

**БАХІТОВА**

Любов Миколаївна — кандидат хімічних наук, провідний науковий співробітник відділу досліджень нуклеофільних реакцій Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України

ПРИКЛАДНА ХІМІЧНА НАУКА ДЛЯ СТВОРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВОГНЕЗАХИСТУ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

За матеріалами доповіді на XXXIV читаннях академіка В.І. Вернадського «Рятівна роль науки в часи війн і суспільних криз»

Обговорено шляхи реалізації завдань прикладної тематики НАН України зі створення інноваційних технологій вогнезахисту сталевих конструкцій. Продемонстровано механізми втілення результатів фундаментальних досліджень у розроблення засобів пасивного вогнезахисту з подальшим впровадженням у промислове виробництво та застосуванням у будівельній галузі. Розглянуто фактори, що впливають на вогнезахисну ефективність реактивних покриттів: природа полімерної складової, співвідношення основних компонентів інтумесцентної системи, вміст і структура наноглин тощо. Запропоновано алгоритм прямих випробувань вогнезахисної ефективності в процесі розроблення рецептури інтумесцентного покриття. Отримані результати підтверджено повномасштабними вогневими випробуваннями, проведеними за європейськими та адаптованими національними стандартами.

XXXIV читання академіка В.І. Вернадського відбулися у важкий складний для нашої країни час — «час війни і суспільних криз», як зазначено в назві конференції. Звичайно, ми віримо в майбутнє України, як вірив засновник і перший президент Української академії наук Володимир Іванович Вернадський. Однак крім віри від кожного з нас потрібні конкретні дії, які б наблизили перемогу й були корисними в масштабній відбудові нашої країни. І сьогодні настав той критичний час, коли життєво необхідно усвідомити важливість продиктованих попередніми етапами розвитку ноосфери концепцій, які раніше, можливо, й не здавалися такими вже значущими, — сталий розвиток, циркулярна економіка, зелена хімія тощо. Безумовно, втілення цих концепцій неможливе без розвитку прикладної науки, орієнтованої на застосування наукових знань для забезпечення науково-технічного прогресу та поліпшення якості життя людей.

Ще на початку ХХ ст. В.І. Вернадський визначив основні принципи проведення наукових досліджень [1, 2], один з яких

полягає в запереченні тези «наука задля науки». Перший президент Академії був переконаний, що дослідники мають спеціалізуватися не за науковими напрямками, а за проблемами, які виникають у процесі розвитку людства та еволюції, і прагнути «пов'язувати науку з іншими галузями знань, із суспільним життям» [1, с. 14].

Сучасній науці потрібні стратегії, які визнаються актуальністю досліджень, інноваційні розробки, які з дослідницького середовища переходять у комерційне русло, проекти, які можуть у короткій перспективі поліпшити якість життя, підвищити безпеку, боротися із захворюваннями, епідеміями тощо. Саме ці завдання задають вектор на визначення реальних пріоритетів та спрямування досліджень у сферу практичного втілення. Тому розвиток прикладної науки як ефективної ланки між надбанням фундаментальної науки та виробником кінцевого продукту є запорукою перемоги в будь-якому економічному чи історичному змаганні.

Ця публікація є невеликим екскурсом та стислим підбиттям підсумків виконання прикладної тематики під назвою «пасивний вогнезахист», яке протягом останніх десятиліть тривало в Інституті фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка (ІнФОВ) НАН України і фінансувалося Національною академією наук України.

Історія національної вогнезахисної галузі в частині виробництва і застосування засобів пасивного вогнезахисту розпочалася в Донецьку в 1990-х роках, коли в ІнФОВ НАН України було розроблено перше сертифіковане вогнезахисне покриття для сталевих конструкцій — Ендотерм ХТ-150 [3, 4]. Саме ця розробка згодом привела до створення науково-виробничого підприємства «Спецматеріали», яке мало статус підрозділу НАН України і впродовж тривалого часу було провідним підприємством з виробництва вогнезахисних засобів. Завдяки науковій, творчій та госпдоговірній співпраці підприємства та Інституту було розроблено й реалізовано на практиці цілу низку проектів: технології отримання вогнезахисних реактив-

них покриттів нового покоління, термостійких клеїв та герметиків для боєголовок крилатих ракет, оригінальних полімерних антипіренів та ін. [4–7]. Ці продукти використовують передусім для вогнезахисту об'єктів стратегічного значення, зокрема споруд ВПК, складів боєприпасів, машинних залів АЕС тощо [8, 9]. У 2015 р. донецькі фахівці створили вже в Києві нове підприємство з виробництва засобів пасивного вогнезахисту «Ковлар Груп», що дозволило за останні 10 років у співпраці з ІнФОВ НАН України отримати вагомі наукові результати та практичні здобутки, про які йтиметься нижче.

Серед підсумків успішної реалізації прикладної наукової тематики з умовною назвою «пасивний вогнезахист» слід відзначити продуктивність зсуву прикладної науки в бік тіснішої взаємодії з фундаментальною наукою з подальшим впровадженням отриманих результатів у виробництво засобів вогнезахисту. Застосування цих продуктів у будівельній галузі має реальний соціальний ефект, оскільки дотримання нормативів пожежної безпеки зберігає людські життя та матеріальні цінності.

Найбільшим досягненням 30-річної колаборації вогнезахисної науки з виробниками засобів пасивного вогнезахисту є той факт, що на сьогодні національна галузь пасивного вогнезахисту перебуває на світовому рівні: в Україні виробляють майже всі групи матеріалів пасивного захисту, які є на глобальному вогнезахисному ринку. При цьому цільові характеристики продукції не поступаються, а в деяких випадках навіть перевищують показники провідних світових аналогів.

Пасивний вогнезахист: основні поняття та застосування. Пасивний вогнезахист — це захист будівельних конструкцій, спрямований на зменшення впливу або запобігання поширенню вогню, з використанням спеціальних матеріалів — засобів вогнезахисту (рис. 1).

Пасивний вогнезахист підвищує стійкість будівельних конструкцій до впливу різних факторів пожежі: полум'я, температури, продуктів згоряння тощо. Засоби вогнезахисту поділяють на такі групи:

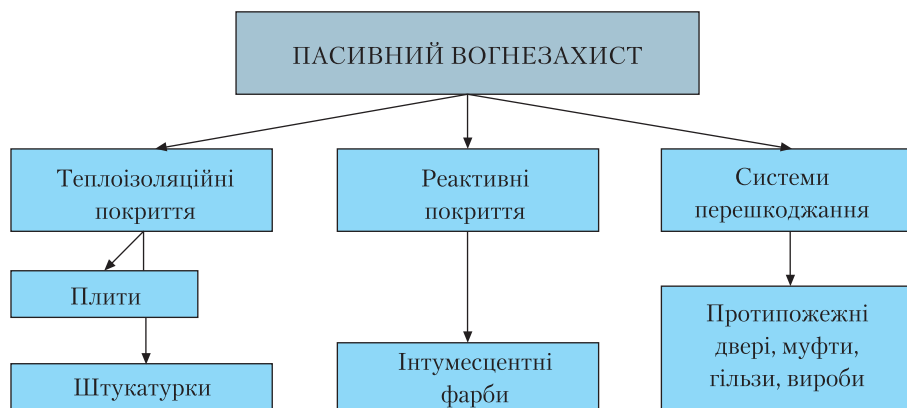


Рис. 1. Структура системи пасивного вогнезахисту будівельних конструкцій

• *теплоізоляційні покриття* (штукатурки, плити, облицювання, мати), які забезпечують вогнестійкість будівельних конструкцій завдяки підвищенню теплоізоляційних характеристик (рис. 2а);

• *реактивні (інтумесцентні) вогнезахисні покриття*, які в умовах високих температур внаслідок хімічних реакцій істотно збільшуються за товщиною та змінюють геометричну форму (спучуються), забезпечуючи вогнезахист завдяки ендотермічному та теплоізоляційному ефектам (рис. 2б);

• *системи перешкоджання* (протипожежні двері, муфти, гільзи та інші вироби).

У разі сталевих несівних конструкцій термін «вогнезахист» набуває більш конкретного значення, яке полягає в застосуванні вогнезахисних матеріалів та конструктивів з метою підвищення вогнестійкості металу. Межа вогнестійкості (R) сталевій конструкції означає проміжок часу від початку вогневого випробування зразка до втрати ним несівної здатності.

Слід зазначити, що вогнезахист будівельних конструкцій — це вид господарської діяльності, що підлягає обов'язковій сертифікації. Відповідно, будь-яку нову рецептуру засобу пасивного вогнезахисту можна вважати завершеною науковою розробкою лише за умови проведення в ліцензованих лабораторіях вогневих випробувань з визначенням згідно з національним законодавством параметрів R . Загалом вогневі випробування є вкрай складною в експериментальному плані та фінан-

сово затратною процедурою. Наприклад, для випробувань одного вогнезахисного складу за нормами ДСТУ [10] потрібно використати близько 2 т металевих конструкцій, з яких виготовляють зразки колон завдовжки 2 м з нанесеними на них приблизно 300 кг вогнезахисного покриття. Тому без партнерської співпраці та спонсорської допомоги від потенційного виробника чи споживача будь-яку створену науковцями розробку засобів пасивного вогнезахисту можна просто покласти на полицю.

На рис. 3 показано, як виглядають вогневі випробування розробленої у 2021 р. інтумесцентної фарби FS-120, що забезпечує межу вогнестійкості сталевих конструкцій (R) понад 120 хв. За своєю вогнезахисною ефективністю фарба FS-120 порівняно зі світовими аналогами є цілком конкурентоспроможною. Споживачам її пропонують разом із супровідними документами і протоколами випробувань, проведених у сертифікованому випробувальному центрі «Тест».

Об'єкти та завдання прикладного дослідження. Головним об'єктом наших досліджень є реактивні (інтумесцентні) вогнезахисні системи (IFR), що мають у своєму складі три компоненти [11–13]:

1) *донор кислоти* — зазвичай це сіль нелеткої неорганічної кислоти, наприклад борної, сульфатної або фосфатної, яка за температур, що перевищують 150 °С, виділяє кислоту;

2) *карбонізувальний агент* — вуглецева сполука з великою кількістю гідроксильних груп,



Рис. 2. Вогнезахист сталевих конструкцій з використанням: *а* – штукатурки; *б* – реактивного покриття

Рис. 3. Вогневі випробування інтумесцентного покриття FS-120 за ДСТУ Б В.1.1-14:2007: *а* – зовнішній вигляд зразків до випробувань; *б* – зовнішній вигляд зразків після випробувань протягом 120 хв. Випробування було проведено у випробувальному центрі «Тест»



яка зневоднюється під час реакцій естерифікації та карбонізації;

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

Сучасні інтумесцентні фарби, які виробляють промислово, є водними або органорозчинними високонаповненими композиціями (до 80 % н.р.) з досить сталою рецептурою складу IFR – поліфосфат амонію (АРР)/меламін

(МА)/пентаеритрит (РЕ). ІЧ-спектри водних або органорозчинних покриттів від відомих світових брендів наведено у монографії [10].

Загалом мету наших прикладних досліджень за тематикою пасивного вогнезахисту можна сформулювати так: створення нових вітчизняних технологій реактивного вогнезахисту з характеристиками продукту, що забезпечують його конкурентоспроможність на світовому ринку. Така узагальнена мета зумовлена двома основними факторами. По-перше, вимоги до

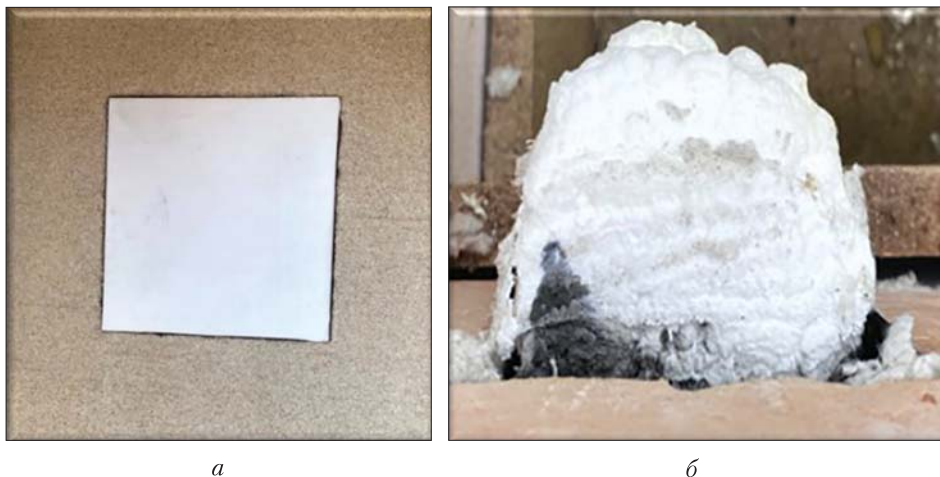


Рис. 4. Вогневі випробування у міні-печі в умовах «стандартної пожежі»: *a* — зовнішній вигляд покриття до випробування; *б* — вигляд спученого шару після 120 хв випробувань

межі вогнестійкості інтумесцентного покриття сталевих конструкцій постійно зростають. Так, на початку 2000-х років «нормальною» вогнезахисною ефективністю покриття вважали $R = 45\text{--}60$ хв, а на сьогодні, внаслідок стрімкого розвитку інноваційних вогнезахисних технологій, цей показник підвищився до $R = 90\text{--}180$ хв. По-друге, відсутність на ринку України вітчизняного продукту з підвищеною вогнезахисною ефективністю означає неминуче зростання обсягів імпортованої продукції, яка в середньому вдвічі дорожча.

Саме тому дуже важливо досить швидко переорієнтувати фундаментальні наукові дослідження в практичну площину, оскільки лише так можна задовольнити запит протипожежної безпеки на наявність сучасних засобів вогнезахисту, а будівельної галузі — на зниження вартості металевих будівництва в Україні.

Річ у тім, що витрати на вогнезахист сталевих конструкцій в Україні можуть сягати 40–45 % вартості самих конструкцій. Водночас у країнах ЄС за останні 30 років частку протипожежного захисту у вартості сталевих каркасів в комерційних багатоповерхових будинках вдалося зменшити до 10–15 % [10]. Це стало можливим завдяки спільній планомірній роботі інженерів, фахівців з пожежної безпеки та науковців, які розробляють інноваційні ефективні вогнезахисні технології, попит на які зростає у світі пропорційно розвитку сталевих будівництва.

Є кілька основних напрямів удосконалення вогнезахисних покриттів для зменшення фінансового навантаження вогнезахисної обробки на вартість сталевих будівництва:

- відбір ефективних хімічних компонентів для зменшення ціни засобів вогнезахисту;
- оптимізація складу покриттів за співвідношенням компонентів для підвищення вогнезахисної ефективності;
- пошук нових комерційно доступних домішок та каталітичних систем для зменшення товщини покриття і збільшення термінів експлуатації;
- застосування сучасних систем регулювання реології фарби.

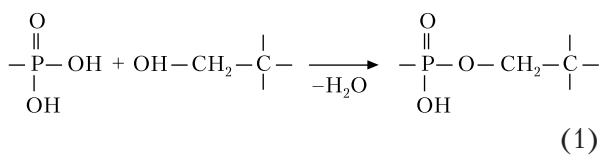
Аналіз запропонованих підходів свідчить, що всі вони так чи інакше пов'язані з хімічною наукою, оскільки передбачають вивчення механізмів хімічних перетворень, створення ефективних каталітичних систем та реакційних середовищ, які гарантують побудову міцного і стійкого в часі теплоізоляційного коксового шару з інтумесцентного покриття.

Фундаментальні дослідження хімічних перетворень у системі донор кислоти/ карбонізувальний агент/газоутворювач в умовах високих температур. Вогнезахисна функція покриття інтумесцентного типу реалізується внаслідок створення на поверхні конструкції теплозахисного коксового шару (рис. 4). Рівень вогнезахисту визначається характеристиками утвореного шару (теплопровідність, в'язкість

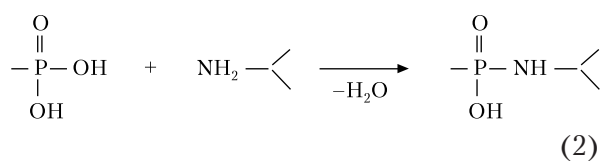
у розплавленому стані, міцність, адгезія до підкладки тощо), які прямо залежать від компонентного складу, механізмів та швидкості високотемпературних перетворень складових IFR.

За 50 років фізико-хімічних досліджень IFR накопичено значний експериментальний матеріал, який дозволяє побудувати теоретичні основи інтумесцентного вогнезахисту. В цьому контексті слід відзначити основоположні праці з вивчення механізмів хімічних взаємодій між компонентами IFR за високих температур [11–13], узагальнення фізичних аспектів побудови коксового каркаса [14], розгляду ефектів антипіренів, наноречовин та інших компонентів для підвищення вогнезахисної ефективності IFR [15–17], а також найбільш інформативні огляди за цією тематикою [18–20].

Основна відмінність наших досліджень полягає в тому, що IFR-композиція (донор кислоти/карбонізувальний агент/газоутворювач) розглядається як реакційне середовище, що містить у своєму складі електрофільний агент з п'ятикоординатним атомом фосфору (APP) та O- і N-нуклеофіли (PE і MA відповідно). Це приклад класичної нуклеофільної системи, в якій було доведено [11–13] перебіг алкоголізу (1) з утворенням O=P–O–C зв'язку, що формує просторові структури коксового шару – основу теплоізоляційного каркаса:



За результатами систематичних досліджень методами ІЧ- та ЯМР-спектроскопії хімічного складу коксу IFR-системи APP/MA/PE, що утворюється в інтервалі температур 100–400 °С, було вперше встановлено [21–23], що паралельно з алкоголізом (1) відбувається реакція нуклеофільного заміщення (2) між фосфорною кислотою (або її похідними) та аміном:



При цьому міцність і термостійкість коксового шару зростає з підвищенням ступеня утворення в системі фосфамідного зв'язку –P–N= за маршрутом (2).

Гіпотезу про подвійну функцію амінів в інтумесцентній поліфосфатній системі газоутворювача (термодеструкція до негорючих газів) та нуклеофільного агента (аміноліз електрофільних субстратів) з побудовою коксового шару підтверджують результати вивчення механізму хімічних реакцій та параметрів спученого шару системи APP/амін/PE [23]. Встановлено також, що лінійні діаміни не утворюють з фосфатами термостабільні просторово розгалужені фосфамідні сполуки. Водночас в ІЧ-спектрах коксових залишків систем з меламіном, диціандіамідом та гуанідином спостерігаються смуги поглинання зв'язків P–N–C (1070–1050 см⁻¹) та P–N (980–950 см⁻¹) до температури утвореного коксу 700 °С.

Отримані результати узгоджуються з результатами вогневих випробувань, проведених за ДСТУ Б В.1.1-14:2007, що дозволяє встановити залежність між структурою, кількістю аміну та значенням межі вогнестійкості металоконструкції, яку забезпечує вогнезахисне покриття (рис. 5). Відбір співвідношень меламіну, диціандіаміду та карбаміду в реактивному покритті для забезпечення відповідних меж вогнестійкості (*R*) дає змогу на 10–15 % знизити ціну вогнезахисту сталевих конструкцій при зведенні будівель та споруд IIIб та IV ступеня вогнестійкості [22].

Ці дослідження привели нас до ідеї, що за допомогою незначного варіювання якісного та кількісного складу вихідної інтумесцентної фарби можна регулювати вогнезахисну ефективність реактивного покриття від мінімальних (*R* = 15–30) до максимальних (*R* ≥ 90) значень.

Крім інтумесцентної системи APP/MA/PE реактивні вогнезахисні покриття обов'язково містять полімерну складову. Для покриттів бюджетного сегменту, які найчастіше застосовують в Україні, це співполімери вінілацетату (EVA), стиролакрилату (SA) чи їх галогеновані похідні. Присутність у полімері ненасиченого атома С (карбонільна група С=O)

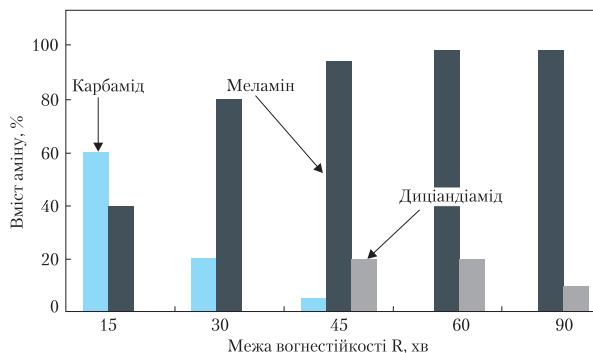


Рис. 5. Приблизні співвідношення амінів (%) в інтумесцентному покритті для забезпечення відповідних меж вогнестійкості (R , хв) сталевих конструкцій за ДСТУ Б В.1.1-14:2007

відкриває ще один шлях для побудови коксового шару — алкоголіз та аміноліз полімерної складової з боку пентаеритриту та аміну. ІЧ-спектроскопічні дослідження продуктів терморозкладання покриттів IFR-EVA (водна фарба з вінілацетатним полімером EVA) та IFR-SA (органорозчинна фарба зі стиrolакрилатним полімером) за температур 350–700 °C дає змогу встановити основні хімічні перетворення, що відбуваються в зразках IC1 при зростанні температури [24].

За температури 350–420 °C зміни в IFR-системах проявляються в появі смуг 1245 cm^{-1} ($\text{O}=\text{P}-\text{O}-\text{C}$) та 1020 cm^{-1} ($\text{O}=\text{P}-\text{N}-\text{C}$), які відповідають валентним коливанням групи $\text{P}=\text{O}$. Ці смуги свідчать про етерифікацію PE поліфосфорною кислотою, а також про аміноліз МА чи його похідними фрагментів фосфорної кислоти. Більш істотні перетворення відбуваються за температури 550 °C. З одного боку, зменшуються смуги поглинання в області 3380–3100 cm^{-1} , що належать OH -групам PE та NH_2 -групам МА, а також смуга 1275 cm^{-1} , що відповідає коливанням $\text{P}=\text{O}$ поліфосфату амонію. З іншого боку, наявність у спектрах смуг 1210, 980 і 750 cm^{-1} ($\text{P}-\text{N}$) свідчить про утворення в системі фосфамідних зв'язків.

Деталізація за допомогою методів ІЧ- та ЯМР-спектроскопії механізму термічного розкладання співполімерів EVA і SA у складі IFR засвідчує утворення оцтової та акрилової

кислот (1730–1650 cm^{-1} , $-\text{C}=\text{O}$). Поява нових смуг поглинання в ділянці спектра 1650–1550 cm^{-1} є результатом утворення амідних зв'язків $-\text{C}(\text{O})\text{NH}_2$ між кислотами та аміаком і меламіном (1580–1490 cm^{-1} , $-\text{C}(\text{O})\text{NH}$).

Аналіз ІЧ-спектрів продуктів термолізу IFR-EVA за температур 250 і 400 °C дозволяє виокремити основні напрями позитивної дії монтморилоніту, який додають у систему в кількості 1 % мас.: каталіз процесів деструкції APP і, як наслідок, конденсація APP з PE за маршрутом, що забезпечує збереження полімерної структури APP з утворенням більш термостійких структур коксового шару; інгібування термічної деструкції співполімеру EVA завдяки утворенню нанокомпозиту полімер–наноглина, що зменшує присутність в інтумесцентному шарі горючих продуктів розпаду EVA [25].

Дослідження механізмів хімічних перетворень значного масиву вінілацетатних та акрилатних співполімерів [24, 26] дозволили поділити полімери на три групи за механізмами термодеструкції, а отже, і за перебігом процесу спучення та фізичними характеристиками вуглецевих шарів:

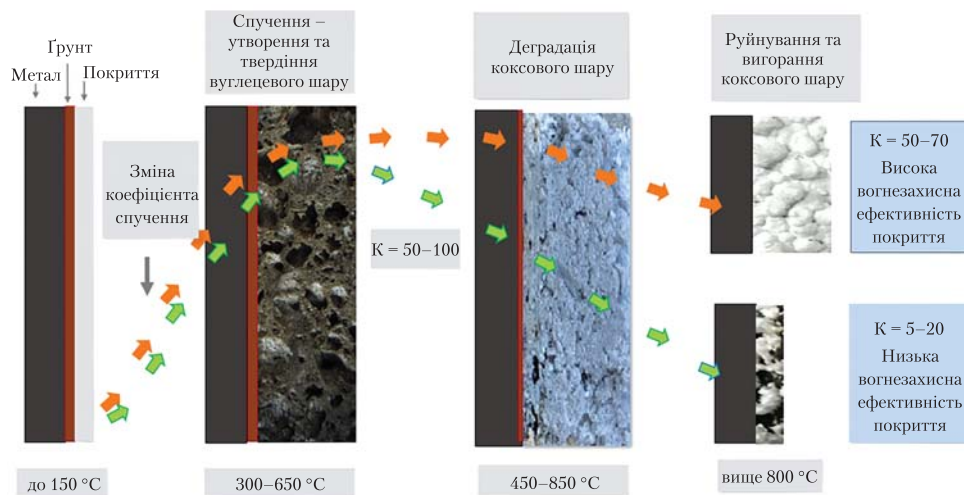
1) *вінілацетатні співполімери* (вінілацетат-етилен, вінілацетат-етилен-вінілверсатат, полівінілацетат). Зі зростанням вуглецевого каркаса (коефіцієнт спучення K , $\text{cm}^3/\text{г}$) основні хімічні процеси відбуваються в інтервалі температур 350–650 °C. Покриття характеризуються на цьому температурному інтервалі тривалою стабілізаційною ділянкою сталості коефіцієнта спучення K ;

2) *галогеновані вінілацетатні співполімери* (вінілацетат-вінілхлорид, вінілацетат-хлорид). Ці покриття характеризуються більш раннім (< 300 °C) та стрімким спученням зі скороченою ділянкою стабілізації K в інтервалі 350–550 °C;

3) *стирол-акрилатні полімери* також демонструють у покриттях стрімке спучення (за 250 °C) та скорочення стабілізаційної ділянки коефіцієнта K за температур від 300 до 550 °C.

Фундаментальні дослідження механізмів високотемпературних перетворень IFR складу APP/МА/PE/полімер засвідчили, що полі-

Рис. 6. Температурні режими формування коксового шару інтумесцентних вогнезахисних систем



мерна складова є фактором регулювання вогнезахисної ефективності реактивного покриття. Вперше за результатами повномасштабних вогневих випробувань було продемонстровано, що для забезпечення межі вогнестійкості $R = 30-45$ хв доцільно застосовувати інтумесцентні покриття на основі стиролакрилатних або вінілтолуолакрилатних полімерів. Вінілові та вінілацетатні полімери є оптимальними складовими інтумесцентних покриттів для забезпечення межі вогнестійкості сталевих конструкцій $R = 60$ хв і вище [24].

Вивчення впливу наноглин на весь життєвий цикл покриттів інтумесцентного типу було і є предметом наших фундаментальних досліджень та прикладних застосувань, основні результати яких наведено в роботах [25–28]. Серед позитивних ефектів від додавання наноглин у водні та органорозчинні IFR-системи насамперед слід відзначити такі: каталіз процесів коксоутворення; інгібування термодеструкції полімеру; структурна організація та зміцнення коксового шару; підвищення в'язкості розплаву покриття; поліпшення реології фарби; зниження димоутворення під час пожежі та ін.

Одним із напрямів оптимізації вогнезахисних інтумесцентних композицій складу APP/МА/полімер є пошук оптимального співвідношення основних сировинних матеріалів (APP,

МА та PE) покриття як інструменту керування вогнезахисними властивостями й економічними параметрами вогнезахисту [28]. Проведені лабораторні та вогневі випробування понад 50 IFR-композицій із варіюванням компонентного складу дозволяють констатувати, що співвідношення APP, МА та PE, а також їх вміст в IFR є регуляторами межі вогнестійкості сталевій конструкції. При цьому інтумесцентні системи складу APP:МА:PE в межах співвідношень 2:1:1 є ефективними для забезпечення значення $R = 30$ сталевій конструкції за товщини вогнезахисного покриття 0,4–0,5 мм. А використання інтумесцентних систем складу APP:МА:PE в приблизних співвідношеннях 3,5:1:1,5 і за товщини вогнезахисного покриття 1,6–1,7 мм з великою ймовірністю може забезпечити межу вогнестійкості $R > 60$.

Експериментальні дослідження процесів побудови та руйнування теплоізоляційного коксового шару шляхом поетапного вивчення фізичного стану коксу проводили в умовах термошафи, пальника Бунзена та мініпечі [26–28], а отримані прогнози щодо вогнезахисної ефективності реактивного покриття в багатьох випадках перевіряли повномасштабними випробуваннями (на обладнанні ТОВ «Спецматеріали» і ТОВ «Донстройтест»). Численні натурні експерименти підтвердили, що саме такий підхід до моделювання поведін-

Дані з протоколів випробувань розробленого інтумесцентного покриття FS-120 та покриття Nullifire SC801-120

Межа вогнестійкості R , хв	Приведена товщина δ , мм	Коефіцієнт перерізу, $A_m/V, \text{м}^{-1}$	Мінімальна товщина покриття, за якої температура нижча за 500°C , мм	
			FS-120	Nullifire SC801-120
60	5,00	200	1,95	1,78
90	5,00	200	3,53	3,66
120	5,00	200	5,20	5,20
150	6,25	160	6,28	не витримує

ки того чи іншого покриття в умовах зростання температур з аналізом утвореного вуглецевого шару на зразку з певними розміром і масою є прямим методом прогнозування вогнезахисної ефективності IFR. Процес спучення покриття з утворенням теплоізоляційного коксу (рис. 6) складається з послідовних стадій, температурний режим яких було визначено та узагальнено в публікаціях [24, 25, 28].

У цій доповіді обговорено лише окремі експериментальні підходи до вдосконалення рецептур покриттів інтумесцентного типу, які можна віднести до так званого бюджетного вогнезахисту. Отримані результати, а також використання технологічних ідей з підвищення вогнезахисної ефективності IFR дозволили розробити рецептуру та впровадити у виробництво інтумесцентне покриття FS-120 для сталевих конструкцій, яке забезпечує межу вогнестійкості $R = 150$ і вище.

Деякі характеристики вогнезахисної ефективності покриття, які підтверджено повномасштабними вогневими випробуваннями, проведеними за стандартом ENV 13381-4:2002, наведено в таблиці. Порівняння параметрів покриття FS-120, розробленого нами на основі описаних вище рецептурних узагальнень, з аналогічними показниками світового бренду інтумесцентного вогнезахисту Nullifire SC801

у діапазоні межі вогнестійкості $R = 60\text{--}150$ свідчить, що покриття FS-120 не поступається, а за $R = 150$ навіть перевершує вогнезахист Nullifire. Цей результат є найбільш вагомим нашим досягненням і підкреслює коректність застосованих експериментальних підходів та послідовних висновків, отриманих при виконанні дослідження.

Отже, ми коротко розглянули лише один напрям розвитку засобів пасивного вогнезахисту — створення покриттів реактивного типу. Сьогодні, зважаючи на виклики воєнного часу, науково-технічний потенціал фахівців Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України спрямовано на вирішення завдань та задоволення потреб протипожежної безпеки в оборонній галузі. Насамперед це створення тимчасових вогнезахисних екранів, рулонних матеріалів та інших виробів з подальшим їх впровадженням для мінімізації шкоди та збитків від пожеж, що виникають унаслідок ракетних та артилерійських обстрілів. Поєднання отриманих фундаментальною наукою теоретичних знань з виконанням прикладних проєктів та подальшим впровадженням наукових розробок у практичну діяльність є головною умовою ефективного вирішення нагальних проблем, які в умовах широкомасштабної війни постали зараз перед Україною.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Vernadsky V.I. *Osnovy kristallografii*. Part 1, Vol. 1. Moscow, 1904 [in Russian].
[Вернадский В.И. *Основы кристаллографии*. Часть 1, вып. 1. Москва: Изд-во Московского ун-та, 1904.]
2. Bezv T. Scientific worldview is methodological basis of Volodymyr Vernadsky's work. *Svitoglyad*. 2013. (1): 20–30.
[Бевз Т. Науковий світогляд — методологічна основа творчості Володимира Вернадського. *Світогляд*. 2013. № 1. С. 20–30.]
3. Patent of USSR N 1799886. Somova E.V., Rozov A.S., Reutov O.S., Alshanov Yu.I., Kostikov S.V., Drizhd L.P. Composition for heat-protective coatings. 08.15.1990.
[Патент СССР № 1799886. Сомова Е.В., Розов А.С., Реутов О.С., Альшанов Ю.И., Костиков С.В., Дрижд Л.П. Состав для теплозащитных покрытий. 15.08.1990.]
4. Patent of USSR N 1529687. Drizhd L.P., Kaida L.N., Prudchenko A.P., Batizat V.P. S-triazine-containing epoxy compounds as thermopolymerizing monomers for polymers and S-triazine-containing tetraphenols as intermediates for the synthesis of S-triazine-containing epoxy resins. 16.03.1988.
[Патент СССР № 1529687. Дрижд Л.П., Кайда Л.Н., Прудченко А.П., Батизат В.П. S-триазинсодержащие эпоксидные соединения в качестве термополимеризующихся мономеров для полимеров и S-триазинсодержащие тетрафенолы в качестве промежуточных соединений для синтеза S-триазинсодержащих эпоксидных смол. 16.03.1988.]
5. Patent of Ukraine N 23926. Vakhitova L.M., Skrypka G.V., Zhiltsov M.P. Water-soluble fire protection mixture. 31.08.98.
[Патент України № 23926. Вахітова Л.М., Скрипка Г.В., Жильцов М.П. Водорозчинна вогнезахисна суміш. 31.08.98.]
6. Patent of Ukraine for utility model N 41447. Vakhitova L.M., Lapushkin M.P. Fireproof paint for wood. 25.05.2009.
[Патент України на корисну модель № 41447. Вахітова Л.М., Лапушкін М.П. Вогнезахисна фарба для деревини. 25.05.2009.]
7. Patent of Ukraine for utility model N 73096. Vakhitova L.M., Lapushkin M.P., Drizhd V.L. Fireproof paint for wood. 10.09.2012.
[Патент України на корисну модель № 73096. Вахітова Л.М., Лапушкін М.П., Дрижд В.Л. Вогнезахисна фарба для деревини. 10.09.2012.]
8. Vakhitova L.N., Chepovsky V.O. Some aspects of fire protection of steel structures of NPP machine rooms. *Tekhnologii bezopasnosti i protivopozharnoy zashchity*. 2010. (1): 62–66.
[Вахітова Л.Н., Чеповский В.О. Некоторые аспекты огнезащиты металлоконструкций машзалов АЭС. *Технологии безопасности и противопожарной защиты*. 2010. № 1. С. 62–66.]
9. Vakhitova L.M., Feshchenko P.O., Lapushkin M.P., Kalafat K.V. Protection of metal building structures against corrosion and fire. *Budivnyctvo Ukrainy*. 2007. (2): 8–12.
[Вахітова Л.М., Фещенко П.О., Лапушкін М.П., Калафат К.В. Захист металевих будівельних конструкцій від впливу корозії й вогню. *Будівництво України*. 2007. № 2. С. 8–12.]
10. Kalafat K., Vakhitova L. *Vohnezakhysni rishennia dlia stalevoho budivnyctva* [Fire protection solutions for steel construction]. Kyiv: UCSB, 2023 (in Ukrainian).
[Калафат К., Вахітова Л. *Вогнезахисні рішення для сталевого будівництва*. Київ: УЦСБ, 2023.]
11. Camino G., Costa L., Martinasso G. Intumescent Fire-retardant Systems. *Polym. Degrad. Stab.* 1989. **23**: 359. [https://doi.org/10.1016/0141-3910\(89\)90058-X](https://doi.org/10.1016/0141-3910(89)90058-X)
12. Bourbigot S., Sarazin J., Samyn F., Jimenez M. Intumescent ethylene-vinyl acetate copolymer: Reaction to fire and mechanistic aspects. *Polym. Degrad. Stab.* 2019. **161**: 235. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.01.029>
13. Camino G., Costa L., Trossarelli L. Study of mechanism of intumescence in fire retardant polymers. Part I: Thermal degradation of ammonium polyphosphate-pentaerythritol mixtures. *Polym. Degrad. Stab.* 1984. **6**: 243. [https://doi.org/10.1016/0141-3910\(84\)90004-1](https://doi.org/10.1016/0141-3910(84)90004-1)
14. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *J. Constr. Steel Res.* 2019. **162**: 105712. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105712>
15. Sun S., Yu Q., Yu B., Zhou F. New progress in the application of flame-retardant modified epoxy resins and fire-retardant coatings. *Coatings*. 2023. **13**: 1663. <https://doi.org/10.3390/coatings13101663>
16. Rabajczyk A., Zielecka M., Gniazdowska J. Application of Nanotechnology in Extinguishing Agents. *Materials*. 2022. **15**: 8876. <https://doi.org/10.3390/ma15248876>
17. 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. **36**(4): 334. <https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1636536>

18. Lucherini A., de Silva D. Modelling intumescent coatings for the fire protection of structural systems: a review. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2024. **2**: 10. <https://doi.org/10.1108/JSFE-10-2023-0038>
19. Mariappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: a review. *J. Fire Sci.* 2016. **34**(2): 1. <https://doi.org/10.1177/0734904115626720>
20. Vakhitova L.N. Fire retardant nanocoating for wood protection. In: *Nanotechnology in Eco-efficient Construction*. Elsevier Ltd., 2019. P. 361–391. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102641-0.00016-5>
21. Vakhitova L.N., Taran N.A., Lapushkin M.P., Dryzhd V.L., Popov A.F. Solid-phase aminolysis in the ammonium polyphosphate – pentaerythritol – amine system. *Theoretical and Experimental Chemistry*. 2012. **48**: 163. <https://doi.org/10.1007/s11237-012-9258-6>
22. Vakhitova L.M., Kalafat K.V., Taran N.A., Drizhd V.L. Chemical solutions to fire protection problems. *Sci. Innov.* 2015. **11**(6): 47. <https://doi.org/10.15407/scine11.06.039>
[Вахітова Л.М., Калафат К.В., Таран Н.А., Дріжд В.Л. Хімічні рішення проблем вогнезахисту. *Наука та інновації*. 2015. Т. 11, № 6. С. 47–56.]
23. Vakhitova L.M., Kalafat K.V., Taran N.A., Bessarabov V.I. Comparison of amines as gas generators of flame retardant compositions of the intumescent type. *Technologies and Engineering*. 2021. (4): 69–80. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2021.4.7>
[Вахітова Л.М., Калафат К.В., Таран Н.А., Бессарабов В.І. Порівняння амінів як газоутворювачів вогнезахисних композицій інтумесцентного типу. *Технології та інжиніринг*. 2021. № 4. С. 69–80.]
24. 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. **4**(10): 45–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209841>
25. Vakhitova L., Drizhd V., Taran N., Kalafat K., Bessarabov V. The effect of organoclays on the fire-proof efficiency of intumescent coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. **6**(10): 10–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.84391>
26. 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. **16**: 100544. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.100544>
27. Vakhitova L., Drizhd V. The Influence of Polymer on Service Life of Intumescent Coating. *IOSR Journal of Applied Chemistry*. 2022. **15**(7): 36–52. <https://doi.org/10.9790/5736-1507013652>
28. 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. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2020. **6**: 59–68. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2020-133-6-59-68>

Lubov M. Vakhitova

*L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic Chemistry and Coal Chemistry
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1923-7895>

APPLIED CHEMICAL SCIENCE FOR THE DEVELOPMENT OF FIRE PROTECTION TECHNOLOGIES FOR STEEL STRUCTURES

According to the materials of the report at the XXXIV Vernadsky Readings
“The Life-Saving Role of Science in Times of War and Social Crises”

The ways of realization of the tasks of the applied topics of the National Academy of Sciences of Ukraine on the creation of innovative technologies for fire protection of steel structures are discussed. The mechanisms for implementing the results of fundamental research in the development of passive fire protection means with subsequent implementation in industrial production and application in the construction industry are demonstrated. The factors affecting the fire protection efficiency of reactive coatings are considered: the nature of the polymer component, the ratio of the main components of the intumescent system, the content and structure of nano clay, etc. An algorithm for direct tests of fire protection efficiency in the process of developing an intumescent coating formulation is proposed. The obtained results are confirmed by full-scale fire tests conducted according to European and adapted national standards.

Cite this article: Vakhitova L.M. Applied chemical science for the development of fire protection technologies for steel structures. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2024. (8): 58–68. <https://doi.org/10.15407/visn2024.08.058>