



Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 12
Український журнал природничих наук
№ 12

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

УДК 666.76, 661.174

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.10>

ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ІНТУМЕСЦЕНТНИХ РУЛОННИХ ПОКРИТТІВ

**Р. А. Вахітов¹, В. І. Шологон², Н. А. Таран³, К. В. Калафат⁴, В. І. Бессарабов⁵,
Л. М. Вахітова⁶**

Забезпечення надійного та швидкого вогнезахисту будівельних конструкцій, інфраструктурних та оборонних об'єктів потребує застосування ефективних, технологічних мобільних засобів. Особливу актуальність набувають інтумесцентні рулонні покриття, здатні забезпечувати конструктивний і реактивний вогнезахист завдяки взаємодії волокнистих основ і спеціальних вогнезахисних композицій. Ці покриття відрізняються гнучкістю, легкістю нанесення та можливістю адаптації до різних умов експлуатації. Мета роботи – дослідження впливу графітових

¹ аспірант кафедри хімічної технології та ресурсозбереження
(Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ)
vahitov89@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9657-5743

² кандидат хімічних наук, науковий співробітник відділу досліджень нуклеофільних реакцій
(Інститут фізико-органічної хімії та вуглехімії імені Л. М. Литвиненка НАНУ, м. Київ)
e-mail: Shologon@nas.gov.ua
ORCID: 0000-0002-6249-5390

³ кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник,
старший науковий співробітник відділу досліджень нуклеофільних реакцій
(Інститут фізико-органічної хімії та вуглехімії імені Л. М. Литвиненка НАНУ, м. Київ)
e-mail: nadegda5.09.2017@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1043-5596

⁴ доктор філософії з хімічної технології та інженерії, старший науковий співробітник відділу досліджень нуклеофільних реакцій
(Інститут фізико-органічної хімії та вуглехімії імені Л. М. Литвиненка НАНУ, м. Київ)
e-mail: kalafat@nas.gov.ua
ORCID: 0000-0001-6165-0005

⁵ доктор технічних наук, професор, професор кафедри промислової фармації
(Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ)
e-mail: v.bessarabov@kyivpharma.eu
ORCID: 0000-0003-0637-1729

⁶ кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник відділу досліджень нуклеофільних реакцій
(Інститут фізико-органічної хімії та вуглехімії імені Л. М. Литвиненка НАНУ, м. Київ)
e-mail: L.M.Vakhitova@nas.gov.ua
ORCID: 0000-0003-1923-7895

наповнювачів на вогнезахисну ефективність рулонних інтумесцентних вогнезахисних матеріалів на основі різних типів неорганічних підкладок (скловолокно, мінераловолокно, керамоволокно). Методами експерименту є приготування композицій на основі системи амоній поліфосфат (APP) / меламін (MA) / пентаеритрит (PE) з варіативним додаванням терморозширюваного (EG) та спученого графіту (SG), формування рулонних покриттів, вогневі випробування за методом «пальника Бунзена». Доведено необхідність комбінування графітових наповнювачів з інтумесцентною системою для досягнення високих вогнезахисних характеристик рулонних реактивних покриттів. За результатами дослідження встановлено, що найбільш ефективні композиції містять EG до 5%, SG – не більше ніж 1%, а також містять сітку зі скловолокна як армувальний елемент. Такі покриття забезпечують стабільне інтенсивне спучення, утворення однорідного коксового шару й ефективну теплоізоляцію. Наукова новизна полягає в комплексному аналізі впливу рецептурних параметрів на термоізоляційні властивості покриттів, що дає змогу цілеспрямовано підходити до дизайну складу інтумесцентного покриття із заданими показниками вогнестійкості. Практична значущість дослідження пов'язана з можливістю впровадження розроблених рулонних засобів мобільного вогнезахисту, виробництво яких відсутнє в Україні.

Ключові слова: вогнезахист, інтумесцентне покриття, терморозширюваний графіт, спучений графіт, пінококс, рулонний вогнезахисний матеріал.

STUDY OF FIRE PROTECTION PROPERTIES OF INTUMESCENT ROLL COATINGS

R. A. Vakhitov, V. I. Shologon, N. A. Taran, K. V. Kalafat, V. I. Bessarabov,
L. M. Vakhitova

Ensuring effective and rapid fire protection of building structures, infrastructure and defence facilities requires the use of efficient, technologically advanced mobile means. Intumescent roll coatings are of particular relevance, as they are capable of providing constructive and reactive fire protection through the interaction of fibre substrate and special compositions. These coatings are flexible, easy to apply and adaptable to different operating conditions. The purpose of the study is to investigate the effect of graphite fillers on the fire protection efficiency of roll intumescent fire protection materials based on different types of inorganic substrates (glass fibre, mineral fibre, ceramic fibre). The methods of the experiment were the preparation of compositions based on the ammonium polyphosphate (APP)/melamine (MA)/pentaerythritol (PE) system with the variable addition of expandable (EG) and swollen graphite (SG), the formation of roll coatings, and fire tests using the Bunsen burner method. The necessity of combining graphite fillers with an intumescent system to achieve effective fire protection characteristics of reactive roll coatings has been proved. The study found that the most effective compositions contain EG – no more than 5%, SG – no more than 1%, and also include a glass fibre mesh as a reinforcing element. Such coatings provide stable intensive swelling, formation of a homogeneous char layer and effective thermal insulation. The scientific novelty lies in the comprehensive analysis of the influence of formulation parameters on the thermal insulation properties of coatings, which allows for a targeted approach to the design of the composition of the intumescent coating with specified fire resistance indicators. The practical significance of the study is based on the possibility of implementing the developed roll of mobile fire protection products, the production of which is not available in Ukraine.

Key words: fire protection, intumescent coating, expandable graphite, swollen graphite, foam char, roll materials.

Вступ

Забезпечення вогнезахисту будівельних конструкцій є обов'язковою умовою сучасного будівництва, спрямованого на підвищення вогнестійкості об'єктів застосування засобів вогнезахисту: тонкошарових покриттів інтумесцентного (реактивного) типу, вогнезахисних штукатурок, плит, гнучких рулонних матеріалів тощо (Wang & Le 2023; Gernay, 2024; Gravit et al., 2024a). Останнім часом особливої уваги набули інтумесцентні рулонні матеріали, що поєднують

властивості конструктивного й реактивного вогнезахисту, завдяки використанню негорючих волокнистих основ (підкладок), на які нанесено вогнезахисні покриття (Steau, 2020; Brent & T'ien, 2022; Shiu et al., 2023).

У науковій літературі значну увагу приділено класичним системам інтумесцентного вогнезахисту (intumescent flame retardant, IFR) на основі тріади амоній поліфосфат (APP) / меламін (MA) / пентаеритрит (PE) (Yasir, 2019; Vakhitova, 2024). Ці композиції інтенсивно вивчаються в поєднанні з різ-

ними полімерними матрицями та наповнювачами. Зокрема, повідомляється про можливість покращення ефективності таких систем шляхом введення наповнювачів, що є термостійкими або каталізують утворення коксового шару (Yasir, 2019). Графітові модифікатори, зокрема терморозширюваний графіт (EG) та спучений графіт (SG), демонструють потенціал як у підвищенні коефіцієнта спучення, так і у зменшенні втрат маси покриттів (Zheng et al., 2016; Kmeťová et al., 2024). Водночас залишаються суперечливими дані щодо механізму їхньої дії в системах інтумесцентного типу, зокрема щодо доцільності використання EG, а також щодо взаємодії графітових наповнювачів з різними типами підкладок. Незважаючи на наявні публікації щодо впливу окремих компонентів інтумесцентних покриттів (Zheng et al., 2016; Nolan, 2019), недостатньо досліджено ефекти комплексної дії графітових наповнювачів у рулонних інтумесцентних системах. Залишається відкритим питання впливу співвідношення EG та SG на ефективність спучення вогнезахисного покриття з використанням різних типів неорганічних підкладок. Не визначено також оптимальну концентрацію цих наповнювачів для досягнення балансу між механічною стабільністю пінококсу та його теплоізоляційними властивостями (Zheng et al., 2016; Ma et al., 2024; Kmeťová et al., 2024).

Волокнисті основи у складі рулонних інтумесцентних покриттів виконують не лише механічну функцію (підкладку для нанесення композиції), але й беруть участь у формуванні структури теплоізоляційного шару шляхом модифікації механізму спучення інтумесцентної системи. Крім того, неорганічна підкладка здатна підвищувати термостійкість та адгезійні властивості пінококсу, що утворюється внаслідок дії високої температури (Otáhal et al., 2011; Amir et al., 2011; Amir et al., 2013).

Таким чином, обґрунтований вибір типу неорганічної підкладки дозволить оптимізувати характеристики інтумесцентного рулонного покриття, забезпечуючи необхідну механічну підтримку утвореного коксового шару без негативного впливу на процеси генерації піни.

Слід констатувати, що наукові дослідження, присвячені вогнезахисним властивостям рулонних матеріалів, є обмеженими та фрагментарними. Наявні роботи переважно стосуються характеристик него-

рючих волокон, механізмів спучення інтумесцентних покриттів та загальної оцінки ефективності конструктивного вогнезахисту. Публікації з питань створення комбінованих інтумесцентних рулонних систем, що поєднують волокнисті підкладки з інтумесцентними композиціями, є поодинокими (Triantafyllidis & Bisby, 2020; Takahashi, 2021). При цьому недостатньо вивчені питання впливу типу неорганічної підкладки на формування термостійкого пінококсу, міцність та адгезію захисного шару інтумесцентних покриттів. Необхідні також додаткові дослідження для обґрунтування вибору оптимальних поєднань композиційних матеріалів з метою підвищення ефективності та технологічності гнучких вогнезахисних систем (Nolan, 2019).

У контексті військових дій, що тривають в Україні, проблема оперативного забезпечення мобільного вогнезахисту об'єктів оборонного призначення набуває критичної важливості. Використання легких гнучких вогнезахисних матеріалів дає змогу ефективно організувати захист укриттів, складів зброї, паливо-мастильних матеріалів та інших стратегічних об'єктів у складних кліматичних та експлуатаційних умовах (Chin et al., 2000; Tewarson et al., 2001). Крім того, рулонні вогнезахисні покриття можуть застосовуватися для підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій та комунікацій у разі оперативного відновлення зруйнованих об'єктів інфраструктури, електроенергетики, газо- та нафтопереробних підприємств (Gravit et al., 2024b).

Попри очевидні переваги гнучких вогнезахисних матеріалів, в Україні відсутнє власне виробництво таких засобів вогнезахисту. Тож необхідність розробки рулонних вогнезахисних матеріалів є надзвичайно актуальною як для будівельної галузі, так і для потреб оборонного комплексу.

Метою цієї роботи є дослідження впливу графітових наповнювачів на вогнезахисну ефективність рулонних інтумесцентних вогнезахисних матеріалів на основі різних типів неорганічних підкладок (скловолокно, мінераловолокно, керамоволокно).

Матеріал і методи

Матеріали. Для приготування інтумесцентних композицій (IFR) використовували поліфосфат амонію FR Cros 484 (Budenheim, Іспанія), пентаеритрит марки Charmor PM40 (Perstorp Holding AB, Швеція), меламін мікронізований (Borealis Agrolinz Melamine GmbH, Австрія), діоксид титану (TiO₂)

марки Ti-Pure R-902 (DuPont, США), дисперсію співполімеру вінілацетату з етиленом (EVA) Vinnapas EZ 3010 (Wacker Chemical Corporation, США), графіт, що терморозширюється (EG), EG-250 (Beijing Great Wall Co Ltd, Китай). Як неорганічну підкладку для формування рулонного матеріалу застосовували сітку із скловолокна з розміром комірок 5 x 5 мм (Tianrui, Китай), мати з керамоволокна (Luyang Unifrax Trading, Китай), скловолокно Cem fil (Owens Corning, США), мінеральні волокна Lapinus (Rockwool BV, Нідерланди).

Приготування інтумесцентних композицій (IFR). У дисольвер лабораторний з об'ємом робочої чаші 1 дм³ поміщали воду та компоненти інтумесцентної композиції: поліфосфат амонію, пентаеритрит, меламін, діоксид титану за необхідних співвідношень. Суміш перемішували протягом 60 хв за швидкості фрези 900–1000 об/хв. Потім додавали терморозширюваний графіт (EG) або спучений графіт (SG) та перемішували протягом 15 хв за швидкості фрези 500–600 об/хв. До отриманої пасти додавали водну дисперсію полімеру та перемішували за швидкості фрези 500–600 об/хв протягом 30 хв. Готову IFR композицію зберігали в герметичній ємності. Рецептури IFR, що досліджувалися, представлені в табл. 1. Для приготування інтумесцентних композицій додатково застосовували диспергатор, піногасник і загущувач у кількостях 1–2 мас. %.

Формування рулонного покриття типу IFR – неорганічна підкладка (RC). У дисольвер лабораторний з об'ємом робочої чаші 0,3 дм³ поміщали 100 г інтумесцентної композиції (табл. 1) та 7 г волокна. Суміш перемішували протягом 30 хв за швидкості фрези 500–600 об/хв до максимального диспергування волокна в IFR. Отриману композицію наносили на поліетиленову плівку квадратом 15 x 15 см та товщиною мокрого покриття 2,0 ± 0,2 мм.

На сітку зі скловолокна, закріплену на поліетиленовій плівці, наносили 50 ± 5 г інтумесцентної композиції (табл. 1) квадратом 15 x 15 см та товщиною мокрого покриття 2,0 ± 0,2 мм. Вага фрагмента скловолокна розміром 15 x 15 см становила 2,0 ± 0,1 г. Аналогічно формували покриття на тонкому шарі мату з керамоволокна. Вага фрагмента мату із керамоволокна розміром 15 x 15 см становила 7,0 ± 0,5 г.

Зразки витримували за кімнатної температури протягом не менше ніж 20 діб, відокремлювали від поліетиленової плівки та використовували для вогневих випробувань. Склад і назва рулонних покриттів наведені в табл. 2, а зовнішній вигляд – на рис. 1.

Спучений графіт (SG) отримували з графіту EG-250 в умовах термоудару за температури 800–1000 °С. Методика вогневих випробувань за методом «пальника Бунзена» детально описана в роботі (Kalafat, 2020).

Таблиця 1

Співвідношення компонентів (%)¹ в інтумесцентних композиціях

№ IFR	APP	PE	MA	TiO2	EVA	EG	SG
IFR1	–	–	–	–	38,5	61,5	–
IFR2	31,5	–	–	–	37,0	31,5	–
IFR3	34,5	–	–	11,0	37,9	16,6	–
IFR4	38,0	11,4	14,2	14,2	22,2	–	–
IFR5	31,7	14,1	10,6	15,7	12,0	15,9	–
IFR6	27,8	11,6	12,0	12,0	20,7	15,9	–
IFR7	36,3	16,1	12,1	20,2	13,7	1,6	
IFR8	35,4	7,7	7,7	10,8	30,8	7,6	
IFR9	34,1	8,9	8,9	10,4	25,9	11,8	
IFR10	27,8	12,3	9,3	15,4	21,5	24,7	
IFR11	27,5	8,3	10,3	10,3	16,1	27,5	
IFR12	37,2	11,2	14,0	14,0	21,8	–	1,8
IFR13	36,6	11,0	13,7	13,7	21,4	–	3,6
IFR14	31,4	9,4	11,8	11,8	18,4	15,7	1,5
IFR15	30,9	9,3	11,6	11,6	18,1	15,5	3,0
IFR16	34,1	10,2	12,8	12,8	19,9	8,5	1,7
IFR17	33,5	10,1	12,6	12,6	19,6	8,4	3,2

Примітка. ¹Вміст компонентів надається в мас. % в перерахунку на сухе покриття.



Рис. 1. Зовнішній вигляд рулонних покриттів на різних неорганічних підкладках

Таблиця 2

Склад рулонних покриттів

Назва RC	IFR	Неорганічна підкладка, маса, г			
		Сем філ (скловолокно)	Lapinus, CF-50 (мінераловолокно)	Сітка зі скловолокна	Мат із керамоволокна
RC1	IFR1				7,0
RC2	IFR2				7,0
RC3	IFR3			2,0	
RC4	IFR4	7,0			
RC5	IFR5				7,0
RC6	IFR5		7,0		
RC7	IFR5			2,0	
RC8	IFR6				7,0
RC9	FR6	7,0			
RC10	IFR6			2,0	
RC11	IFR6		7,0		
RC12	IFR7			2,0	
RC13	IFR8			2,0	
RC14	IFR9			2,0	
RC15	IFR10			2,0	
RC16	IFR11			2,0	
RC17	IFR12			2,0	
RC18	IFR13			2,0	
RC19	IFR14			2,0	
RC20	IFR15			2,0	
RC21	IFR16			2,0	
RC22	IFR17			2,0	

Результати та їх обговорення

Інтумесцентні вогнезахисні композиції, що представлені в табл. 1, були приготовані з варіюванням складу інтумесцентної системи за основними компонентами – APP, MA, PE (IFR1–IFR6), вмісту EG (IFR5–IFR11) та SG (IFR12–IFR17). Рулонні вогнезахисні покриття, виготовлені, як описано в експериментальній частині, складаються із шару відповідної композиції IFR та неорганічної підкладки (табл. 2).

За методом «пальника Бунзена» визначали швидкість спучення інтумесцентних композицій та зростання температури на зворотній частині пластини протягом певного часу. На рис. 2 на прикладі спалювання рулонного покриття RC5 із залученням «пальника Бунзена» продемонстровано основні етапи цього процесу: а) зовнішній вигляд покриття перед випробуваннями; б) спучений шар в умовах вогневого впливу;

в) теплозахисний шар після досягнення 350 °С; г) структура отриманого коксового шару.

Шляхом цього експерименту визначили такі параметри (рис. 3):

– R, хв – час досягнення на зворотному боці пластини температури 350 °С;

– K – лінійний коефіцієнт спучення, що розраховується як відношення товщини спученого шару при закінченні експерименту до товщини вихідного покриття;

– V, °С/хв – швидкість нагріву металевої пластини на ділянці залежності температури на зворотному боці пластини від часу, що розташована перед початком умовного температурного плато.

Отримані результати наведено в табл. 3, приклад залежності температури на зворотному боці пластини від часу для рулонних покриттів RC12–RC15 наведено на рис. 4. Аналіз даних випробувань за методом «паль-

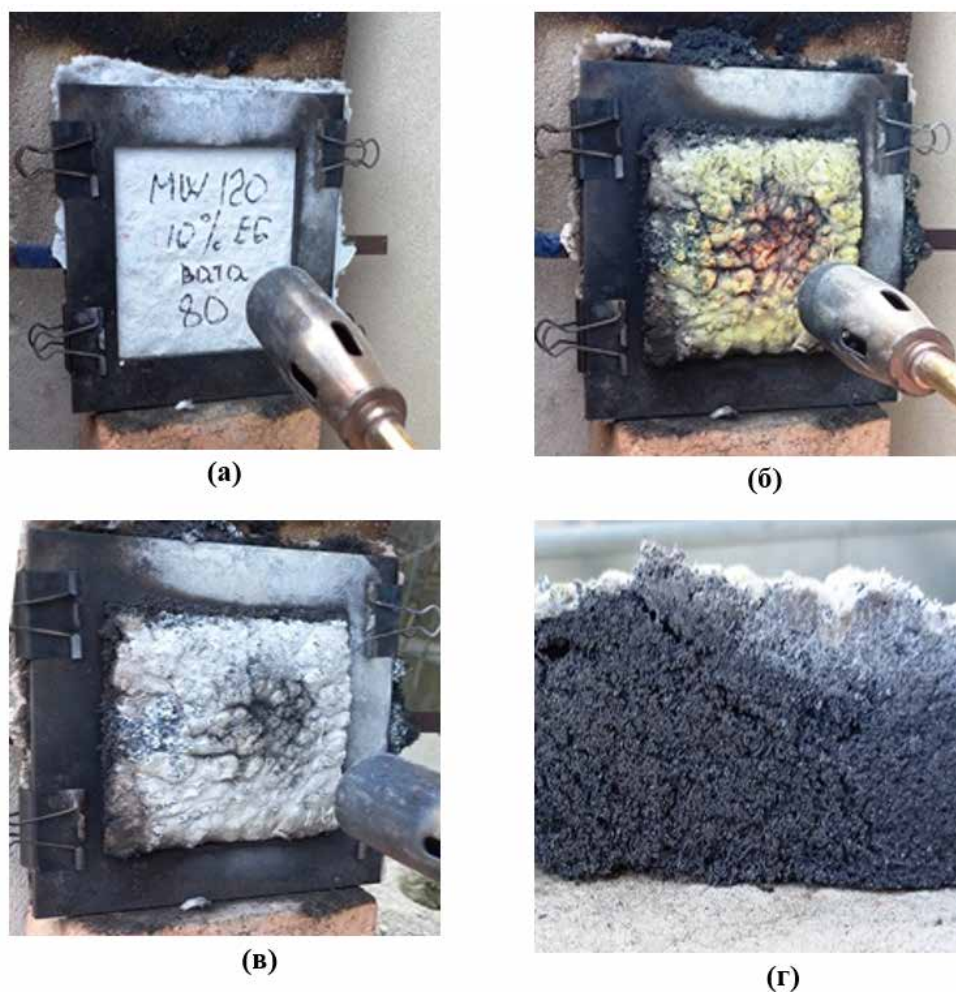


Рис. 2. Визначення вогнезахисної ефективності покриття RC5 за методом «пальника Бунзена»

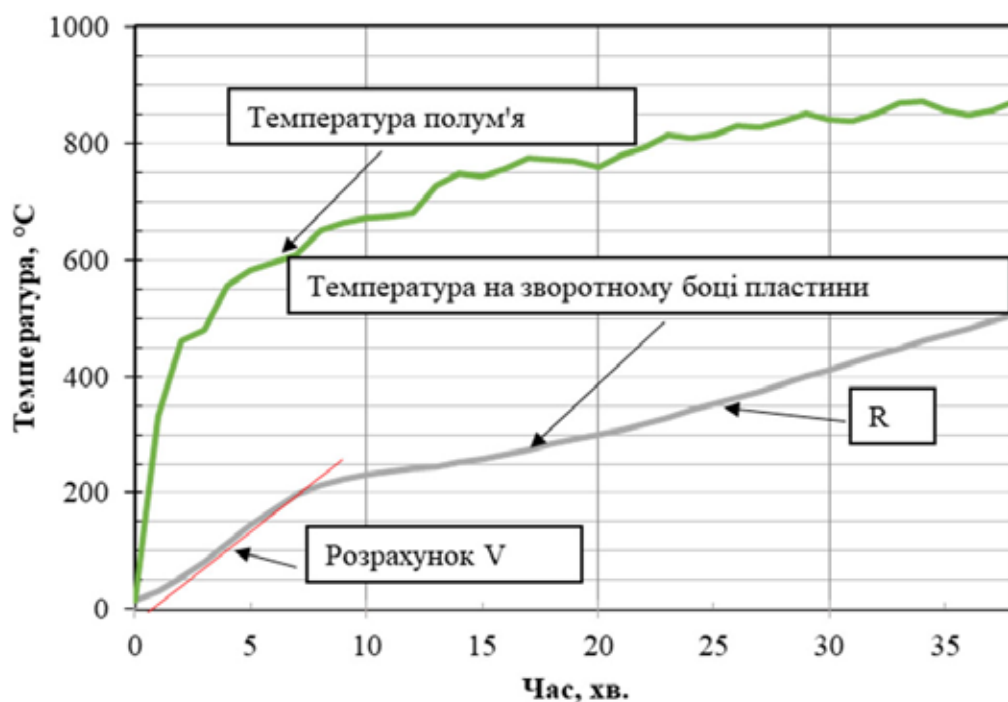


Рис. 3. Показники пристрою АВПК «TEST-1» (Kalafat, 2020)

Таблиця 3
Результати дослідження вогнезахисної ефективності рулонних покриттів за методом «пальника Бунзена»

№ RC	V, °C/хв	K	R, хв
RC1	60,5	30	8
RC2	7,23	42	> 60
RC3	10,1	20	18
RC4	12,6	41	21
RC5	10,4	30	19
RC6	13,2	20	27
RC7	9,8	45	28
RC8	9,3	28	> 60
RC9	12,2	26	31
RC10	14,9	55	> 60
RC11	9,20	32	> 60
RC12	8,92	42	18
RC13	15,0	45	12
RC14	13,3	52	35
RC15	10,9	58	39
RC16	11,3	72	35
RC17	12,5	39	> 60
RC18	11,4	26	25
RC19	10,2	56	> 60
RC20	10,5	54	> 60
RC21	11,1	42	> 60
RC22	9,93	45	> 60

ника Бунзена» дає змогу зробити висновки та певні рекомендації щодо застосування графітів та неорганічних носіїв для виготовлення рулонних вогнезахисних покриттів.

Покриття демонструють різну здатність до обмеження теплопередачі, що свідчить про неоднакову ефективність спучення, формування коксового шару та теплоізоляційних властивостей матеріалів. Найефективніші покриття – ті, де крива температури виходить на плато на рівні нижче за 300–350 °C, що вказує на стабільне термоізолююче спучення з утворенням міцного коксового шару.

Як підтверджено порівнянням залежності температури від часу для рулонного покриття RC1 з іншими зразками (табл. 3), терморозширюваний графіт у будь-яких кількостях не може бути самостійним інтумесцентним компонентом у парі полімер / графіт. Задовільні вогнезахисні властивості полімеру надають добавки графіту лише у складі з APP або APP / MA / PE.

Зразки RC12–RC13 та RC19–RC22, що містять IFR з варіацією графітових наповнювачів (EG, SG), підтверджують, що оптимальні результати досягаються за використання EG у невеликих кількостях (до 5%), а SG – до 1%.

Добавки EG є доцільними в системі APP / MA / PE / полімер, які характе-

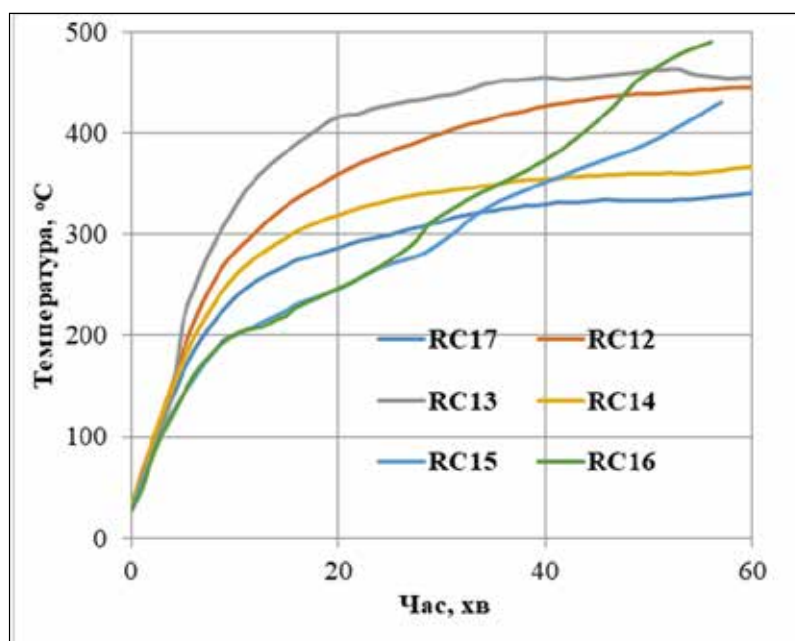


Рис. 4. Залежність температури на зворотному боці пластини від часу для рулонних покриттів RC12–RC17

рижуються раннім інтенсивним спученням за T 150–200 °C, як, наприклад, IFR6. Незалежно від типу неорганічної підкладки рулонні покриття RC8 (мат із керамоволокна + IFR6), RC10 (сітка із скловолокна + IFR6), RC11 (Lapinus, CF-50 + IFR6) у присутності EG забезпечують межу вогнестійкості $R > 60$ хв. Аналогічні рулонні покриття з інтумесцентним складом IFR5, який спучується за $T > 220$ °C, RC5–RC7 (табл. 3) здатні забезпечити межу вогнестійкості R лише 19–28 хв.

Порівняння температурних кривих для різних RC свідчить, що ефективність зниження температури на зворотному боці пластини залежить насамперед від рецептури IFR. Покриття на основі IFR6 (RC8–RC11) демонструють помітно кращі характеристики порівняно з IFR1–IFR3. Це вказує на важливість присутності всіх трьох компонентів інтумесцентної тріади (APP / MA / PE) у складі IFR, а також можливий синергізм із графітовими наповнювачами.

Тип неорганічної підкладки також впливає на результат. Покриття з сіткою зі скловолокна (RC7, RC10, RC19) забезпечують кращу термоізоляцію порівняно з покриттями на мінерало- або керамоволокнистій підкладці. Сітка зі скловолокна зміцнює утворений коксовий шар: вона

«вплітається» в структуру піни, підвищуючи її механічну стабільність і стійкість до руйнування. У випадках RC6, RC9 (волокна Cem fil або Lapinus) спостерігається зменшення коефіцієнта спучення, що, ймовірно, пов'язано з пригніченням цього процесу через високу щільність неорганічних волокон. Зниження кількості волокна призводить до зниження міцності та гнучкості рулонного виробу.

Найбільш ефективним і привабливим у практично-промисловій площині є рулонне покриття на основі сітки зі скловолокна. За результатами спалення покриттів за методом «пальника Бунзена», а також за візуальними спостереженнями присутність сітки в IFR не впливає на спучувальні та вогнестійкі властивості покриття. Ба більше, у ряді випадків вона слугує додатковим армувальним інструментом, що зміцнює утворений коксовий шар.

Висновки

Таким чином, проведені дослідження дають змогу стверджувати, що:

- домішки терморозширюваного графіту є доцільними в інтумесцентну складову рулонного покриття (APP/MA/PE/полімер), яка самостійно спучується за T 150–200 °C;
- найкращу вогнезахисну ефективність демонструють системи APP / MA / PE / полімер, які містять не більше ніж 5% термороз-

ширюваного графіту (EG) та не більше ніж 1% спученого графіту (SG);

– вогнезахисні властивості рулонного матеріалу, де як неорганічна підкладка використовується сітка із скловолокна, перевершують аналогічні характеристики з додаванням Cem fil (скловолокна) та Larinus (мінерало-

волокна), які пригнічують процес спучення через високу щільність неорганічних волокон.

Запропоновані підходи до виготовлення рулонних вогнезахисних матеріалів можуть бути використані в промисловому виробництві для створення ефективних засобів мобільного вогнезахисту.

Список використаної літератури

Amir N., Ahmad F., Megat-Yusoff P.S.M. Study on the Fibre Reinforced Epoxy-Based Intumescent Coating Formulations and their Char Characteristics. *Journal of Applied Sciences*. 2011. Vol. 11. P. 1678–1687. <https://doi.org/10.3923/jas.2011.1678.1687>.

Amir N., Ahmad F., Megat Yusoff P.S.M. Char Strength of Wool Fibre Reinforced Epoxy-Based Intumescent Coatings (FRIC). *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 626. P. 504–508. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.626.504>.

Brent K.M., T'ien J.S. Performance optimization of thin fire blankets by varying their radiative properties. *Journal of Fire Sciences*. 2022. Vol. 40 (1). P. 26–43. <https://doi.org/10.1177/07349041211050328>.

Chin W.K., Mulkern T.J., Tewarson A. Fire-Resistant and Fragment Penetration-Resistant Blankets for the Protection of Stored Ammunition. Aberdeen Proving Ground, MD: *Army Research Laboratory*, 2000. 71 p. [Електронний ресурс]. URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA383514/page/n3/mode/2up (дата звернення: 14.03.2025).

Gernay T. Performance-based design for structures in fire: Advances, challenges, and perspectives. *Fire Safety Journal*. 2024. Vol. 142. 104036. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104036>.

Gravit M., Korolchenko D., Nedviga E., Portnov F., Diachenko S. Impact of jet fires on steel structures: application of passive fire protection materials. *Fire*. 2024a. Vol. 7. 281. <https://doi.org/10.3390/fire7080281>.

Gravit M., Prusakov V., Shcheglov N., Kotlyarskaya I. Fire protection of steel structures of oil and gas facilities: multilayer, removable, non-combustible covers. *Fire*. 2024b. No. 7. 86. <https://doi.org/10.3390/fire7030086>.

Kalafat K., Taran N., Plavan V., Bessarabov V., Zagoriy G., Vakhitova L. Comparison of fire resistance of polymers in intumescent coatings for steel structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. No. 4 (10 (106)). P. 45–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209841>.

Kmeťová E., Kačíková D., Kačík F. The Effect of intumescent coating containing expandable graphite onto spruce wood. *Coatings*. 2024. Vol. 14. 490. <https://doi.org/10.3390/coatings14040490>.

Ma L., Song Q., Dong F., Yang H., Xia Z., Liu J. Effect of organic-inorganic mixed intumescent flame retardants on fire-retardant coating. *Coatings*. 2024. Vol. 14. 1034. <https://doi.org/10.3390/coatings14081034>.

Nolan D.P. Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities. Westwood: Noyes Publications, 2019. 426 p.

Otáhal R., Veselý D., Nášadová J., Zíma V., Němec P., Kalenda P. Intumescent coatings based on an organic-inorganic hybrid resin and the effect. *Pigment & Resin Technology*. 2011. Vol. 40 (4). P. 247–253. <https://doi.org/10.1108/0369942111114732613>.

Shiu B.C., Huang C.H., Yang H.L., Chen Y.S., Lou C.W., Lin J.H. Construction sheets made of high-performance flame-retardant nonwoven fabrics and combustion-resistant polyurethane foam: preparation process and property evaluations. *Polymers*. 2023. Vol. 15 (4). 953. <https://doi.org/10.3390/polym15040953>.

Steau E., Mahendran M., Poologanathan K. Experimental study of fire resistant board configurations under standard fire conditions. *Fire Safety Journal*. 2020. Vol. 116. 103153. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103153>.

Takahashi F. Fire blanket and intumescent coating materials for failure resistance. *MRS Bulletin*. 2021. Vol. 46. P. 429–434. <https://doi.org/10.1557/s43577-021-00102-7>.

Tewarson A., Wu P.K., Chin W.K., Shuford R. Fire Blankets for Munition Protection: Flame and Heat Blocking Properties of Advanced Materials. *Army Research Laboratory*, 2001. 55 p.

[Електронний ресурс]. URL: https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA_387272.pdf (дата звернення: 12.02.2025).

Triantafyllidis Z., Bisby L. A. Fibre-reinforced intumescent fire protection coatings as a confining material for concrete columns. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 231. 117085. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117085>.

Vakhitova L., Kalafat K., Vakhitov R., Drizhd V. Improving the fire-retardant performance of industrial reactive coatings for steel building structures. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. e34729. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34729>.

Wang K., Le H. The development of cement-based, intumescent and geopolymer fire-retardation coatings for metal structures: a review. *Coatings*. 2023. Vol. 13. 495. <https://doi.org/10.3390/coatings13030495>.

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. *Surface Engineering*. 2019. Vol. 36 (4). P. 334–363. <https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1636536>.

Zheng Z., Liu Y., Zhang L., Wang H. Synergistic effect of expandable graphite and intumescent flame retardants on the flame retardancy and thermal stability of polypropylene. *Journal of Materials Science*. 2016. Vol. 51 (12). P. 5857–5871. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-9887-6>.

References

Amir, N., Ahmad, F., & Megat-Yusoff, P.S.M. (2011). Study on the fibre reinforced epoxy-based intumescent coating formulations and their char characteristics. *Journal of Applied Sciences*, 11, 1678–1687. <https://doi.org/10.3923/jas.2011.1678.1687> [in English].

Amir, N., Ahmad, F., & Megat Yusoff, P. S. M. (2013). Char strength of wool fibre reinforced epoxy-based intumescent coatings (FRIC). *Advanced Materials Research*, 626, 504–508. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.626.504> [in English].

Brent, K.M., & T'ien, J.S. (2022). Performance optimization of thin fire blankets by varying their radiative properties. *Journal of Fire Sciences*, 40 (1), 26–43. <https://doi.org/10.1177/07349041211050328> [in English].

Chin, W.K., Mulkern, T.J., & Tewarson, A. (2000). Fire-resistant and fragment penetration-resistant blankets for the protection of stored ammunition (ARL-TR-2285). *Army Research Laboratory*. [Electronic resource] URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA383514/page/n3/mode/2up (access date 14.03.2025) [in English].

Gernay, T. (2024). Performance-based design for structures in fire: Advances, challenges, and perspectives. *Fire Safety Journal*, 142, 104036. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104036> [in English].

Gravit, M., Korolchenko, D., Nedviga, E., Portnov, F., & Diachenko, S. (2024a). Impact of jet fires on steel structures: Application of passive fire protection materials. *Fire*, 7, 281. <https://doi.org/10.3390/fire7080281> [in English].

Gravit, M., Prusakov, V., Shcheglov, N., & Kotlyarskaya, I. (2024b). Fire protection of steel structures of oil and gas facilities: Multilayer, removable, non-combustible covers. *Fire*, 7, 86. <https://doi.org/10.3390/fire7030086> [in English].

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. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (10 (106)), 45–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209841> [in English].

Kmeťová, E., Kačíková, D., & Kačík, F. (2024). The effect of intumescent coating containing expandable graphite onto spruce wood. *Coatings*, 14, 490. <https://doi.org/10.3390/coatings14040490> [in English].

Ma, L., Song, Q., Dong, F., Yang, H., Xia, Z., & Liu, J. (2024). Effect of organic-inorganic mixed intumescent flame retardants on fire-retardant coating. *Coatings*, 14, 1034. <https://doi.org/10.3390/coatings14081034> [in English].

Nolan, D.P. (2019). Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities (4th ed.). Noyes Publications [in English].

- Otáhal, R., Veselý, D., Násadová, J., Zíma, V., Němec, P., & Kalenda, P. (2011). Intumescent coatings based on an organic-inorganic hybrid resin and the effect. *Pigment & Resin Technology*, 40 (4), 247–253. <https://doi.org/10.1108/03699421111147326> [in English].
- Shiu, B.C., Huang, C.H., Yang, H.L., Chen, Y.S., Lou, C.W., & Lin, J.H. (2023). Construction sheets made of high-performance flame-retardant nonwoven fabrics and combustion-resistant polyurethane foam: Preparation process and property evaluations. *Polymers*, 15 (4), 953. <https://doi.org/10.3390/polym15040953> [in English].
- Steau, E., Mahendran, M., & Poologanathan, K. (2020). Experimental study of fire resistant board configurations under standard fire conditions. *Fire Safety Journal*, 116, 103153. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103153> [in English].
- Takahashi, F. (2021). Fire blanket and intumescent coating materials for failure resistance. *MRS Bulletin*, 46, 429–434. <https://doi.org/10.1557/s43577-021-00102-7> [in English].
- Tewarson, A., Wu, P.K., Chin, W.K., & Shuford, R. (2001). Fire blankets for munition protection: Flame and heat blocking properties of advanced materials (ARL-TR-2398). *Army Research Laboratory*. [Electronic resource] URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA387272.pdf> (access date 12.02.2025) [in English].
- Triantafyllidis, Z., & Bisby, L.A. (2020). Fibre-reinforced intumescent fire protection coatings as a confining material for concrete columns. *Construction and Building Materials*, 231, 117085. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117085> [in English].
- Vakhitova, L., Kalafat, K., Vakhitov, R., & Drizhd, V. (2024). Improving the fire-retardant performance of industrial reactive coatings for steel building structures. *Heliyon*, 10, e34729. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34729> [in English].
- Wang, K., & Le, H. (2023). The development of cement-based, intumescent and geopolymer fire-retardation coatings for metal structures: A review. *Coatings*, 13, 495. <https://doi.org/10.3390/coatings13030495> [in English].
- 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. *Surface Engineering*, 36 (4), 334–363. <https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1636536> [in English].
- Zheng, Z., Liu, Y., Zhang, L., & Wang, H. (2016). Synergistic effect of expandable graphite and intumescent flame retardants on the flame retardancy and thermal stability of polypropylene. *Journal of Materials Science*, 51 (12), 5857–5871. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-9887-6> [in English].

Отримано: 23.04.2025
Прийнято: 15.05.2025