https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-15
УДК 614.841

БАЛАНЮК ВОЛОДИМИР
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
https://orcid.org/0000-0003-0853-4229
e-mail: Bagr9111@Gmail.com
ПИКУС ВІКТОР
ТзОВ Євростандарт
https://orcid.org/0000-0002-8850-9068
e-mail: v.pykus@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЛЕКСНОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ВОГНЕЗАХИСНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ АМІНОФОРМАЛЬДЕГІДНИХ СМОЛ

Забезпечення належного рівня вогнезахисту будівельних матеріалів, особливо деревини, є актуальним завданням пожежної безпеки через їх високу горючість. Перспективним напрямом є застосування комплексних полімерних антипіренових систем на основі амінoформальдегідних смол. Модифікація ортофосфорною кислотою сприяє формуванню термічно стабільного вуглецевого шару та зменшенню швидкості деструкції. Додавання природних полімерів, зокрема крохмалю, покращує плівкоутворення й підвищує екологічність композиції.

Ключові слова: *інтумесцентна вогнезахисна композиція, вогнезахист деревини, амінoформальдегідна смола, каталізатор на основі фосфорної кислоти, термічна деструкція та карбонізація, стійкість до поширення полум'я.*

BALANYUK VOLODYMYR, PYKUS VICTOR
Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF A COMPLEX POLYMER FLAME-RETARDANT SYSTEM BASED ON AMINO-FORMALDEHYDE RESINS

Ensuring an adequate level of fire protection for building structures and materials is one of the priority areas of fire safety research. Wooden materials pose a particular hazard under fire conditions due to their high combustibility and rapid flame spread. In this regard, the development of effective fire-retardant agents capable of increasing the fire resistance limit of materials and reducing the intensity of combustion remains highly relevant.

One of the promising directions in the development of fire protection systems is the use of complex polymer-based flame-retardant compositions, particularly those based on amino-formaldehyde resins. These materials are characterized by high adhesion capacity, the ability to form protective coatings, and relative technological accessibility. Modification of such resins with orthophosphoric acid ensures the formation of thermally stable phosphorus-containing structures, which intensify char-forming processes and reduce the rate of thermal degradation of the polymer matrix. The additional incorporation of natural polymers, in particular starch, contributes to the improvement of the film-forming characteristics of the composition and enhances its environmental safety in accordance with current regulatory and technical requirements.

As a result of experimental studies, it was established that the developed complex polymer flame-retardant composition AMOK-1 provides a significant increase in the fire resistance of wood. According to tests performed in accordance with DSTU 9330:2025, the average mass loss of the samples was 5.93%, which corresponds to Group 1 of fire-protection effectiveness. The obtained indicators demonstrate the composition's high ability to reduce the intensity of thermal degradation and to slow down the combustion processes.

Investigation of the mechanism of action showed that the fire-protective effect is achieved through the synergistic interaction of an acid catalyst, a carbon donor, and gas-forming components, which ensure dehydration, carbonization, and intumescence processes. The formation of a spatially cross-linked amino-formaldehyde polymer matrix contributes to increased thermal stability and mechanical integrity of the protective layer.

Keywords: *Intumescent flame-retardant composition, wood fire protection, amino-formaldehyde resin, phosphoric acid-based catalyst, thermal degradation and carbonization, flame spread resistance.*

Стаття надійшла до редакції / Received 15.01.2026
Прийнята до друку / Accepted 11.02.2026
Опубліковано / Published 26.03.2026

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons CC-BY 4.0

© Баланюк Володимир, Пикус Віктор

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Забезпечення належного рівня пожежної безпеки будівель і споруд залишається одним із ключових напрямів сучасних наукових досліджень у галузі цивільного захисту. Особливої уваги потребують дерев'яні та целюлозовмісні матеріали, які характеризуються підвищеною горючістю, здатністю до інтенсивного поширення полум'я та значним тепловиділенням під час горіння. У зв'язку з цим актуальним є створення ефективних вогнезахисних композицій, що забезпечують формування теплоізоляційного шару та зниження швидкості термічної деструкції матеріалу [1]. Перспективним напрямом є застосування інтумесцентних полімерних систем на основі амінoформальдегідних смол, модифікованих фосфоровмісними сполуками та природними полімерними добавками. Такі композиції поєднують хімічний і фізичний механізми вогнезахисту, забезпечуючи синергічний ефект під час термічного впливу [2]. У роботі представлено результати експериментальних досліджень ефективності розробленої комплексної полімерної антипіренової системи яка складається з ортофосфорної кислоти, крохмалю (попередньо набухлого у гарячій воді) формаліну (2,5% розчину 60% формальдегіду) диціандіаміду, карбаміду, бікарбонату калію та полівінілацетатної емульсії, далі «Амок-1». Оцінено вплив композиції на показники вогнезахисної ефективності та межу поширення вогню оброблених зразків деревини.

Аналіз досліджень та публікацій

Проблематика підвищення вогнестійкості деревини та інших целюлозовмісних матеріалів широко висвітлена у працях вітчизняних і зарубіжних науковців, зокрема в контексті застосування інтумесцентних покриттів та полімерних антипіренових систем [1-5]. Значну увагу приділено механізмам термічної деструкції та карбонізації, що лежать в основі формування теплоізолювального спіненого шару. У наукових публікаціях відзначається ефективність фосфоровмісних каталізаторів і модифікаторів, які сприяють інтенсифікації процесів дегідратації та утворенню стабільного вуглецевого шару. Окремі дослідження присвячені використанню аміноформальдегідних смол, як плівкоутворювальної основи, що забезпечує адгезію покриття та рівномірний розподіл активних компонентів у структурі матеріалу. Водночас аналіз літератури [5-9] свідчить про недостатню увагу до комплексної оцінки фізико-механічних і вогнезахисних показників таких систем у реальних умовах теплового впливу. Це зумовлює актуальність подальших експериментальних досліджень ефективності комплексних полімерних вогнезахисних систем на основі аміноформальдегідних смол.

Формулювання цілей статті

Метою статті є експериментальне дослідження ефективності комплексної полімерної вогнезахисної системи на основі аміноформальдегідних смол. Для досягнення поставленої мети необхідно визначити вплив складу композиції на процеси термічної деструкції та карбонізації, оцінити показники поширення полум'я й втрати маси зразків під дією високих температур.

Виклад основного матеріалу

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.

Вихідні компоненти для створення антипіренової вогнезахисної композиції яка складається ортофосфорної кислоти (60%), крохмалю (попередньо набухлого у гарячій воді), формаліну (2,5% розчину 60% формальдегіду), диціандиаміду (25%), карбаміду (7%), бікарбонату калію (2%) та полівінілацетатної емульсії (85–95%) – від 5% до 25%. При цьому якщо вказати на ймовірну роль кожного компоненту в рецептурі то необхідно зазначити, що ортофосфатна 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 диціандиаміду 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 [3]. Щодо розчину формаліну, то він 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. Диціандиамід сам по собі є інгібітором горіння та до тогож активним азотовмісним компонентом, який бере участь у реакціях поліконденсації з формальдегідом, утворюючи меламіно-подібні полімерні структури. Під час термічного розкладу диціандиамід 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 [4]. 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 повітря та тепла до поверхні деревини [5]. Таким чином у результаті змішування

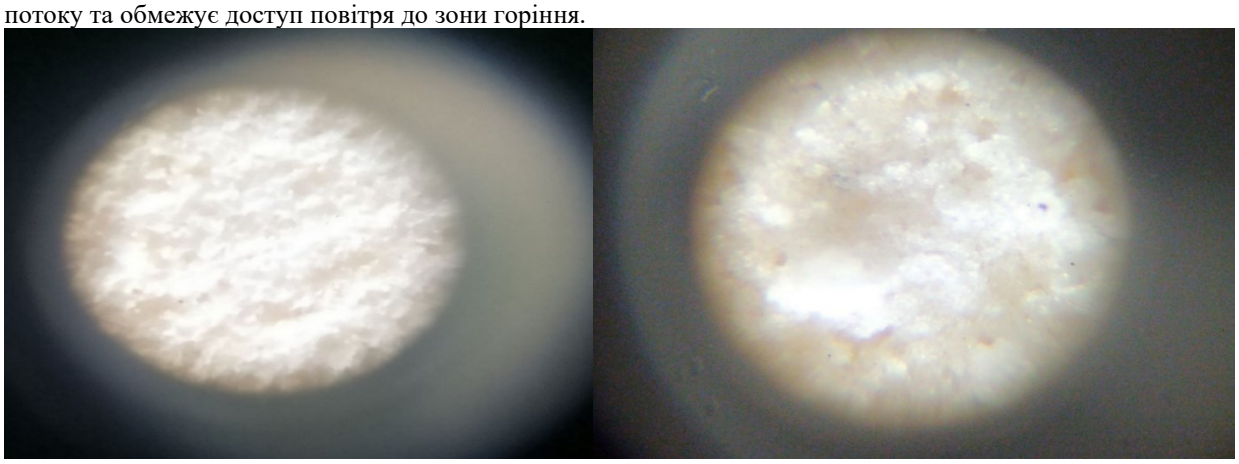
цих компонентів утвориться комплексна полімерна система на основі аміноформальдегідних смол (карбамідо- та диціандиамідоформальдегідних), модифікована ортофосфорною кислотою та крохмалем.

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 диціандиамідом та конденсаційними реакціями між карбамідом і диціандиамідом у кислому середовищі. Реакція взаємодії крохмалю з ортофосфатною кислотою супроводжується частковим кислотним гідролізом полісахаридного ланцюга з утворенням декстринів і низькомолекулярних вуглеводів. Ймовірно 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 [6]. Взаємодія формальдегіду з карбамідом і диціандиамідом призводить до реакцій поліконденсації з утворенням аміноформальдегідних смол різної просторової будови. Утворення метиленових та метиленефірних звязків 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. Конденсаційні реакції між карбамідом і диціандиамідом 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 інтумісценції. Утворений пористий вуглистий шар характеризується низькою теплопровідністю та ефективно зменшує тепловий потік до поверхні захищуваного матеріалу [7]. Роль бікарбонату калію в реакційній системі полягає у частковій нейтралізації ортофосфатної кислоти та регулюванні кислотно-лужного балансу композиції. Як було вказано вище 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 [8,9].

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 [10-14]. Характерною особливістю композиції є пастоподібний стан при низьких температурах та різке спучування при нагріванні з утворенням пористого вуглецевого «пінококсу», об'єм якого зростає у 10–25 разів від початкового. Композиція АМОК-1 є багатокомпонентною інтумесцентною системою, що поєднує кислоту, карбон, газоутворювальні компоненти та регулятору кислотності в одній рецептурі.

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. 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, а також ефективному заповненні нерівностей, щілин та пустот в конструкціях з деревини, що дає можливість використовувати її в якості вогнезахисної шпаклівки або замазки. Під час нагрівання або дії відкритого полум'я на композицію реалізується багатостадійний механізм інтенсуючого захисту. Ортофосфатна 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 диціандиаміду 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 повітря до зони горіння.



а) б)

Рис. 1. Поверхнева структура вогнезахисного покриття АМОК-1.
а – Збільшення поверхні в 64 разів. б – Збільшення поверхні в 120 разів.

Таким чином, вогнезахисна дія композиції АМОК-1 утворюється за рахунок синергічної взаємодії кислотного, вуглецевого та газоутворювального компонентів. Формування пінококсового 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 деревини та целюлозовмісних матеріалів.

Поверхня під мікроскопом, має характерні риси вогнезахисного покриття на основі крохмалю, фосфатів та аміноформальдегідних смол. Білий колір та волокнисто-кристалічна текстура (Рис. 2 поз а.) свідчать про наявність гелевої матриці, що утворилася при охолодженні. Це є поєднання ретроградуваного крохмалю та метильних похідних карбаміду/диціандиаміду. Гранулярні та пластинчасті ділянки — це агрегати калійних фосфатів, які стабілізують структуру та діють як антипірени. Волокнисті включення утворюються завдяки зшиванню аміноформальдегідних смол, 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 утворюється композитний матеріал, при цьому можна сказати що крохмаль утворив гель, в котрому фосфати забезпечили кристалізацію у вигляді гранул, наявність аміноформальдегідних смол дали волокнисту сітку а газоутворювачі забезпечили залишили утворення мікропор. Усе це разом створює багатокомпонентну матрицю, яка при нагріванні перетвориться на спінений пінококс: пори розширяться, пінококс утворить чорний бар'єр, а смоли стабілізують структуру. При цьому крохмальна гелева матриця формує основу, частково утримує воду, а при нагріванні дегідратується та утворює чорний вуглистий чар 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. Аміноформальдегідні смоли обумовлюють утворення розгорнутої волокнистої сітки, яка підвищує в'язкість при нагріванні та забезпечує зшивання полімерної матриці що відповідно забезпечує механічну міцність піно коксу. Також необхідно повторитись що газоутворювачі (карбамід, ДСДА, $KHCO_3$) забезпечують при нагріванні мікропор, пустоти у структурі виділяючи при нагріванні гази CO_2, NH_3, H_2O, що призводить до інтенсивного спінення основи та збільшення об'єму 10–25 разів. У ході дослідження проводився ряд експериментів на визначення ефективності вогнезахисного засобу АМОК-1. Зокрема, на визначення групи вогнезахисної ефективності згідно з ГОСТ 16363-98 [11]. Дві партії зразків оброблялися згідно з ГОСТ 20022.6-93. Результати дослідження винесені в таблицях нижче.

Таблиця 1

Результати випробування зразків №1 на визначення групи вогнезахисної ефективності згідно з ГОСТ 16363-98

№ Зразка для випробування	Маса зразка, г			Поглинання вогнезахисного засобу, г/м²	Поглинання вогнезахисного засобу в розрахунку на суху речовину (R_1), г/м²	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

Таблиця 2

Результати випробування зразків №2 на визначення групи вогнезахисної ефективності згідно з ГОСТ 16363-98

№ зразка для випробування	Маса зразка, г			Поглинання вогнезахисного засобу, г/м²	Поглинання вогнезахисного засобу в розрахунку на суху речовину (R_1), г/м²	Втрата маси зразка г.	Втрата 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

З результатів дослідження можна виділити, що середньостатистична втрата маси зразків №1 становить 5,0%, зразків №2– 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. Вигляд зразків до початку та після випробувань показано га рисунку 2.

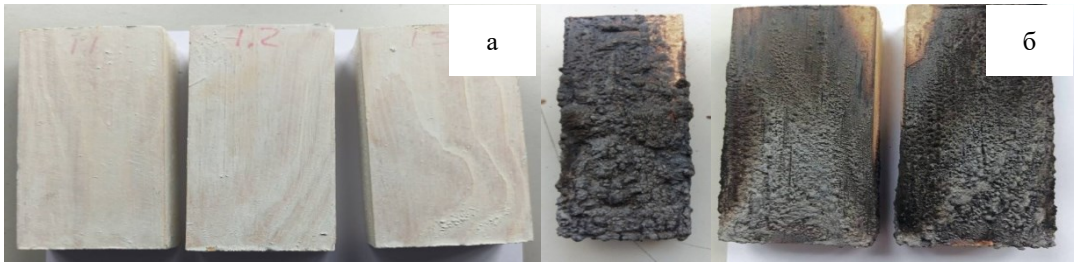


Рис. 2 – Вигляд зразків до початку випробування на визначення групи вогнезахисної ефективності до (а) після (б)

Далі було проведено серію дослідів на визначення групи вогнезахисної ефективності АМОК-1 згідно з ДСТУ 9330:2025 [13]. Так само як і в попередньому досліді було підготовлено дві партії зразків по 3 штуки з двома шарами покриття та з одним шаром покриття. Результати досліджень наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати випробування зразків партії №1 з двома шарами покриття АМОК-1 на визначення групи вогнезахисної ефективності згідно з ДСТУ 9330:2025 [13]

Зразки №1

№ зразка для випробування	Маса зразка, г			Поглинання вогнезахисного засобу, г/м^2	Поглинання вогнезахисного засобу в розрахунку на суху речовину (R_1), г/м^2	Втрата маси зразка г.	Втрата маси зразка (Р) після випробувань. %	Максимальна температура газоподібних продуктів горіння С	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		

Таблиця 4

Результати випробування зразків партії №2 з одним шаром покриття АМОК-1 на визначення групи вогнезахисної ефективності згідно з ДСТУ 9330:2025 [13]

№ зразка для випробування	Маса зразка, г			Поглинання вогнезахисного засобу, г/м^2	Поглинання вогнезахисного засобу в розрахунку на суху речовину (R_1), г/м^2	Втрата маси зразка г.	Втрата маси зразка (Р) після випробувань. %	Максимальна температура газоподібних продуктів горіння С	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	131,7	135,1	126,1	312,7	112,7	9,0	6,7	234	0
Середнє значення				295,5	104,8	8,5	6,0		

Як видно з результатів досліджень згідно з ДСТУ 9330:2025, композиція АМОК-1 володіє хорошими вогнезахисними характеристиками навіть при одношаровому нанесені на поверхню деревини, при цьому втрата маси деревини становить в середньому 6 %. При цьому різниця при покритті одним та двома шарами є незначною та відрізняється в сторону покращення до 1 %. Зазначена композиція володіє можливістю нанесення на поверхню у всіх геометричних положеннях не стікаючи з неї та ефективно закріплюючись на ній.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що розроблена комплексна полімерна антипіренова композиція «АМОК-1» забезпечує суттєве підвищення вогнестійкості деревини. За результатами випробувань згідно з ДСТУ 9330:2025 середнє значення втрати маси зразків становило 5,93 %,

що відповідає 1 групі вогнезахисної ефективності. Отримані показники свідчать про високу здатність композиції знижувати інтенсивність термічного розкладу та уповільнювати процеси горіння.

Дослідження механізму дії показало, що вогнезахисний ефект досягається завдяки синергічній взаємодії кислотного каталізатора, вуглецевого донора та газоутворювальних компонентів, які забезпечують процеси дегідратації, карбонізації та інтумесценції. Формування просторово зшитої аміноформальдегідної полімерної матриці сприяє підвищенню термостійкості та механічної цілісності захисного шару.

Таким чином, композиція «АМОК-1» є ефективною інтумесцентною системою комбінованої дії та може бути рекомендована для вогнезахисту дерев'яних і целюлозовмісних матеріалів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію рецептури, оцінку довговічності покриття та визначення експлуатаційних характеристик у реальних умовах застосування.

Література

1. 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.
2. 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.
3. 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. – ___ с.
4. 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.
5. 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
6. Tsapko Y., Tsapko A., Zhartovskyi S., Likhnyovskyi R., Kravchenko M., Lialina N., Berezovskyi Y., Kaveryn K., Sarapin Y. Establishing fire protection patterns in wood using impregnation compositions from inorganic salts // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Vol. 5, № 10 (131). – P. 62–70. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.313423.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Ma X.X., Wu Y.Z., Zhu H.L. The fire-retardant properties of the melamine-modified urea–formaldehyde resins mixed with ammonium polyphosphate // Journal of Wood Science. – 2013. – Vol. 59. – P. 419–425. DOI: 10.1007/s10086-013-1350-6.
11. ГОСТ 16363-98 Засоби вогнезахисні для деревини. Методи визначення вогнезахисних властивостей. – Чинний від 1999-07-01.
12. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. – Київ : Мінрегіон України, 2016.
13. ДСТУ 9330:2025 Речовини вогнезахисні для деревини. Метод визначення вогнезахисних властивостей. – Чинний від 2025-01-01.
14. 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

References

1. 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. – S. 5–13. DOI: 10.32447/20786662.47.2025.01.
2. 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.
3. Haiduk M.O. Improving the fire protection efficiency of wooden building structures using impregnating fire-bioprotective substances when replacing fire-retardant agents : dys. … doktora filosofii : 261 – Pozhezhna bezpeka / Lvivskyi derzhavnyi universytet bezpeky zhyttiediialnosti. – Lviv, 2025. – ___ s.
4. 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.
5. 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

6. Tsapko Y., Tsapko A., Zhartovskyi S., Likhnyovskyi R., Kravchenko M., Lialina N., Berezovskyi Y., Kaveryn K., Sarapin Y. Establishing fire protection patterns in wood using impregnation compositions from inorganic salts // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Vol. 5, № 10 (131). – P. 62–70. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.313423.

7. Likhnyovskyi R. ta in. 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.

8. Tsapko Y. ta in. 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.

9. 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.

10. Ma X.X., Wu Y.Z., Zhu H.L. The fire-retardant properties of the melamine-modified urea–formaldehyde resins mixed with ammonium polyphosphate // Journal of Wood Science. – 2013. – Vol. 59. – P. 419–425. DOI: 10.1007/s10086-013-1350-6.

11. HOST 16363-98 Zasoby vohnezakhysni dlia derevyny. Metody vyznachennia vohnezakhysnykh vlastyvostei. – Chynnyi vid 1999-07-01.

12. DBN V.1.1-7:2016 Pozhezhna bezpeka obiektiv budivnytstva. Zahalni vymohy. – Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2016.

13. DSTU 9330:2025 Rechovyny vohnezakhysni dlia derevyny. Metod vyznachennia vohnezakhysnykh vlastyvostei. – Chynnyi vid 2025-01-01.,

14. Balanyuk, V., & Pikus, V. (2026). Mekhanizm ta metodolohiia rozroblennia polimernoi systemy na osnovi aminoformal'dehidnykh smol, dlia vohnezakhystu derevyny. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 361(1), 549–556. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-76