

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2.10>

УДК 678.7:
661.1:615.4

¹ВАХІТОВ Р. А., ²КАЛАФАТ К. В., ²ТАРАН Н. А.,
^{1,2}БЕССАРАБОВ В. І., ²ВАХІТОВА Л. М.

¹ Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

² Інститут фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України, Київ, Україна

ВИБІР ПОЛІМЕРІВ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В ПРОМИСЛОВИХ ВОГНЕЗАХИСНИХ РЕАКТИВНИХ ПОКРИТТЯХ

Мета. Дослідження впливу структури полімерів на вогнезахисну ефективність інтумесцентних систем поліфосфат амонію/меламін/пентаеритрит для створення конкурентоздатних промислових реактивних покриттів.

Методика. За модельну інтумесцентну систему обрано вогнезахисну суміш поліфосфат амонію/меламін/пентаеритрит/полімер. Як полімерну складову використовували вінілацетатні, акрилатні, стиролакрилатні водні дисперсії та розчини їх аналогів в органічних розчинниках. Об'ємний коефіцієнт спучення (K , см³/г) та масу коксового залишку (m , %) інтумесцентної композиції визначали після витримки зразків інтумесцентної системи при температурі 200–800 °С. Для ідентифікації продуктів термолізу інтумесцентних систем використано метод ІЧ-спектроскопії. Визначення вогнезахисної ефективності інтумесцентних покриттів проводили в міні-печі в умовах стандартної пожежі та за ДСТУ Б В.1.1-14:2007 і ДСТУ Б В.1.1-13:2007.

Результати. В дослідженні шляхом вивчення впливу природи полімерної складової надано практичні рекомендації, корисні для розробки рецептури інтумесцентного покриття з доведеною межею вогнестійкості до R150. Показано, що застосування різних полімерів для вогнезахисних покриттів є одним із шляхів диференційної розробки засобів вогнезахисту, орієнтованих на заданий клас вогнестійкості. Продемонстровано, що для забезпечення низької межі вогнестійкості (30 хв) доцільно застосовувати акрилатні інтумесцентні покриття, наприклад, полімер Hydro Pliolite 211 для водно-дисперсійних фарб, або суміші полімерів Pliolite AC80 та Pliolite AC4 для органорозчинних фарб. Для більш високих значень вогнестійкості (60 хв та вище) ефективними є інтумесцентні покриття вінілацетатного типу (вінілацетат-етилен, вінілацетат-етилен-вінілверсатат) на основі водно-дисперсійних полімерів марки Vinapas, Mowilith або аналогічних полімерних матеріалів від інших виробників.

Наукова новизна. Показано, що важливим фактором підвищення вогнезахисної ефективності інтумесцентних систем є використання полімерів конкретної структури, які мають багатовіснечасте терморозкладання.

Практична значимість. Визначено оптимальні полімерні матеріали, які можуть бути застосовані при виробництві реактивних покриттів у промислових масштабах.

Ключові слова: вогнезахист; інтумесцентна система; поліфосфат амонію; меламін; пентаеритрит; меламін; вінілацетат; стиролакрилат.

Вступ. Застосування в будівництві сталевих та дерев'яних конструкцій і матеріалів можливо лише за умови, що вони забезпечують нормативний рівень пожежної безпеки та відповідають основним вимогам щодо збереження життя і здоров'я людей та рятувальників у разі виникнення пожежі [1, 2]. Основною стратегією підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій є оброблення засобами пасивного вогнезахисту для підвищення несучої здатності та цілісності [3, 4]. Інтумесцентні (реактивні) вогнезахисні системи (IFR) є найбільш вивченими в науковому плані, як у частині основних компонентів, так і допоміжних домішок, що збільшують вогнезахисну ефективність.

Відомо, що вогнезахисна інтумесцентна система складається з трьох основних складових, які мають усталені назви [3, 5, 6]:

- донор кислоти – зазвичай це сіль нелетучої неорганічної кислоти, наприклад, борної, сірчаної або фосфорної кислот, які виділяють кислоту при температурах вище 150 °С;

- карбонізуючий агент – вуглецева сполука з великою кількістю гідроксилів, яка зневоднюється під час реакцій етерифікації та карбонізації;

- газоутворювач – компонент, який під впливом тепла виділяє велику кількість негорючих речовин – газів, що утворюють піну з карбонізованого матеріалу на підкладці.

Цей набір компонентів IFR є коректним й може мати значні варіації щодо асортименту хімічних речовин [5, 7], якщо розглядати його як самостійну антипіренову суміш, основною функцією якої є зниження горючості полімерних, композитних чи інших матеріалів. Для випадків, коли IFR використовується у складі полімерного вогнезахисного покриття (IC), як четвертий невід’ємний компонент інтумесцентної системи слід розглядати полімер, що відіграє іноді критичну роль у значеннях вогнезахисної ефективності трійної системи донор кислоти/карбонізуючий агент/газоутворювач [8, 9–11]. Саме структура полімеру може бути відповідальною за забезпечення межі вогнестійкості сталевих конструкцій (R) вище 120 хв, підвищення стійкості до дії вологи та інших атмосферних факторів, підвищення екологічних характеристик вихідної інтумесцентної фарби та покриття протягом експлуатації. В той же час, інформація з наукових публікацій щодо залежності вогнезахисної ефективності реактивних покриттів від структури застосованого полімеру є несистематизованою та суперечливою [12–15].

Постановка завдання. Більшість наукових досліджень щодо впливу полімеру на інтумесцентний вогнезахист мають фундаментальну направленість щодо механізмів термічних перетворень, особливостей термічного розпаду полімерів у присутності компонентів інтумесцентної системи тощо [8, 10, 16]. Але отримані результати не дають прямих рекомендацій про прийнятність застосування того чи іншого полімеру для виробництва промислових засобів вогнезахисту. Тому дослідження з вибору оптимальних полімерів для інтумесцентних водних та органорозчинних композицій має конкретний практичний інтерес, пов’язаний як з виробництвом високоякісних вогнезахисних фарб, так і з мінімізацією витрат на вогнезахист конструкцій із металу та на сталеве будівництво у цілому.

Метою цього дослідження є вивчення впливу структури полімерів на вогнезахисну ефективність інтумесцентних систем поліфосфат амонію/меламін/пентаеритрит для створення конкурентоздатних промислових реактивних покриттів.

Матеріали та обладнання. У дослідженні використовували поліфосфат амонію (APP) II фази FR Cros 484 (Budenheim, Іспанія), Exolit AP 422 (Clariant, Німеччина), пентаеритрит (PE) мікронізований марки Charmor PM40 (Perstorp Holding AB, Швеція), меламін (MA) виробництва Borealis Agrolinz Melamine GmbH, Австрія, діоксид титану (TiO_2) марки Ti-Pure R-902 (DuPont, США). В табл. 1 наведено перелік полімерів, які були використані при виконанні експерименту.

Наноглини виробництва фірми BYK Additives & Instruments (Німеччина) представлені шаруватими силікатами Optigel WA (бентоніт $\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) та Garamite 7305 (модифікована бензалконієм суміш монтморилоніту – $[\text{M} \cdot n\text{H}_2\text{O}](\text{Al}_{4-x}\text{Mg}_x)\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$, і сепіоліту $\text{Mg}_4(\text{Si}_6\text{O}_{15})(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Для удосконалення якісних характеристик інтумесцентних фарб використовували диспергатори, піногасники фірм BYK Additives & Instruments (Німеччина) та Troy Corporation (США), як біоцид для водно-дисперсійних композицій використовували Mergal K14 від Troy Corporation (США). Як загусники були досліджені ефіри целюлози Bermocoll EBM (Nouryon, Німеччина) та HEUR-загусники типу Rheolate від Elementis (США).

Приготування композицій, визначення об’ємного коефіцієнта спучення, K ($\text{см}^3/\text{г}$), вогневі випробування за методом «пальника Бунзена», випробування у міні-печі в умовах «стандартної пожежі» здійснювали, як описано раніше [11].

Вогневі випробування інтумесцентних покриттів проводили згідно з процедурами, передбаченими ДСТУ В В.1.1-14:2007 (аналог EN 1365-4:1999) для колон та ДСТУ В В.1.1-13:2007 (аналог EN 1365-3:1999) для балок.

Результати дослідження. Для дослідження впливу полімеру на вогнезахисну ефективність інтумесцентного покриття було складено рецептури водних та органорозчинних композицій, які представлені у табл. 2. Як полімерна складова були використані полімери, які найбільш часто застосовуються в покриттях реактивного типу – співполімери вінілацетату, стирол-акрилату чи їх галогеновані похідні (табл. 1).

Таблиця 1

Перелік полімерних складових досліджених інтумесцентних систем

Хімічна структура співполімеру	Торгівельна назва	Скорочена назва	Розчинник	Виробник
Водні дисперсії полімеру				
Вінілацетат-етилен	Vinnapas® EZ 3010	EZ 3010	Вода	Wacker, США
Вінілацетат-етилен-вінілверсатат	Vinnapas® EZ 3112	EZ 3112	Вода	Wacker, США
Вінілацетат-етилен-вінілхлорид	Vinnapas® CEZ 3031	CEZ 3031	Вода	Wacker, США
Стирол-акрилат	Hydro Pliolite 211	H211	Вода	Omnova Solutions, США
Органорозчинні полімери				
Стирол-акрилат	Ньютонівський Pliolite AC80	AC80	Ксилол	Omnova Solutions, США
Стирол-акрилат	Неньютонівський Pliolite AC4	AC4	Ксилол	Omnova Solutions, США
Вінілхлорид-вінілацетат-вініловий спирт	VAH-N VAGH	VAGH	Ксилол/метилетилкетон	Dow UCAR, США
Вінілхлорид-вінілацетат	VYHH	VYHH	Ксилол/метилетилкетон	Dow UCAR, США

Вогнезахисна ефективність отриманих композицій була досліджена згідно з алгоритмом, що представлений на рис. 1: визначення коефіцієнту спучення (K_1) у термошафі при 340 °С; дослідження спучення в умовах пальника Бунзена; визначення межі вогнестійкості (R_1) та спучення (K_2) в міні-печі; проведення натурних вогневих випробувань за ДСТУ В В.1.1-14:2007 та ДСТУ В В.1.1-13:2007. (R_2), визначення лінійного коефіцієнту спучення (K_1).

Таблиця 2

Склад компонентів (%) в інтумесцентній фарбі

Тип композиції	Тип композиції	Тип композиції
Полімер	10 ¹⁾	10
APP	25	26
MA	8	10
PE	10	10
TiO ₂	12	9
Домішки ²⁾	5	5
Розчинник	30	30

¹⁾ Вміст чистого полімеру. ²⁾ Диспергатор, загущувач, піногасник.



Рис. 1. Алгоритм випробувань вогнезахисної ефективності у процесі розробки рецептури інтумесцентного покриття

В табл. 3 наведені результати цих досліджень для покриттів з товщиною $(1,50 \pm 0,15)$ мм. Для проведення натурних вогневих випробувань використовувались сталеві двотаврові колони зі зведеною товщиною 5,1 мм (section factor $A_m/V=196 \text{ м}^{-1}$) з чотиристороннім обігрівом.

Таблиця 3

Результати дослідження вогнезахисної ефективності інтумесцентних покриттів

№ IC	Полімер	$K_1, \text{см}^3/\text{г}$	$R_1, \text{хв}$	$K_2, \text{см}^3/\text{г}$	$R_2, \text{хв}$	$K_i^{1)}$	$T_d^{1)}$
Водно-дисперсійні фарби							
IC1	EZ 3010	42	35	38	56	42	249
IC2	EZ 3112	45	41	40	62	46	256
IC3	CEZ 3031	64	30	24	44	23	211
IC4	H211	35	28	18	35	21	231
Органорозчинні фарби							
IC5	AC80	40	23	15	32	5	207
IC6	AC80+AC4	43	36	25	48	34	229
IC7	VAGH	56	41	46	52	38	200
IC8	VYHH	62	37	26	44	30	208

¹⁾ Лінійний коефіцієнт спучення. ²⁾ Температура початку термодеградації полімеру, визначена TGA-методом.

Результати досліджень (табл. 3) свідчать, що структура полімеру критично впливає на досягнення кінцевого результату – забезпечення певної межі вогнестійкості сталевій конструкції (R_2 , хв). Так найкращий результат демонструє покриття IC2, що містить у своєму складі співполімер вінілацетат-етилен-вінілверсатат ($R_2 = 62$ хв), що майже у 2 рази перевищує значення R_2 для покриття IC5 на основі стирол-акрилатного сполучного (R_2 , табл. 3). Слід також зауважити, що випробування на пальнику Бунзена продемонстрували загальну тенденцію покриттів із стирол-акрилатним полімером IC4, IC5 до плавлення, стікання з металеві підкладки (рис. 2, а). Використання суміші ньютонівського співполімеру AC80 із неньютонівським AC4 у співвідношенні 3:1 децю долає цю проблему (рис. 2, б). Очевидно, що

для повного усунення стікання потребується додаткова модифікація складу ІС6 для підвищення в'язкості розплавленого шару перед його коксуванням.



Рис. 2. Стікання інтумесцентних покриттів при спалюванні на пальнику Бунзена:
а) ІС5; б) ІС6

Для визначення зміни коефіцієнта спучення K в інтервалі 200–800 °С було проведено поетапне вивчення морфології вуглецевого шару, як описано в експериментальній частині. На рис. 3 представлені залежності об'ємного коефіцієнта спучення (K) інтумесцентних композицій з різними полімерами (табл. 3) від температури.

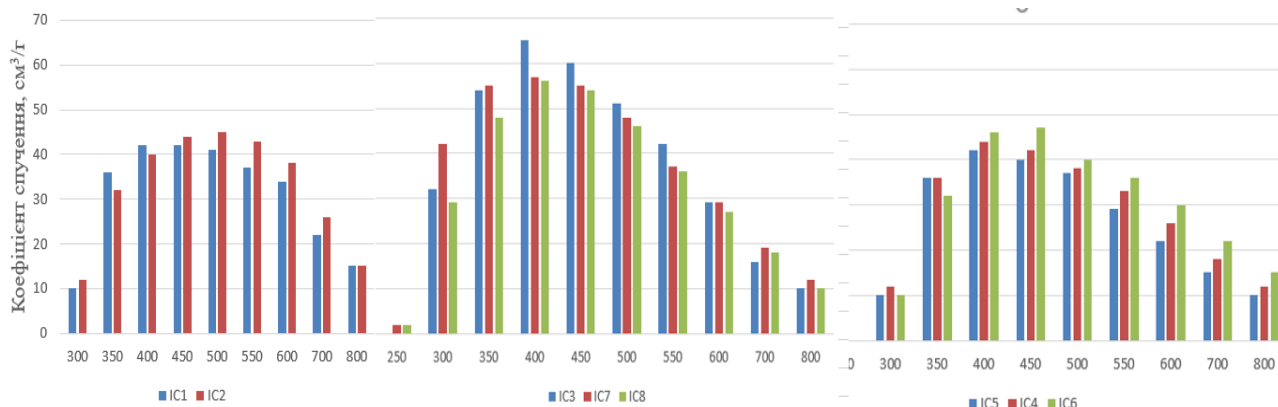


Рис. 3. Залежність коефіцієнта спучення K (см³/г) інтумесцентних композицій від температури T (°С)

За отриманими результатами (рис. 3) досліджені полімери логічно поділяються на три групи, що відрізняються перебігом процесу спучення, а відповідно й фізичними характеристиками побудованих вуглецевих шарів:

1) негалогеновані вінілацетатні співполімери, що утворюють ІС1 та ІС2. Згідно із зростанням вуглецевого каркасу (K , рис. 3) основні хімічні процеси в ІС1 та ІС2 починаються після 350 °С та перебігають в інтервалі температур 350–650 °С. Покриття ІС1 та ІС2 характеризуються тривалою стабілізаційною ділянкою сталості коефіцієнта спучення K (інтервал 350–650 °С, рис. 3);

2) галогеновані вінілацетатні співполімери, що містяться в композиціях ІС3, ІС7, ІС8. Ці покриття характеризуються більш раннім (< 300 °С) та стрімким спученням (K , рис. 3) зі скороченою ділянкою стабілізації K в інтервалі 350–550 °С;

3) стирол-акрилатні полімери в покриттях ІС4, ІС5, ІС6 також демонструють скорочення стабілізаційної ділянки коефіцієнта K до 550 °С.

Залежність коефіцієнта спучення K від температури (рис. 3) дозволяє позиціонувати негалогеновані вінілацетатні співполімери як найкращий вибір полімерної складової для ІС через утворення стабільних вуглецевих шарів, які розкладаються при більш високих температурах, ніж інші досліджені ІС (табл. 3). Було встановлено [11], що втрата 70 % маси для ІС з ароматичними співполімерами (ІС4 та ІС5) настає у середньому при 640 °С, в той час як ІС1 та ІС2 втрачають 70 % маси при температурі 701 °С та 715 °С відповідно.

Зовнішні вигляди коксових шарів для кожної означеної групи полімерів, що були отримані у процесі виконання експериментальних досліджень, представлені у табл. 4. Незалежно від умов випробувань у структурах коксового спученого шару досліджених композицій спостерігаються суттєві відмінності: регулярний, щільний і дрібнопористий каркас спостерігається при використанні в ІС негалогенованих вінілацетатних співполімерів EZ 3010 та EZ 3112. Ця тенденція зберігається й при проведенні повномасштабних вогневих випробувань – двотавр в кінці випробувань, як правило, є вкритим шільним та регулярним спученим шаром з відмінною адгезією до підкладки (рис. 4). Реактивні покриття, які використовуються у великомасштабних випробуваннях, містять додаткові антипірени та домішки до складів (см. табл. 2). ІС, які містять стирол-акрилатні полімери H211 та AC80, в свою чергу, формують більш легкі каркаси пористої структури, які є нестабільними після 600 °С. За результатами випробувань за ДСТУ В V.1.1-14:2007 після 40-50 хв спостерігається вигорання та руйнування захисного каркасу майже повністю для ІС5 та значні дефекти в покритті ІС6 (рис. 4). Коксові шари ІС з галогенованими вінілацетатними співполімерами характеризуються найбільшими коефіцієнтами спучення, але мають рихлу структуру з великими порожнинами. В умовах повномасштабних випробувань покриття, що містять галогеновані вінілацетатні співполімери (CEZ 3031, VAGH, VYHH) демонструють пухкі каркаси з локальними вигораннями та руйнуваннями (рис. 4).

Отримані результати є ще одним доказом того, що полімер в ІС слід розглядати не тільки як плівкоутворювач для отримання лакофарбового покриття й забезпечення йому певного строку експлуатації. Полімерна складова є четвертим повноцінним компонентом IFR, від якої, як показано вище, залежить показник межі вогнестійкості R – основна функціональна характеристика вогнезахисного інтумесцентного покриття.

Основною причиною різних показників межі вогнестійкості R є різниця в механізмах термічної деградації досліджених співполімерів. Відомо [17], що термодеструкція вінілацетатних полімерів здійснюється в два етапи: перший інтенсивний між 300 і 400 °С складається з процесу деацетилювання та відсіченням фрагментів в кінці полімерного ланцюга з утворенням полієнів; на другому етапі в інтервалі 400–500 °С відбувається деградація ланцюга за подвійним зв'язками. У разі стирол-акрилатних полімерів термодеструкція відбувається за один основний крок від 340 до 450 °С з одночасним відщепленням фрагментів акрилової кислоти, їх декарбоксилюванням та розщепленням ланцюга безпосередньо в летючі мономери [18]. При використанні галогенованих вінілацетатних співполімерів передбачуваним є посилене виділення оцтової кислоти за рахунок кислотного каталізу з боку утвореного HCl. Це провокує зниження температури розпаду полімеру та насичує IFR леткими речовинами, що призводять до надмірного спучення та руйнування вуглецевого каркасу.

Для подальшого вибору оптимальних для інтумесцентного вогнезахисту полімерних складових слід однозначно виключити галогенові полімери, як джерело край шкідливих речовин в умовах пожежі. Що стосується стирол-акрилатних органорозчинних полімерів, то слід зазначити, що на світовому ринку полімерів край важко знайти аналогічні бюджетні замінники, які здатні утворювати висококонцентровані (до 30%) лакові напівпродукти для отримання високонаповнених (до 80% нелетких речовин) інтумесцентних фарб низького цінового сегменту.

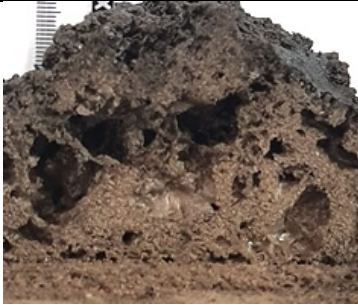
Витримка у термошафі	Випробування у міні-печі	Випробування за DSTU В V.1.1-14:2007
IC2, Вінілацетат-стилен-вінілверсатат		
		
IC5, ньютонівський стирол-акрилат		
		
IC6, суміш ньютонівський+неньютонівський стирол-акрилати		
		
IC8, вінілхлорид-вінілацетат		
		

Рис. 4. Вигляд вуглецевих шарів в різних умовах випробувань

Дані, що представлені нижче, стосуються визначення області застосування ароматичних стирол-акрилатних співполімерів у вогнезахисних ІС. В табл. 4 наведено результати натурних вогневих випробувань за ДСТУ В V.1.1-13:2007 покриттів IC1 та IC6 з варіацією товщини. Залежно від товщини шару вінілацетатного (EZ 3010) та стирол-акрилатного (суміш AC80+AC4) покриття спостерігається реверс вогнезахисної ефективності: значення межі вогнестійкості R_2 сталевих балок, з покриттям IC1 з товщиною 0,45 мм, складає 22 хв, що значно менше аналогічної величини для покриття IC6 такої ж товщини (34 хв). В той

час як значення вогнестійкості для покриття IC6 з товщиною 1,95 мм складає 44 хв, а для покриття IC2 – 56 хв. Візуалізація цього експерименту показана на рис. 5.

Таблиця 4

Межа вогнестійкості сталевих балок, захищених інтумесцентними покриттями IC1 та IC6 з різною товщиною

IC	IC1		IC6	
Товщина покриття, мм	0,45±0,04	1,92±0,11	0,44±0,05	1,95±0,13
Межа вогнестійкості, R ₂ , хв	22	56	34	42



Рис. 5. Випробування двотаврових балок, захищених покриттями IC1 та IC6 з різними товщинами за DSTU B V.1.1-13:2007: а) до випробувань; б) після випробувань в умовах стандартної пожежі протягом 60 хв

Таким чином показано, що застосування різних полімерів для вогнезахисних покриттів є одним із шляхів диференційної розробки засобів вогнезахисту, орієнтованих на заданий клас вогнестійкості. Продемонстровано, що для забезпечення низької межі вогнестійкості (30 хв) доцільно застосовувати акрилатні інтумесцентні покриття що містять, наприклад, полімер H211 (Hydro Pliolite 211) для водно-дисперсійних фарб, або суміш полімерів AC80+AC4 (Pliolite) для органорозчинних фарб. В свою чергу, для більш високих значень вогнестійкості (60 хв та вище) ефективними є інтумесцентні покриття вінілацетатного типу на основі водно-дисперсійних полімерів марки EZ 3010 чи EZ 3112 або аналогічних полімерних матеріалів від інших виробників. Досліджені полімерні сполучні є продуктами, які промислово виробляються під різними торговими марками. Вони є відносно бюджетними матеріалами й не роблять критичного внеску у собівартість засобів реактивного вогнезахисту, тому можуть бути рекомендовані для рецептур вогнезахисних покриттів.

Висновки. Досліджено вплив структури вінілацетатних та стирол-акрилатних полімерів на вогнезахисну ефективність інтумесцентних систем поліфосфат амонію/меламін/пентаеритрит для створення реактивних покриттів інтумесцентного типу.

Показано, що використання різних полімерних зв'язуючих є одним із шляхів диференційованої розробки вогнезахисних реактивних покриттів із заданим показником вогнестійкості. Доведено, що високу вогнезахисну ефективність інтумесцентного засобу вогнезахисту (R60 та вище) можна досягти при використанні полімерів вінілацетатного типу (вінілацетат-етилен, вінілацетат-етилен-вінілверсатат). Результати дослідження були підтверджені натурними вогневыми випробуваннями згідно з національними стандартами та є практичними рекомендаціями для створення нових конкурентоспроможних покриттів з підвищеними вогнезахисними властивостями.

References

1. Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC Text with EEA relevance. *OJEU*. 2011. 39 p.
2. Nguyen, M. H., Ouldboukhithine, S.-E., Durif, S., Saulnier, V., Bouchair, A. (2023). Passive fire protection of steel profiles using wood. *Eng. Struct.*, 275, Part A, 115274.
3. Lucherini, A., Maluk, C. (2019). Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *J. Constr. Steel Res.*, 162 (9), 105712.
4. Wang, K., Le, H. (2023). The Development of Cement-Based, Intumescent and Geopolymer Fire-Retardation Coatings for Metal Structures: A Review. *Coatings*, 13, 495.
5. Mariappan, T. (2016). Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *J. Fire Sci.*, 34(2), 1–44.
6. Vakhitova, L. N. (2019). Fire retardant nanocoating for wood protection. In: *Nanotechnology in Eco-efficient Construction*. P. 361–391.
7. Yasir, M., Ahmad, F., Yusoff, P. S. M. M., Ullah, S., Jimenez, M. (2019). Latest trends for structural steel protection by using intumescent fire protective coatings: a review. *Surf. Eng.*, 36, 334–363.
8. Bourbigot, S., Sarazin, J., Samyn, F., Jimenez, M. (2019). Intumescent ethylene-vinyl acetate copolymer: reaction to fire and mechanistic aspects. *Polym. Degrad. Stab.*, 161, 235–244.
9. Ng, Y. H., Dasari, A., Tan, K. H., Qian, L. (2021). Intumescent fire-retardant acrylic coatings: Effects of additive loading ratio and scale of test. *Prog. Org. Coat.*, 150, 105985.
10. Pimenta, J. T., Gonçalves, C., Hiliou, L., Coelho, J. F. J., Magalhaes, F. D. (2015). Effect of binder on performance of intumescent coatings. *J. Coat. Technol. Res.*, 13, 227–238.
11. Kalafat, K., Taran, N., Plavan, V., Bessarabov, V., Zagoriy, G., Vakhitova, L. (2020). Comparison of fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures. *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, 4 (10), 45–54.
12. Vakhitova, L., Kalafat, K., Vakhitov, R., Drizhd, V., Taran, N., Bessarabov, V. (2023). Nano-clays as rheology modifiers in intumescent coatings for steel building structures. *Chemical Engineering Journal Advances*, 100544.

Література

1. Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC Text with EEA relevance. *OJEU*. 2011. 39 p.
2. Nguyen M. H., Ouldboukhithine S.-E., Durif S., Saulnier V., Bouchair A. Passive fire protection of steel profiles using wood. *Eng. Struct.* 2023. Vol. 275. Part A. 115274.
3. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *J. Constr. Steel Res.* 2019. Vol. 162 (9). 105712.
4. Wang K., Le H. The Development of cement-based, intumescent and geopolymer fire-retardation coatings for metal structures: a review. *Coatings* 2023. № 13. 495.
5. Mariappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *J. Fire Sci.* 2016. Vol. 34 (2). P. 1–44.
6. Vakhitova L. N. Fire retardant nanocoating for wood protection. In: *Nanotechnology in Eco-efficient Construction*. 2019. P. 361–391.
7. Yasir M., Ahmad F., Yusoff P. S. M. M., Ullah S., Jimenez M. Latest trends for structural steel protection by using intumescent fire protective coatings: a review. *Surf. Eng.* 2019. Vol. 36 (4). P. 334–363.
8. Bourbigot S., Sarazin J., Samyn F., Jimenez M. Intumescent ethylene-vinyl acetate copolymer: Reaction to fire and mechanistic aspects. *Polym. Degrad. Stab.* 2019. Vol. 161. P. 235–244.
9. Ng Y. H., Dasari A., Tan K. H., Qian L. Intumescent fire-retardant acrylic coatings: Effects of additive loading ratio and scale of test. *Prog. Org. Coat.* 2021. Vol. 150. 105985.
10. Pimenta J. T., Gonçalves C., Hiliou L., Coelho J. F. J., Magalhaes F. D. Effect of binder on performance of intumescent coatings. *J. Coat. Technol. Res.* 2015. № 13. P. 227–238.
11. Kalafat K., Taran N., Plavan V., Bessarabov V., Zagoriy G., Vakhitova L. Comparison of fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures. *East.-Eur. J. Enterp. Technol.* 2020. № 4 (10). P. 45–54.
12. Vakhitova L., Kalafat K., Vakhitov R., Drizhd V., Taran N., Bessarabov V. Nano-clays as rheology modifiers in intumescent coatings for steel building structures. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2023. 100544.

13. Zeng, Y., Weinell, C. E., Dam-Johansen, K., Ring, L., Kiil, S. (2020). Effects of coating ingredients on the thermal properties and morphological structures of hydrocarbon intumescent coating chars. *Prog. Org. Coat.*, 143, 105626.
14. Puri, R. G., Khanna, A. S. (2016). Intumescent coatings: A review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14(1), 1–20.
15. Anees, S. M., Dasari, A. (2018). A review on the environmental durability of intumescent coatings for steels. *Journal of Materials Science*, 53(3), 124–145.
16. Troitzsch, J. H. (2023). Fire performance durability of flame retardants in polymers and coatings. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 12–24.
17. Pielichowski, K., Njuguna, J., Majka, T. M. (2022). Thermal Degradation of Polymeric Materials. 2nd Ed. Elsevier Science. 378 p.
18. Kalafat, K. V., Taran, N. A., Plavan, V. P., Redko, A. M., Efimova, I. V., Vakhitova, L. M. (2020). The effect of ammonium polyphosphate: melamine: pentaerythritol ratio on the efficiency of fire protection of reactive coatings. *Vopr. Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 6, 59–68.
13. Zeng Y., Weinell C. E., Dam-Johansen K., Ring L., Kiil S. Effects of coating ingredients on the thermal properties and morphological structures of hydrocarbon intumescent coating chars. *Prog. Org. Coat.* 2020. Vol. 143. 105626.
14. Puri R. G., Khanna A. S. Intumescent coatings: A review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2016. Vol. 14 (1). P. 1–20.
15. Anees S. M., Dasari A. A review on the environmental durability of intumescent coatings for steels. *Journal of Materials Science*. 2018. Vol. 53 (3). P. 124–145.
16. Troitzsch J. H. Fire performance durability of flame retardants in polymers and coatings. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2023. P. 12–24.
17. Pielichowski K., Njuguna J., Majka T. M. Thermal Degradation of Polymeric Materials. 2nd Ed. Elsevier Science, 2022. 378 p.
18. Kalafat K. V., Taran N. A., Plavan V. P., Redko A. M., Efimova I. V., Vakhitova L. M. The effect of ammonium polyphosphate: melamine: pentaerythritol ratio on the efficiency of fire protection of reactive coatings. *Vopr. Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2020. № 6. P. 59–68.

VAKHITOV RAMIL

Postgraduate, Department of Chemical Technologies and Resource Saving,
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-9657-5743>
Scopus Author ID: 58183912100
Researcher ID: rid30607
E-mail: vahitov89@gmail.com

TARAN NADIYA

Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher,
Department of Nucleophilic Reactions Research,
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0003-1043-5596>
Scopus Author ID: 15119449100
E-mail: N.A.Taran@nas.gov.ua

VAKHITOVA LIUBOV

Candidate of Chemical Sciences, Senior Research Fellow,
Department of Nucleophilic Reactions Research,
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1923-7895>
Scopus Author ID: 8443383300
Researcher ID: J-9402-2016
E-mail: L.M.Vakhitova@nas.gov.ua

KALAFAT KOSTIANTIN

Doctor of Philosophy in Chemical and Bioengineering, Research Associate,
Department of Nucleophilic Reactions Research,
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0001-6165-0005>
Scopus Author ID: 5719302971
E-mail: kalafat@nas.gov.ua

BESSARABOV VOLODYMYR

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0003-0637-1729>
Scopus Author ID: 36917184700
Researcher ID: D-3425-2017;
E-mail: v.bessarabov@kyivpharma.eu

¹VAKHITOV R. A., ²KALAFAT K. V., ²TARAN N. A.,
^{1,2}BESSARABOV V. I., ²VAKHITOVA L. M.

¹ Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

²L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

POLYMERS FOR APPLICATION IN INDUSTRIAL FIRE RETARDANT REACTIVE COATINGS

Purpose. To investigate the effect of polymer structure on the fire retardant efficiency of intumescent systems based on ammonium polyphosphate/melamine/pentaerythritol for the development of competitive industrial reactive coatings.

Methodology. A fire retardant mixture of ammonium polyphosphate/melamine/pentaerythritol/polymer was chosen as a model intumescent system. Vinyl acetate, acrylic, and styrene-acrylic aqueous dispersions, as well as solutions of their analogs in organic solvents, were used as polymer components. The volumetric intumescent coefficient (K , cm³/g) and mass of char residue (m , %) of the intumescent composition were determined after exposing samples of the intumescent system to temperatures ranging from 200 to 800 °C. Infrared spectroscopy was employed to identify the thermal decomposition products of intumescent systems. Fire retardant efficiency of intumescent coatings was assessed using a mini-furnace under standard fire conditions, according to DSTU B V.1.1-14:2007 and DSTU B V.1.1-13:2007.

Findings. The study provides practical recommendations for the development of intumescent coatings with a proven fire resistance limit of R150 by examining the influence of the polymer component nature. It has been demonstrated that the use of different polymers for fire retardant coatings is a method for differentially developing fire protection means focused on a given fire resistance class. It has been demonstrated that to ensure a low fire resistance limit (30 min), it is advisable to use acrylate intumescent coatings, for example, Hydro Pliolite 211 polymer for waterborne paints, or mixtures of Pliolite AC80 and Pliolite AC4 polymers for organosoluble paints. For higher fire resistance values (60 minutes and above), vinyl acetate-type intumescent coatings (vinyl acetate-ethylene, vinyl acetate-ethylene-vinyl versatate) based on aqueous dispersions of polymers such as Vinapas, Mowilith, or similar materials from other manufacturers prove effective.

Originality. It is shown that an important factor in improving the fire protection efficiency of intumescent systems is the use of polymers of a specific structure with multistage thermal decomposition.

Practical value. Optimal polymer materials applicable for the production of reactive coatings on an industrial scale have been identified.

Keywords: fire protection; intumescent system; ammonium polyphosphate; melamine; pentaerythritol; vinyl acetate; styrene-acrylic.