. et al. (2018). Advanced characterization unravels the structure and reactivity of wood-based chars. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 130, 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.01.024>

69. Brophy K, Millican K. Wood and fire: Scotland's timber cursus monuments. *Archaeol J.* 2015;172(2):297–324. <https://doi.org/10.1080/00665983.2015.1025589>.
70. Laban, M., Milanko, V., Kočetov Mišulić, T., Draganić, S. (2017). Fire statistics and risk analysis in wooden building structures in Serbia. *International Wood Products Journal*, 8 (2), 62–70. <https://doi.org/10.1080/20426445.2017.1309808>
71. Sekizawa, A., Goto, O. (2022). Challenges in Fire Protection for Cultural Property Buildings Based on the Lessons from the Shurijo Castle Fire. *Fire Technology*, 61 (3), 1079–1097. <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01330-2>
72. Дослідження процесів горіння деревини та оцінка вогнестійкості несучих будівельних конструкцій
URL: <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/student-work/PB/vognik.pdf?srsltid=AfmBOopFyxmjZ7In9MzHLl3MheDCwGQCf2FoXX5n2yQb-fX5v394fbjv>
73. Guizani, C., Jeguirim, M., Valin, S., Limousy, L., Salvador, S. (2017). Biomass Chars: The Effects of Pyrolysis Conditions on Their Morphology, Structure, Chemical Properties and Reactivity. *Energies*, 10 (6), 796. <https://doi.org/10.3390/en10060796>
74. Lee, Y. X., Wang, W., Lei, Y., Xu, L., Agarwal, V., Wang, C., Yeoh, G. H. (2025). Flame-retardant coatings for wooden structures. *Progress in Organic Coatings*, 198, 108903.
75. Mensah, R. A., Jiang, L., Renner, J. S., & Xu, Q. (2022). Characterisation of the fire behaviour of wood: From pyrolysis to fire retardant mechanisms. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(4), 1407–1422. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11442-0>
76. Bartlett AI, Hadden RM, Bisby LA. A review of factors affecting the burning behaviour of wood for application to tall timber construction. *Fire Technol.* 2019;55(1):1–49. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0787-y>.

77. Babrauskas V. Ignition of wood: a review of the state of the art. *J Fire Prot Eng.* 2002;12(3):163–89. <https://doi.org/10.1177/10423910260620482>.
78. Martín, J. A., & López, R. (2023). Biological Deterioration and Natural Durability of Wood in Europe. *Forests*, 14(2), 283. <https://doi.org/10.3390/f14020283>
79. Paolino, B., Sorrentino, M.C. & Pacifico, S. Greener solutions for biodeterioration of organic-media cultural heritage: where are we?. *Herit Sci* 12, 334 (2024). <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01442-8>
80. Tsapko, Y., Tsapko, A., Zhartovskyi, S., Likhnyovskyi, R., Kravchenko, M., Lialina, N., Berezovskyi, Y., Kaveryn, K., & Sarapin, Y. (2024). Establishing fire protection patterns in wood using impregnation compositions from inorganic salts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10 (131), 62–70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313423>
81. Провести теоретичні і експериментальні дослідження процесів придушення полум'я вогнегасними речовинами і виявити шляхи підвищення їх ефективності: Звіт про НДР.- К.: УкрНДІПБ МВС України, 1995.
82. Marino, S., et al. (2024). Enhancing the fire resistance properties of thermally modified wood. *Wood Science and Technology*.
83. Jin, E., Chung, YJ. Evaluation of combustion characteristics for wood specimens coated with metal oxides of different oxidation states in the secondary stage of combustion (II). *Wood Sci Technol* 58, 253–271 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00226-023-01510-5>
84. de Hoyos-Martínez, P. L., Issaoui, H., Herrera, R., Labidi, J., Charrier-El Bouhtoury, F. (2021). Wood Fireproofing Coatings Based on Biobased Phenolic Resins. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9 (4), 1729–1740. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c07505>
85. Жартовський В.М., Жартовський С.В., Борисов П.Ф. Композиція для вогнебіозахисту деревини. Деклар. патент № 8963 В27К 3/50, Бюл. № 8, 2005.

86. Жартовський В.М., Жартовський С.В., Грабовський О.В. Спосіб виготовлення вогнебіо захищеної фанери підвищеної водостійкості. Деклараційний патент на корисну модель № 8987 від 15.08 2005 р. Бюл. № 8.
87. Can we learn from the heritage lost in a fire? Experiences and practises on the fire protection of historic buildings in Finland, Norway and Sweden (2004). Stockholm: Riksantikvarieämbetet. Available at: <https://www.raa.se/publicerat/9516161170.pdf>
88. Wen, MY., Kang, CW. & Park, HJ. Impregnation and mechanical properties of three softwoods treated with a new fire retardant chemical. *J Wood Sci* 60, 367–375 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10086-014-1408-0>
89. Advanced Fireproofing Systems Ltd. Improvements relating to fire proofing compositions – Brit. Pat. #1570604, C09D5/18, C 3 B, 4. III. 1977, 2. VII. 1980. Iben Hansen-Bruhn, T. Richard Hull, Smoke toxicity of fire protecting timber treatments, *Fire Safety Journal*, Volume 141, 2023, 103977, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103977>.
90. Östman B, et al. Innovative eco-efficient high fire performance wood products for demanding applications. Berlin: Springer; 2006.
91. Dobbs A.J., Grant C. The volatilization of arsenic on burning of copper-chrome-arsenic (CCA) treated wood. – *Holzforschung*, 1978, 32, #1. – P. 32–35.
92. Krauses Chr., Englert N. Zur Gesundheitlichen Pentachlorphenolhaltiger Holzschutzmittel in Wohnräumen – *Holz als Roh und Werkstoff*, 1980, #11. – P. 429–432.
93. Grześkowiak, W. Ł., Ratajczak, I., Zborowska, M., Przybylska, M., & Patora, M. (2024). Phosphorus–Nitrogen Interaction in Fire Retardants and Its Impact on the Chemistry of Treated Wood. *Materials*, 17(21), 5283. <https://doi.org/10.3390/ma17215283>
94. Korovnikova, N., Dubyna, O., Oliinik, V., & Svishchova, Y. (2020). Chemical cellulose-based fibers of decreased flammability. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(6 (107)), 33–39. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.214507>

95. Meiting Wang, Guang-Zhong Yin, Yuan Yang, Wanlu Fu, José Luis Díaz Palencia, Junhuan Zhao, Na Wang, Yan Jiang, De-Yi Wang, Bio-based flame retardants to polymers: A review, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Volume 6, Issue 2, 2023, Pages 132-155, ISSN 2542-5048, <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.07.003>.
96. Study on the fire extinguishing efficiency and mechanism of composite superfine dry powder containing ferrocene, *Fire Safety Journal*, Volume 130, 2022, 103606, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103606>.
97. Цапко Ю.В., Жартовський С.В., Грабовський О.В. Розроблення важкогорючих фанерних плит та дослідження їх вогнезахисних властивостей // Науковий вісник УкрНДІПБ: Наук. журнал. – 2007. – № 1 (15). – С. 63–68.
98. 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: Наук. журнал. – К., 2004. – № 1 (9). – С. 21–25.
99. Жартовський В., Бут В., Цапко Ю., Барило О. Дослідження механізму вогнезахисної ефективності деревини просочувальними композиціями // Коммунальное хозяйство городов: Научно.-технический сборник. – Выпуск 55 – К.: Техніка, 2004. – С. 219–229.
100. Jiang, L., Zeinali, D., Arsava, K.S. et al. The Impact of Water-Based Fire Suppression Systems on Combustion Products. *Fire Technol* 61, 2441–2465 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10694-024-01689-4>
101. Balanyuk V.M., Slobodian V.I., Pikus V.S. Analiz zasobiv poverkhnevoho vohnezakhystu dlia derevyny [Analysis of surface fire protection agents for wood] // *Pozhezhna bezpeka*. – 2025. – № 47. – С. 5–13. DOI: 10.32447/20786662.47.2025.01.
102. Camino G., Costa L., Martinasso G. Intumescent fire-retardant systems // *Polymer Degradation and Stability*. – 1989. – Vol. 23, № 4. – P. 359–376. DOI: 10.1016/0141-3910(89)90058-X.

103. Haiduk M.O. Improving the fire protection efficiency of wooden building structures using impregnating fire-bioprotective substances when replacing fire-retardant agents : дис. доктора філософії : 261 – Пожежна безпека / Львівський державний університет безпеки життєдіяльності. – Львів, 2025.
104. ДСТУ 4479:2005. Речовини вогнезахисні водорозчинні для деревини. Загальні технічні вимоги та методи випробування. – Київ: Держспоживстандарт України, 2005. – 15 с.
105. «ГОСТ 20022.6-93. Захист деревини. Способи просочення. – Київ: Держстандарт України» -15С.
106. ГОСТ 16363–98. Засоби вогнезахисні для деревини. Методи визначення вогнезахисних властивостей. 16 с.
107. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. – Київ: Мінрегіон України, 2017. – 35 с.
108. ДСТУ ISO 834-1:2023. Випробування на вогнестійкість. Елементи будівельних конструкцій. Частина 1. Загальні вимоги. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023. – 32 с.
109. Balanyuk V.M., Kozyar N.M., Harasym'yuk O.I. The usage of gas and aerosol powder extinguishing mixtures for protection of incendiary mixtures // ScienceRise. – 2016. – Vol. 5, № 2 (22). – P. 10. DOI: 10.15587/2313-8416.2016.69333.
110. Tsapko Y., Tsapko O., Bondarenko O. Research of the mechanism of protecting wood with intumescent coating // Technology Audit and Production Reserves. – 2020. – Vol. 5, № 3 (55). – P. 19–23. DOI: 10.15587/2706-5448.2020.215698
111. Баланюк, В., & Пикус, В. (2026). Механізм та методологія розроблення полімерної системи на основі аміноформальдегідних смол, для вогнезахисту деревини. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 361(1), 549-556. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-76>

112. Likhnyovskyi R. та ін. Regarding the Formation of Wood Material Fire Protection and the Mechanism of its Action // *Materials Science Forum*. – 2021. – Vol. 1038. – P. 439–453. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1038.439.
113. Hussain A., Landry V., Blanchet P., Hoang D.-T., Dagenais C. Fire Performance of Intumescent Waterborne Coatings with Encapsulated APP for Wood Constructions. *Coatings*. – 2021. – Vol. 11, № 11. – P. 1272. DOI: 10.3390/coatings11111272
114. Tsapko Y. та ін. Research of Mechanism of Fire Protection with Wood Lacquer // *Materials Science Forum*. – 2021. – Vol. 1038. – P. 531–538. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1038.531.
115. Canosa G., Alfieri P. V., Giudice C. A. Hybrid Intumescent Coatings for Wood Protection against Fire Action. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2011. – Vol. 50, № 21. – P. 11897–11905. DOI: 10.1021/ie200015k
116. Tsapko Y., Tsapko A. Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – Vol. 3, № 10 (87). – P. 50–55. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.102393.
117. Zhang X., Li Q., Fang Z., Wang D. The Effect of Intumescent Coating Containing Expandable Graphite on Fire Performance of Spruce Wood. *Coatings*. – 2024. – Vol. 14, № 4. – P. 490. DOI: 10.3390/coatings14040490
118. Laidler, K. J. (1984). The development of the Arrhenius equation. *Journal of Chemical Education*, 61 (6), 494. <https://doi.org/10.1021/ed061p494>
119. Liu L., He H., Feng X., Yu B., Yang H., Tawiah B. Bio-based supramolecular intumescent coatings for wood fire protection. *Polymer Degradation and Stability*. – 2026. – Vol. 247. – Article 111965. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2026.111965
120. Guo Y., Hu L., Liu Y., et al. Waterborne Intumescent Coatings Containing Industrial and Bio-Fillers for Fire Protection of Timber Materials. *Polymers*. – 2020. – Vol. 12, № 4. – P. 757. DOI: 10.3390/polym12040757

121. Almagro-Herrera, N., Lozano-Calvo, S., Palma, A., García, J. C., Díaz, M. J. (2024). Assessing the influence of biomass origin and fractionation methods on pyrolysis of primary biomass fractions. *Fuel*, 367, 131501. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131501>
122. Dual-functional intumescent fire-retardant/self-healing water-based plywood coatings / F.-C. Sun et al. *Progress in Organic Coatings*. 2021. Vol. 154. P. 106187. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106187>
123. Žigon, J., Poljanšek, I., Oven, P. et al. Application and characterization of poly(vinyl alcohol) reinforced with cellulose nanofibrils as a coating for wood. *Cellulose* 32, 6229–6252 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10570-025-06606-8>
124. Liu, X., Zhang, X., Long, K., Yang, S. PVA wood adhesive modified with sodium silicate cross-linked copolymer // Conference Paper, 2012.
125. An intumescent flame-retardant system based on carboxymethyl cellulose for flexible polyurethane foams with outstanding flame retardancy, antibacterial properties, and mechanical properties / P. Li et al. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. P. 124387. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124387>
126. Turns, R. E. (2012). *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. McGraw Hill. Available at: <https://dokumen.pub/an-introduction-to-combustion-concepts-and-applications-3rd-ed-978-0-07-338019-3-0-07-338019-9.html#Stephen+R.+Turns>
127. NIST-JANAF Thermochemical Tables. NIST. <https://doi.org/10.18434/T42S31>
128. Commandré, J.-M., Lahmidi, H., Salvador, S., Dupassieux, N. (2011). Pyrolysis of wood at high temperature: The influence of experimental parameters on gaseous products. *Fuel Processing Technology*, 92 (5), 837–844. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.07.009>
129. Carosio, F., Alongi, J. (2016). Ultra-Fast Layer-by-Layer Approach for Depositing Flame Retardant Coatings on Flexible PU Foams within Seconds. *ACS*

Applied Materials & Interface. 8 (10), 6315-6319. doi:
<http://doi.org/10.1021/acsami.6b00598>

130. БАЛАНЮК, В., & ПИКУС, В. (2026). ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЛЕКСНОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ВОГНЕЗАХИСНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ АМІНОФОРМАЛЬДЕГІДНИХ СМОЛ. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 363(2), 118-124. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-15>

131. Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel, 86 (12-13), 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>

132. Boerjan, W., Ralph, J., Baucher, M. (2003). Lignin Biosynthesis. Annual Review of Plant Biology, 54 (1), 519–546. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.54.031902.134938>

133. Development of waterborne transparent intumescent coatings for timber buildings: Influence of phosphoric acid ratio / W. Bi et al. Construction and Building Materials. 2025. Vol. 493. P. 143225. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143225>

134. Баланюк, В., Пикус, В., Гарасим'юк, О., Кудринська, К., Пастухов, П., та Копистинський, Ю. (2026). Визначення закономірностей зниження горючості деревини з урахуванням процесів горіння та термоокислювальної деструкції. Східно-Європейський журнал передових технологій, 2 (10 (140)), 49–60. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.358178>

135. Fire retardancy of an aqueous, intumescent, and translucent wood varnish based on guanylurea phosphate and melamine-urea-formaldehyde resin / Z. Xiao et al. Progress in Organic Coatings. 2018. Vol. 121. P. 64–72. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.04.015>

136. Phytate-based transparent and waterproof intumescent flame-retardant coating for protection of wood / Y. Tian et al. Materials Chemistry and Physics. 2022. P. 127000. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.127000>

137. Lin, S., Qin, Y., Huang, X., Gollner, M. (2023). Use of pre-charred surfaces to improve fire performance of wood. *Fire Safety Journal*, 136, 103745. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103745>
138. Баланюк В. М., Копистинський Ю. В., Слободян В. І., Іващишин О. І., Пікус В. С., Гарасим'юк О. І. Товщина піролізного шару деревини при вогнезахисті антипіреновою композицією комбінованої дії // Цивільний захист в умовах війни : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції. Львів : Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2025.
139. Depczynska E., Burawska I. Overview and Evaluation of Chemicals and Methods for Flame Retardancy in Glued Laminated Wood Systems. *Polymers*. 2025. Vol. 17, no. 11. P. 1459. URL: <https://doi.org/10.3390/polym17111459>
140. Sustainable, high-performance, flame-retardant waterborne wood coatings via phytic acid based green curing agent for melamine-urea-formaldehyde resin / F. Song et al. *Progress in Organic Coatings*. 2022. Vol. 162. P. 106597. URL: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106597>
141. Ортофосфорна кислота 85 %. Система Оптимум : вебсайт. URL: <https://www.systopt.com.ua/item-ortofosforna-kyslota>.
142. Ортофосфорна кислота 85 % Orthophosphoric acid 1 л. Prom.ua : вебсайт. URL: <https://prom.ua/ua/p783589203-ortofosfornaya-kislota-orthophosphoric.html>.
143. Ортофосфорна кислота 85 % харчова 35 кг. Хімсейл : вебсайт. URL: <https://chemsale.com.ua/ua/product/ortofosfornaya-kislota/>.
144. Каталог хімічної сировини. Prom.ua : вебсайт. URL: <https://prom.ua/ua/>.
145. Хімічні реактиви та промислова сировина. Хімлаборреактив : вебсайт. URL: <https://shop.hlr.ua/ua/>.
146. Вогнезахисна фарба для деревини Fireproof Coating. Bionic House. <https://bionic-house.com.ua/ua/katalog-produktsiji/vognebiozakhist-derevini-ta-antipireni/vognezakhisna-farba-dlya-dereva-fireproof-coating.html>

147. Засоби вогнебіозахисту деревини та інтумесцентні покриття. Bionic House каталог <https://bionic-house.com.ua/ua/katalog-produktsiji/vognebiozakhist-derevini-ta-antipireni/vognezakhisna-farba-dlya-dereva-fireproof-coating.html>.

148. Ринок вогнезахисних покриттів для деревини: аналітичний огляд 2026. Market Research Future. <https://www.marketresearchfuture.com/reports/fire-stopping-material-market-10846>

Список публікацій здобувача

Публікації

Основні результати дисертаційного дослідження викладено в 5 наукових публікаціях, у т.ч.:

Статті у міжнародних наукових виданнях і тих, що входять до міжнародних наукометричних баз (МНБ):

1. Balaniuk V. M., Slobodian V. I., & **Pikus, V. S.** (2025). Аналіз засобів поверхневого вогнезахисту для деревини. *Пожежна безпека*, 47, 5-13. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.01> **Категорія Б.** Збір та аналіз даних, формування задач, виклад основного матеріалу, обробка результатів.

2. Баланюк, В.М, & **Пикус, В.С.**, (2026). Механізм та методологія розроблення полімерної системи на основі аміноформальдегідних смол, для вогнезахисту деревини. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 361(1), 549-556. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-76>.

Категорія Б. Провів аналіз даних, формування задач, підготовка та аналіз матеріалів, виклад основного матеріалу, обробка результатів.

3. Баланюк, В.М, & **Пикус, В.С.**, (2026). Дослідження ефективності комплексної полімерної вогнезахисної системи на основі аміноформальдегідних смол. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 363(2), 118-124. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-15> **Категорія Б.**

Систематизував сучасний стан у сфері вогнезахисту деревини; брав участь у розробленні складу антипіренової суміші «АМОК-1» і провів оптимізацію концентрацій компонентів; виконав комплекс вогневих випробувань за ГОСТ 16363-98, ДСТУ 9330:2025, ДСТУ 8829:2019 і ДБН В.1.1-7-2016; проаналізував мікроструктуру спученого захисного шару.

4. Баланюк, В., Пикус, В., Гарасим'юк, О., Кудринська, К., Пастухов, П., та Копистинський, Ю. (2026). Визначення закономірностей зниження горючості деревини з урахуванням процесів горіння та термоокислювальної деструкції. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 2 (10 (140), 49–60. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.358178>. Видання входить до МНБ – Scopus. Провів підготовку експериментальних зразків, провів випробування, аналіз даних, формування висновків.

Матеріали конференцій:

5. Товщина піролізного шару деревини при вогнезахисті антипіреновою композицією комбінованої дії – Володимир БАЛАНЮК, Юрій КОПИСТИНСЬКИЙ, Василь СЛОБОДЯН, Остап ІВАЩИШИН, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Віктор ПИКУС, НВЦ «Євростандарт», Олександр ГАРАСИМ'ЮК, Головне управління ДСНС України у м. Києві. Цивільний захист в умовах війни : збірник тез доповідей II Міжнародної науковопрактичної конференції, м. Львів, 15 квітня 2026 року. Львів: ЛДУБЖД, 2026. 395 с.

«Затверджую»

ФОП «Величко С. М.»


Стефанія ВЕЛИЧКО

« 15 » квітня 2020 р.

АКТ

Впровадження результатів дисертаційної роботи
Підвищення ефективності вогнезахисту деревини шляхом її просочування
вогнезахисної суміші комбінованої дії для деревини та целюлозовмісних
матеріалів.

Віктора ПИКУСА

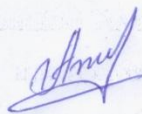
Комісія в складі: голови комісії – Степан КОРИЛЯК член
комісії – Артур КОЛОДІЙ склали акт про те, що виготовлено за
результатами дисертаційної роботи Віктора ПИКУСА, Антипіреновою
вогнезахисною композицією АМОК-1 було оброблено дерев'яні конструкції
горища (крокви, лаги) продуктового магазину площею 120 м² ФОП «Величко
С. М.» за адресою: Львівська обл., Львівський р-н, місто Городок, вул. Івана
Франка, 17

Голова комісії:



Степан КОРИЛЯК

Член комісії:



Артур КОЛОДІЙ

Додаток Б

«Затверджую»

Директор ТОВ «КОМПАНІЯ „ВСЕСВІТ КОМФОРТУ“»


Олександр КОВАЛЬ

« 15 » квітня 2020 р.



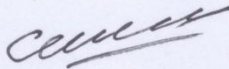
АКТ

Впровадження результатів дисертаційної роботи
Підвищення ефективності вогнезахисту деревини шляхом її просочування
вогнезахисної суміші комбінованої дії для деревини та целюлозовмісних
матеріалів.

Віктора ПИКУСА

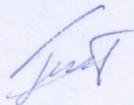
Комісія в складі: голови комісії – Степан СВОРІНЬ член
комісії – Тарас Голота склали акт про те, що виготовлено за
результатами дисертаційної роботи Віктора ПИКУСА, Антипіреновою
вогнезахисною композицією АМОК-1 було оброблено дерев'яні конструкції
горища (крокви, лаги) столярного цеху площею 120 м² ТОВ «АНВІТ» за
адресою: Львівська обл., Львівський р-н, село Бартатів, вул. Верхня 21

Голова комісії:



Степан СВОРІНЬ

Член комісії:



Інженер

Тарас ГОЛОТА

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
Науково-дослідна лабораторія пожежної безпеки
Навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки

Свідоцтво про атестацію № РЛ 032/25 чинне до 17 червня 2029 р.
Ліцензія ДДПБ МНС України серія АГ № 506341 від 11.02.2011 р.

Назва лабораторії: Науково-дослідна лабораторія пожежної та техногенної безпеки навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.

Адреса: м. Львів, вул. Каспарівська, 35.

МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ: Науково-дослідна лабораторія пожежної безпеки ІННІ ПтаГБ ЛДУ БЖД.

Адреса: м. Львів, вул. Каспарівська, 35.

ЗАМОВНИК ВИПРОБУВАНЬ: **ПРОТОКОЛ № 04/318/ВДК(01)26**

випробувань згідно з ДСТУ 9330:2025 з визначення
вогнезахисних властивостей розробленої
просочувальної антипіренової вогнезахисної композиції для деревини «АМОК-1»


ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ: Розроблена просочувальна антипіренова вогнезахисна композиція АМОК-1.

ПРАКТИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ: Просочувальну антипіренову вогнезахисну композицію АМОК-1 розроблено та виготовлено Замовником випробування. Підготовка зразків для випробування проведена Замовником під наглядом представників НДІ ПБ.

Водяність деревини (сосна) перед нанесенням просочувальної антипіренової вогнезахисної композиції АМОК-1 становила 87%. Нанесення здійснювали способом поверхневого просочування шляхом нанесення робочого розчину пензлем за два рази з 10-хвилинною просушкою зразків перед наступним нанесенням.

Середня втрата робочого розчину просочувальної антипіренової вогнезахисної композиції АМОК-1 при нанесенні на зразки деревини (сосна) становила 227,5 г/м² (в перерахунку на суку вміст 104,8 г/м²).

ВИПРОБУВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ: Для випробування використовувалась установка згідно ДСТУ 9330:2025 та засоби вимірювальної техніки, які наведено в таблиці 1.

ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ
НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ
ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ
№ 04/318/ВДК від "06" "02" 2026 р.
Всього 4 арк.
Підпис 

2026

ПРОТОКОЛ № 04/318/ВДК(01)26

випробувань згідно з ДСТУ 9330:2025 з визначення вогнезахисних властивостей розробленої просочувальної антипіренової вогнезахисної композиції для деревини «АМОК-1»

Дата проведення випробувань: 06.02.2026 р.	Умови проведення випробувань:
	- температура повітря 18 °С
	- атмосферний тиск 98,5 кПа
	- відносна вологість 60 %

Назва лабораторії: Науково-дослідна лабораторія пожежної та техногенної безпеки навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.
Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ: Науково-дослідна лабораторія пожежної безпеки ННІ ПтаТБ ЛДУ БЖД.
Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

ЗАМОВНИК ВИПРОБУВАНЬ: Аспірант Віктор ПИКУС в рамках проведення дисертаційних досліджень, при написанні Дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 21.06.02 – Пожежна безпека (261 – Пожежна безпека). Львівський державний університет безпеки життєдіяльності ДСНС України, Львів, 2026 рік на тему: Підвищення ефективності вогнезахисту деревини шляхом її просочування вогнезахисної суміші комбінованої дії для деревини та целулозовмісних матеріалів.

ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ: Розроблена просочувальна антипіренова вогнезахисна композиція АМОК-1.

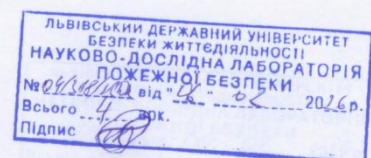
ЗРАЗКИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ: Просочувальну антипіренову вогнезахисну композицію АМОК-1 розроблено та надано Замовником випробування. Підготовка зразків для випробування проведено Замовником під наглядом представників НДЛ ПБ.

Вологість деревини (сосна) перед нанесенням просочувальної антипіренової вогнезахисної композиції АМОК-1 становила 8%. Нанесення здійснювали способом поверхневого просочування шляхом нанесення робочого розчину пензлем за два рази з 8-годинною просушкою зразків перед наступним нанесенням

Середня витрата робочого розчину просочувальної антипіренової вогнезахисної композиції АМОК-1 при нанесенні на зразки деревини (сосна) становила 277,5 г/м² (в перерахунку на суху рречовину 108,8 г/м²)

ВИПРОБУВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ:

Для випробування використовувалась установка згідно ДСТУ 9330:2025 та засоби вимірювальної техніки, які наведено в таблиці 1.



Таблиця 1 - Засоби вимірювальної техніки

№ п/п	Найменування приладу чи пристрою	Заводський номер	Границя вимірювання	Клас точності або похибка вимірювання
1	Прилад ОТМ	б/н	Від 20 до 800 °С	-
2	Регулятор-вимірювач РТ 0102	05-387	Від 0 до 1200 °С	± 2 °С
3	Термопара ТХА		Від 0 до 1200 °С	
4	Секундомір СОП	8625	Від 0 до 3600 с	Клас точн. 2
5	Ваги ВТУ 210/ СЗ	1826	Від 0 до 210 г	Кл. точн. 3
6	Лінійка вимірювальна	б/н	Від 0 до 1000 мм	±0,5 мм
7	Штангенциркуль ШЦ-I-200-0,02	0805174	Від 0 до 200 мм	± 0,02 мм

МЕТОД ВИПРОБУВАННЯ: Суть методу випробування згідно з ДСТУ 9330:2025 *РЕЧОВИНИ ВОГНЕЗАХИСНІ ДЛЯ ДЕРЕВИНИ. Метод визначення вогнезахисних властивостей* полягає у впливі протягом 2 хвилин полум'я пальника з заданими параметрами (початкова температура летких продуктів згорання на виході з керамічної реакційної камери прямокутної форми заввишки (300 ± 2) мм, яка має в перерізі квадрат із зовнішньою стороною (120 ± 2) мм і товщиною стінок (16 ± 2) мм становить $200 \text{ °C} + 5 \text{ °C}$) на зразок вогнезахисної деревини, який розташовано в керамічній трубі установки та визначенні втрати маси зразка деревини після вогневих випробувань. Випробуванням піддають 10 зразків деревини.

Якщо втрата маси зразків після випробувань становить більше 9%, засіб не забезпечує вогнезахист деревини.

Втрату маси зразка, який піддають вогневим випробуванням, розраховують за формулою:

$$P_1 = (m_1 - m_2) \times 100 / m_1, \quad (1)$$

де:

P_1 - втрата маси зразка, %;

m_1 - маса зразка до випробувань, г;

m_2 - маса зразка після випробувань, г.

Витрату вогнезахисного засобу в розрахунку на суху речовину визначають за формулою:

$$R = (m_1 - m_0) / F, \quad (2)$$

де:

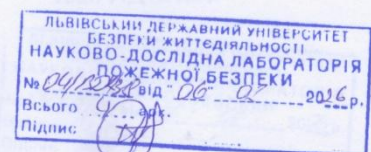
R - витрата вогнезахисного засобу (вогнезахисне покриття) в розрахунку на суху речовину, г/м²;

F - площа поверхні зразка, м²;

m_1 - маса зразка до проведення випробувань, г;

m_0 - маса зразка до нанесення покриття, г.

Результати випробування: Результати випробування наведено у таблиці 2.



Таблиця 2 - Результати випробувань згідно ДСТУ 9330:2025

№ зразка для випробування	Маса зразка, г			Витрата вогнезахисного засобу, г/м ²	Поглинання вогнезахисного засобу в розрахунку на суху речовину (R _i), г/м ²	Втрата маси зразка (P) після випробувань, %	Максимальна температура газоподібних продуктів	Тривалість самостійного горіння, с
	До просочення (m ₀)	Перед випробування (m ₁)	Після випробування (m ₂)					
1	138,5	141,7	133,4	261,4	104,6	5,9	232	0
2	138,4	141,5	133,3	294,1	101,3	5,8	228	0
3	137,9	141,2	132,8	268,0	107,8	5,9	234	0
4	138,8	142,1	134,5	277,8	107,8	5,3	245	0
5	139,4	142,4	133,1	271,2	98,0	6,5	231	0
6	137,8	141,2	133,7	264,7	111,1	5,3	228	0
7	138,1	141,3	132,6	277,8	104,6	6,2	264	0
8	138,3	142,2	135,4	307,2	127,5	4,8	237	0
9	137,9	141,2	132,7	268,0	107,8	6,0	247	0
10	138,2	141,8	133,4	284,3	117,6	5,9	234	0
Середнє значення				277,5	108,8	5,8	238	0

Висновок: За результатами випробувань згідно з ДСТУ 9330:2025 середнє значення втрати маси зразків вогнезахисної деревини, округлене до цілого числа, становить 6 %. Середнє значення поглинання зразками розробленої просочувальної антипіренової вогнезахисної композиції для деревини АМОК-1 становило 277,5 г/м² (в перерахунку на суху речовину 108,8г/м²). Просочувальна антипіренова вогнезахисна композиція для деревини «АМОК-1», яка розроблена при написанні дисертаційної роботи, відповідає вимогам п. 7.4 ДСТУ 9330:2025.

Примітка:

1. Протокол №04/318/ВДК(01)26 стосується лише зразків, що були оброблені розробленою просочувальною антипіреновою вогнезахисною композицією АМОК-1 наданою Замовником та піддані випробуванням для отримання результатів при написанні Дисертаційної роботи.

2. Протокол є цілісним документом і може бути передрукований тільки в повному обсязі на підставі письмової згоди Науково-дослідної лабораторії пожежної безпеки ННІ ПтаТЬ ЛДУБЖД.

3. Всього листів 4.

Науковий співробітник науково-дослідної лабораторії пожежної безпеки
майор служби цивільного захисту

Павло ПАСТУХОВ

Аспірант

Віктор ПИКУС

Начальник науково-дослідної лабораторії пожежної безпеки
майор служби цивільного захисту

Іван АДЛЬФ

