

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.5.12>

УДК 666.76,  
661.174

<sup>1</sup>ТАРАН Н. А., <sup>1</sup>ШОЛОГОН В. І., <sup>2</sup>ВАХІТОВ Р. А.,  
<sup>1</sup>РАЄНКО Г. Ф., <sup>1</sup>КАЛАФАТ К. В., <sup>1,2</sup>БЕССАРАБОВ В. І.

<sup>1</sup> Інститут фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН  
України, Київ, Україна

<sup>2</sup> Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

## РОЗРОБЛЕННЯ ЗАСОБІВ МОБІЛЬНОГО ВОГНЕЗАХИСТУ – РУЛОННИХ ПРОТИПОЖЕЖНИХ МАТЕРІАЛІВ. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

**Мета.** Визначення сучасних тенденцій вдосконалення вогнезахисних рулонних матеріалів, спрямованого на підвищення їх вогнестійкості, механічної міцності та екологічної безпеки, для пошуку інноваційних технічних рішень з розроблення засобів мобільного вогнезахисту.

**Методика.** Використано методи літературно-системного та критичного аналізу, метод узагальнення результатів з різних джерел для створення цілісної картини стану наукової проблеми, метод порівняльного аналізу різних підходів, що використовуються в дослідженнях з теми огляду.

**Результати.** Показано, що одним із актуальних напрямків розвитку протипожежної галузі є створення та організація мобільного вогнезахисту, який може бути використаний для підвищення пожежної безпеки об'єктів оборонного призначення, а саме місць зберігання боєприпасів у польових умовах. Розглянуто наукові праці та практичні втілення щодо різних видів вогнезахисних рулонних матеріалів - вогнезахисних ковдр, гнучких виробів з інтумесцентним покриттям чи термостійким наповненням тощо. Обґрунтовано, що армування вогнезахисних рулонних покриттів є важливим процесом, який сприяє покращенню механічних властивостей та підвищенню ефективності засобу вогнезахисту. Проаналізовано існуючі способи отримання волокон і текстильних матеріалів зі зниженою горючістю, які використовуються під час виготовлення вогнезахисних рулонних матеріалів. Показано, що ефективним засобом, який поєднує найкращі якості конструктивного та інтумесцентного вогнезахисту, є використання вогнезахисних матеріалів, що спучуються, на гнучкій основі. Проаналізовано патентну інформацію, рецептури та технології виготовлення засобів мобільного вогнезахисту інтумесцентного типу.

**Наукова новизна.** Вперше на основі масиву літературних даних та патентного пошуку проведено аналіз та узагальнення щодо практичного значення, технологічних аспектів виготовлення, показників вогнезахисної ефективності гнучких протипожежних засобів, як складової мобільного вогнезахисту у польових умовах для забезпечення тривалої експлуатації без втрати захисних властивостей.

**Практична значимість.** Надано практичні рекомендації щодо складу, впливу інноваційних вогнезахисних добавок та наноматеріалів, технології виготовлення вогнезахисних рулонних матеріалів, які можуть бути застосовані для протипожежного захисту оборонних, будівельних та промислових об'єктів.

**Ключові слова:** конструктивний вогнезахист; рулонні протипожежні матеріали; вогнезахисні ковдри; інтумесцентні матеріали.

**Вступ.** Забезпечення захисту від вогню є однією з ключових задач у сфері протипожежної безпеки. З розвитком технологічного прогресу небезпека пожеж зростає практично у тій самій прогресії. І однією з найважливіших складових у системі заходів щодо захисту від пожеж є заходи із забезпечення пожежної безпеки [1]. В умовах російсько-української війни значення вогнезахисту стає вкрай важливим як для військових, так і для цивільного населення. При цьому одним із актуальних напрямків розвитку протипожежної галузі є організація мобільного вогнезахисту, який характеризується швидкістю монтажу та технологічністю застосування у польових умовах [2, 3].

В умовах війни безпека зберігання боєприпасів має критичне значення. Однією з найважливіших загроз є можливість пожежі, яка може призвести до детонації боєприпасів і

серйозних наслідків як для персоналу, так і для інфраструктури. Тому розробка ефективних вогнезахисних бар'єрних матеріалів для зберігання боєприпасів є актуальним науково-технічним завданням. Такі матеріали можуть значно знизити ризик вибухів та зберегти людські життя, військову інфраструктуру, стратегічні ресурси [4]. В польових умовах боєприпаси часто зберігаються в тимчасових сховищах. Використання вогнезахисних рулонних матеріалів дозволяє забезпечити вогнезахист місць зберігання вибухової зброї від руйнівної дії пожежі [4, 5].

**Метою** цього огляду літератури є визначення сучасних тенденцій вдосконалення вогнезахисних рулонних матеріалів, спрямованих на підвищення їх вогнестійкості, механічної міцності та екологічної безпеки, для пошуку інноваційних технічних рішень з розроблення засобів мобільного вогнезахисту.

**Виклад основного дослідження.**

**Рулонні вогнезахисні матеріали загального призначення.**

Методи вогнезахисту поділяють на дві великі групи:

- активні методи вогнезахисту – засновані на застосуванні систем автоматичної пожежної сигналізації та пожежогашіння, засобів протидимного захисту, а також пристроїв, що забезпечують обмеження розповсюдження пожежі;

- пасивні методи вогнезахисту – засновані на використанні матеріалів, які запобігають займанню та перешкоджають поширенню вогню і підвищують вогнестійкість будівельних споруд, інженерних систем та конструкцій з деревини, пластмас, бетону та залізобетону [1, 6].

Сучасні методи пасивного вогнезахисту можна умовно розділити на два напрями: тонкошарові вогнезахисні покриття та конструктивний вогнезахист.

Тонкошаровий вогнезахист полягає в застосуванні фарб, лаків і складів, просочень для деревини і тканин, коли матеріал наноситься на поверхню, що захищається тонким шаром та зберігає конфігурацію конструкції. Вогнезахисна дія таких покриттів заснована на тому, що при певній температурі відбувається початок хімічних реакцій і фізичних процесів, що призводять до утворення спінених теплоізолюючих шарів (коксу або твердіючого плава) та/або виділення продуктів, флегматизуючих та інгібуючих процес горіння. Внаслідок чого при впливі джерел полум'я та тепла запобігається займання, знижується інтенсивність поширення полум'я, збільшується межа вогнестійкості конструкцій [1, 7–11].

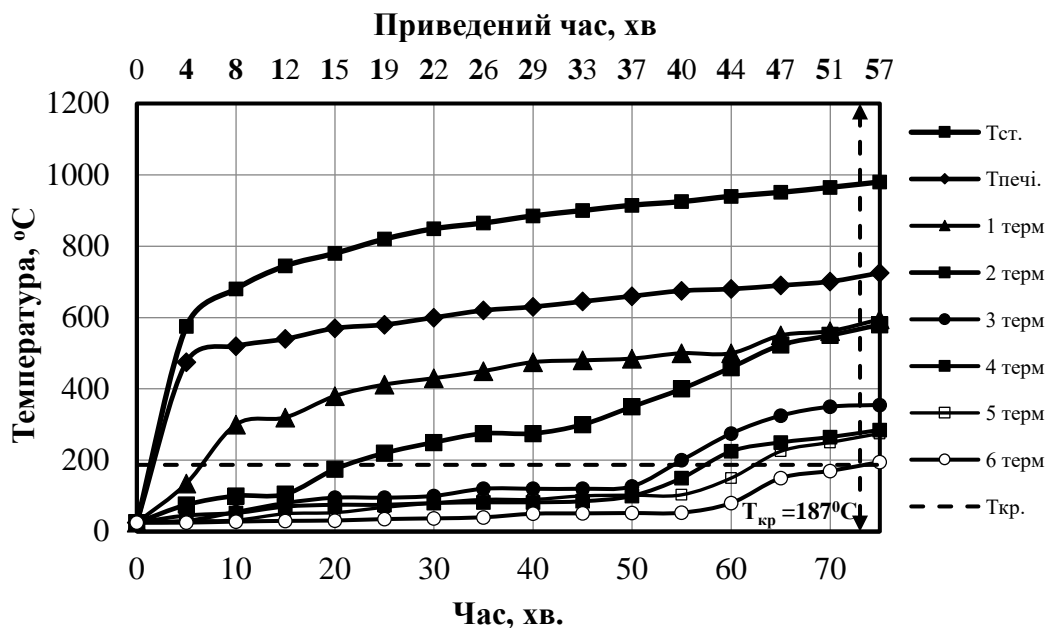
До конструктивного вогнезахисту відносяться штукатурки, облицювання плитними, рулонними та іншими вогнезахисними матеріалами, у тому числі на каркасі, з повітряними прошарками, а також комбінація даних матеріалів, у тому числі з тонкошаровими покриттями, що спучуються. Широкого застосування набули гіпсокартонні листи, магнезитові, гіпсоволокнисті та вермикулітові плити, композитні панелі, плити з базальтовими волокнами тощо [12–15].

Так, наприклад, в роботі [16] розглянуто зразки багатшарових огорожувальних конструкцій, виготовлених з профільованого металу з наповнювачем із пінополістиролу товщиною 100 мм та двох додаткових шарів із гіпсокартону товщиною по 12,5 мм (марка СПГ). Проведено експериментальні дослідження межі вогнестійкості дослідних конструкцій в печі для теплофізичних випробувань малогабаритних фрагментів будівель.

На рис. 1 графічно відображено розподіл температур в зразку СПГ під час проведення вогневих випробувань.

Показано [16], що межа вогнестійкості за ознакою втрати теплоізолюючої здатності дослідного зразка настала орієнтовно на 56 хв проведення експерименту при значенні критичної температури 187 °С. Таким чином, автори зробили висновок, що огорожувальні конструкції типу СПГ можна використовувати в якості зовнішніх та внутрішніх теплоізолюючих ненесучих стін [17].

Як конструктивні засоби вогнезахисту застосовуються рулонні (що згинаються) матеріали у зв'язку з низкою унікальних властивостей: сухий монтаж, висока продуктивність монтажу, оскільки конструкція «обертається», а не обкладається плитами. Рулонні вогнезахисні матеріали знаходять застосування в цивільному та промисловому будівництві (двері, перегородки, повітропроводи), в машинобудуванні (суднобудуванні, літакобудуванні), ізоляція промислового обладнання, транспортних засобів [18–22].



Легенда: 1 – 6 – криві показів термопар,  $T_n$  – середнє арифметичне значення температури за показами двох термопар в печі;  $T_{ст}$  – крива стандартного температурного режиму;  $T_{кр}$  – критична температура на зовнішній (необігрівній) поверхні

Рис. 1. Розподіл температур по товщині зразка марки СПГ під час випробування [16]

У роботі [18] описано гнучку вогнестійку теплоізоляцію, що використовується в літакобудуванні, в якій між шарами волокнистих матів або пінної ізоляції додатково розміщують високотермостійкий матеріал у вигляді листових шарів, після чого отриману конструкцію поміщують в оболонку. Термостійкі листові шари містять пластинчастий мінерал на зразок вермикуліту, який покриває з обох боків тонкі листи по типу паперу з органічних волокон, тонкі мати зі скловолокон або тканину. Як зовнішню оболонку теплоізоляції використовують поліімідну плівку. Час пропалювання такого матеріалу, що визначається за стандартом США ASTM E-119 [19], залежно від конкретного матеріалу всіх складових компонентів, збільшується з 2–3 до 5–10 хв, завдяки наявності проміжних шарів.

#### **Вогнезахисні рулонні матеріали з армованою структурою.**

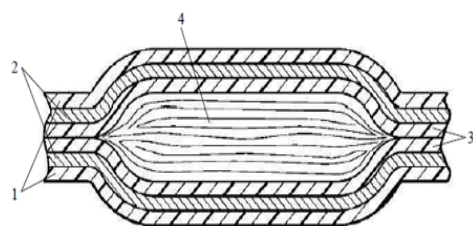
Армування вогнезахисних рулонних покриттів являє собою важливий процес, що сприяє покращенню їх механічних властивостей та підвищенню ефективності вогнезахисту. Воно включає введення армуючих матеріалів, таких як скловолокно, базальтові волокна, металевий дріт, вуглецеві волокна або синтетичні полімери, у структуру покриття. Основні функції армування:

- зміцнення структури покриття: армуючі матеріали підвищують механічну міцність покриття, що робить його більш стійким до розривів та механічних пошкоджень;
- підвищення вогнестійкості: завдяки армуючим волокнам, покриття краще витримує високі температури, уповільнює процеси горіння та утворення тріщин;

- збереження цілісності при нагріванні: армовані покриття краще зберігають свою форму і структурну цілісність при впливі високих температур, запобігаючи розшаруванню та відшаруванню;

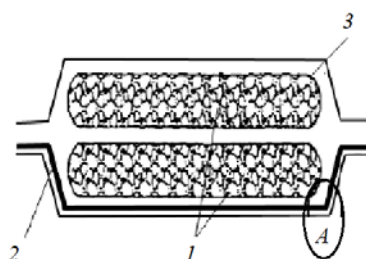
- поліпшення адгезії: армуючі матеріали сприяють кращому закріпленню покриття до поверхні основного матеріалу [20–22].

У патенті [23] запропоновано гнучку вогнетеплозахисну систему, що містить композиційний ламінат, який складається з полімерного вологозахисного шару 1 товщиною від 6 до 25 мкм, неорганічного пластинчастого шару 2 товщиною від 7 до 76 мкм і термопластичної плівки 3 завтовшки >25 мкм; цей композиційний ламінат вкриває внутрішній мат 4 (рис. 2 (а)).



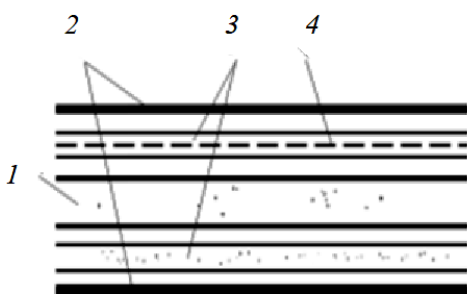
(а)

Легенда: 1 – вологозахисний шар;  
2 – пластинчастий шар, 3 – термопластична плівка;  
4 – внутрішній мат [23]



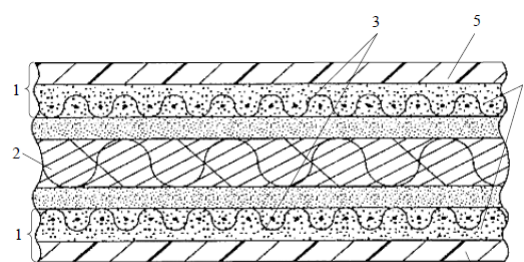
(б)

Легенда: 1 – скломат; 2 – ламінат; 3 – плівка [24]



Фрагмент А (в)

Легенда: 1 – вогнезахисний папір; 2 – плівка;  
3 – адгезійний шар; 4 – зміцнювальна сітка [24]



(г)

Легенда: 1 – шар, зміцнений сіткою;  
2 – керамічний волокнистий матеріал; 3 – шар сітки;  
4 – незаймите сполучне для склеювання шарів;  
5 – облицювальний шар [25]

Рис. 2. Вогнетеплозахисні системи

Вологозахисний шар 1 перешкоджає проникненню вологи у волокнистий мат і забезпечує механічну міцність і жорсткість ламінату. Оптимальними матеріалами цього шару є фторполімери або полііміди. Зовнішня поверхня вологозахисного шару, що контактує з пластинчастим шаром може бути покрита політетрафторетиленом (тефлоном) або металізована. Неорганічний пластинчастий шар 2 призначений для захисту від полум'я і гарячих газів і може являти собою пластинки монтморилоніту, слюди, вермикуліту, тальку або їх комбінації. Переважним є вермикуліт, решта – оксиди К, Са, Ті, Сr, Na, Mn або Ва. Пластинки можуть бути нанесені на сітку з натурального або неорганічного волокна (скло, бавовна, нейлон). Термопластична плівка 3 має бути здатна до розм'якшення, достатнього, щоб герметично з'єднатися під час нагрівання без розплавлення. Це можуть бути такі матеріали як полікетони, полііміди, полісульфони, фторполімери. Як внутрішній мат 4 використовують органічний або неорганічний матеріал, що має час затухання не більш як 10 с і довжину пропалу не більш як 102 мм. Наприклад пінний поліімідний матеріал або

волокнистий мат, що містить скляні, арамідні, керамічні, кварцові, карбідокремнієві, вуглецеві та інші волокна [23].

У США було запатентовано вогнезахисний папір і протипожежний ламінат з його використанням, призначений для оболонки скломату вогнетеплоізоляційної системи. На рис. 2 (б) представлено поперечний розріз вогнестійкої теплоізоляційної системи, що містить два шари скломатів 1, зовнішній вогнестійкий ламінат 2, що протистоїть впливу полум'я, і внутрішню плівку 3, яка також може бути шаруватою [24]. Рис. 2 (в) демонструє збільшене зображення плівкового ламінату (фрагмент А – див. рис. 2 (б)), що має необхідні протипожежні властивості. Будова вогнестійкого ламінату: вогнезахисний папір 1 укладений між шарами плівки 2 за допомогою адгезійного шару 3. Шар зміцнювальної сітки 4 може бути виконаний зі скловолкна, нейлону або поліестеру. Плівка 2 обрана з групи, що містить поліефіри, полііміди, поліефіркетони, полівінілфториди тощо.

Адгезійний шар для приклеювання плівки до вогнезахисного паперу може бути на основі поліефіру або полівінілфториду з додаванням антипіренових добавок, таких як сполуки сурми, гідратні сполуки оксиду алюмінію, борати, карбонати, фосфати, сульфати, органічні галогеніди та ін. Вогнезахисний папір містить лужноземельні силікатні волокна, рубане скловолокно, органічні зміцнювальні волокна, органічне зв'язуюче та неорганічний наповнювач, такий як бентоніт, гекторит, каолініт та інші види глин. Випробування показали, що такий вогнезахисний ламінат задовольняє вимогам пожежної безпеки, маючи при цьому низьку щільність і достатню вологостійкість [19, 24].

У роботі [25] описано гнучкий вогнестійкий ламінат, що складається з волокнистого теплоізоляційного пакета та гнучкого шаруватого листового матеріалу (рис. 2 (г)), який відповідає вимогам щодо займистості, поширення полум'я та пропалу.

Гнучкий ламінат містить три шари: два шари 1 зміцнені сіткою полімерні матеріали зі сполучною речовиною, між ними керамічний волокнистий матеріал 2. Шар 1 містить полімерний матеріал, який має зберігати стабільність до температури 350 °С. Шаруватий матеріал складається також з сітки 3, яка плетена з поліефіру, нейлону або скловолкна, що підвищує стійкість до розриву. Сітка може бути приклеєна до полімерного матеріалу за допомогою негорючого зв'язуючого 4. Облицювальний шар ламінату 5 складається з полімерного матеріалу тієї ж групи, що і матеріал першого шару.

Другий шар ламінату 2 містить неметалеві волокна, переважно у вигляді тканини або паперу з високоплавких волокон. Волокна не повинні плавитися, горіти або розкладатися за температур щонайменше 250 °С, переважно – до 550 °С. Використовуються скляні, арамідні, кристалічні керамічні волокна, а також волокна з нітриду і карбиду кремнію, вуглецю і поліакрилонітрилу. Переважно використовувати алюмосилікатні, алюмоборосилікатні та волокна оксиду алюмінію як у вигляді тканини, так і у вигляді нетканого матеріалу з короткого волокна. Крім того, другий шар ламінату 2 має покриття з оксиду металу для зміцнення. Покриття на всій поверхні другого шару або на її частині нанесено впорядковано або хаотично. Як правило, таке покриття наносять принтовим методом [25].

Останнім часом з'явилися матеріали, що поєднують властивості конструктивного вогнезахисту та інтумесцентного захисту, коли при вогневому впливі утворюється пінококс з низькою теплопровідністю, що захищає поверхню об'єкта захисту [26, 27]. Утворення пінококсу відбувається у всіх трьох вимірах (верх, вниз і вздовж поверхні) – "3-dimension". Даний вид вогнезахисту має низьку перевагу перед раніше відомими засобами вогнезахисту:

- можливість проектування вогнезахисту легких сталевих тонкостінних конструкцій за рахунок малої ваги та об'єму;
- сумісність з усіма раніше нанесеними вогнезахисними або антикорозійними покриттями на сталеві конструкції, оскільки сітка просто безконтактно обгортається навколо поверхні конструкції;

- відсутність вимог до спеціальної підготовки поверхні, що захищається (грунтування, знепилювання та знежирення) перед монтажем; вимоги висуваються виключно до антикорозійних робіт;

- монтаж, експлуатація та ремонт при температурах від  $-40^{\circ}$  до  $+50^{\circ}$  С, вологості 100%; за наявності опадів та поривів вітру, що допускають роботу згідно з вимогами техніки безпеки праці та рівнем кваліфікації персоналу;

- простота періодичного або контрольного огляду відповідальних вузлів сталевих конструкцій з подальшим відновленням вогнезахисного покриття;

- широкий діапазон виконання у насичених кольорах для вирішення архітектурно-естетичних завдань [26–28].

Протягом тривалого часу і досить широко для армування вогнезахисних складів використовувалися сітки з металевого дроту [26, 27]. У роботі [28] досліджено можливість створення вогнезахисних екранів на основі металевих сіток, оброблених спіненим складом. Використовувати такі облаштування рекомендується для захисту технологічного устаткування, що зумовлено низкою цінних переваг за нормальних умов: екран не перешкоджає тепло- і повітрообміну, апарат, що захищається, доступний для візуального контролю. Під час пожежі, що супроводжується виділенням теплових потоків, відбувається спінювання покриття і заповнення вільного сіткового простору пінококсом. Конструкція, що трансформувалася таким чином, утворює вогнестійкий бар'єр, що перешкоджає поширенню конвективних потоків і поглинає теплове випромінювання. Так, показано, що вогнезахисна ефективність сіткових пристроїв залежить від потужності та часу впливу теплового потоку. Мінімальна потужність, за якої відбувається спінювання, становила  $3 \text{ кВт/м}^2$ ; повне перекриття комірок відбувається за теплового потоку  $15 \text{ кВт/м}^2$ . Показано, що сіткові конструкції можуть бути ефективним засобом обмеження розповсюдження і гасіння пожежі та бути основою для створення конструкцій, що мають високу межу вогнестійкості (до 1,5 год.), завдяки застосуванню комбінованого вогнезахисту: шару спіненого покриття, армованого металевими сітками [28].

У патенті [29] описано рулонний інтумесцентний матеріал. Гнучка сітка з багатьма пасмами, які утворюють ряд отворів; покриття, що спучується, нанесене на гнучку сітку. Покриття в якості інгредієнтів містить графіт, що спінюється, і носій на основі полімеру. Сітка має такий розмір, щоб покриття, що спучується, дозволяло повітряному потоку проходити через гнучку сітку до тих пір, поки матеріал не буде піддаватися впливу температур, рівних або перевищуючих температуру активації. Після чого покриття, що спучується, набухає, герметизуючи отвори і запобігаючи проходженню повітря через гнучку сітку з дротяної тканини. В одному з прикладів описано формулу: акриловий сополімер (35–56 мас. %), поліфосфат амонію (3–21 мас. %), інтеркальований графіт (3–21 мас. %), діоксид кремнію ( $< 1$  мас. %) та дротяна сітка (30–49 мас. %) [29].

У винаході [30] представлено рішення, що описує вогнезахисний екран, який складається з металеві сітки, пофарбованої покриттям, що спінюється від теплового впливу. Розмір сіткових комірок, діаметр дроту, товщина покриття та кратність спінювання фарби повинні забезпечувати повне перекриття комірок сітки під час теплового впливу [30].

Авторами [26] було розроблено вогнезахисний конструктивний інтумесцентний матеріал, який можна постачати в рулонах, що складається з еластичної полімерної композиції на основі морозостійких і маслобензостійких синтетичних каучуків, інтеркальованого графіту та інших нерозчинних у воді компонентів, нанесених на армуючу сітку з композиції мінераловатних або вуглепластикових волокон. Вогнезахисна сітка обертається навколо виробу (конструкції) в один і більше шарів. Максимальну температуру експлуатації визначено як не більше  $90^{\circ}$  С, оскільки процес утворення пінококсу починається в інтервалі  $180$ – $220^{\circ}$  С. За час проведення випробувань у вогневій камері печі дослідних зразків сталеві двотаврової

балки з вогнезахисною сіткою зафіксовано такі характерні особливості їхньої поведінки. На 5–8 хв починається термічне розширення вогнезахисного покриття, нанесеного на сітку, на 45–50 хв спостерігається побіління спученого шару покриття. На 64 хв випробування дослідні зразки перейшли в граничний стан (досягнення швидкості наростання деформації – понад 0,33 см/хв), що характеризується обваленням дослідних зразків. Матеріал може використовуватися для зниження пожежної небезпеки кабельних виробів і підвищення меж вогнестійкості будівельних конструкцій.

Таким чином, ефективним засобом, що поєднує найкращі якості конструктивного та інтумесцентного вогнезахисту, є використання вогнезахисних матеріалів, що спучуються, на гнучкій основі [31–36].

#### **Способи отримання волокон і текстильних матеріалів зі зниженою горючістю.**

При створенні рулонних вогнезахисних матеріалів використовують різні волокна і текстильні матеріали. Відомо кілька способів отримання волокон і текстильних матеріалів зі зниженою горючістю:

- використання високотермостійких волокноутворюючих органічних полімерів [37];
- використання неорганічних волокон [37, 38];
- модифікація волокноутворюючого полімеру на стадії його синтезу [37, 39];
- модифікація волокна на стадії його формування шляхом використання стабілізаторів і сповільнювачів горіння реакційного типу [40, 41, 42];
- поверхнева або об'ємна обробка волокон, тканин або готових виробів [43, 44];
- хімічна модифікація волокон вогнезахисними засобами з утворенням ковалентних зв'язків між сповільнювачем горіння і макромолекулою волокноутворюючого полімеру [45, 46].

Найпоширенішим способом вогнезахисту тканин є поверхнева обробка або просочення із застосуванням сповільнювачів горіння реакційного типу [47, 48]. Обробка вогнезахисними речовинами текстильних матеріалів забезпечує зниження пожежної небезпеки волокон, ниток, тканин, нетканих матеріалів і виробів з них [49–51]. Ці засоби обмежують поширення полум'я поверхнею, знижують димоутворювальну здатність, токсичність продуктів терморозкладання і тепловиділення.

Засоби вогнезахисту для поверхневої або об'ємної обробки текстильних матеріалів поділяються на дві групи. До першої групи належать вогнезахисні складки, що являють собою різні комбінації бури і борної кислоти, діамонійфосфати та інші неорганічні сполуки. Цей клас сполук знаходить застосування для обробки целюлозних матеріалів. [44, 52]. До другої групи належать вогнезахисні складки, що утворюють на поверхні текстильного матеріалу нерозчинні сполуки. До сполук, які найчастіше застосовують у цьому разі, належать фосфор-, фосфоразот- і фосфоргалогеновмісні сполуки [53].

Прикладом модифікації волокна на стадії його формування шляхом використання сповільнювачів горіння є робота Vaddam зі співавторами [54]. Як добавки в розчині полістиролу були використані борна кислота і нанорозмірний діоксид кремнію. Тканини, створені із застосуванням нанодобавок мають високий вогнестійкий ефект, відмінну довговічність та стабільність, проте їхня висока вартість ускладнює застосування таких матеріалів у промислових масштабах [41, 42, 54].

Широко використовуються [55, 56] технології модифікації поверхні тканин, які включають розпилення, занурення, золь-гель метод та хімічну графт-сополімеризацію [57–61]. Так, технологія розпилення є простою, ефективною і недорогою [55, 56]. За допомогою технології розпилення дисперсія вогнестійких речовин розпилюється на поверхні підкладки а після висихання та витримки формується покриття з однорідною товщиною. У дослідженнях Guo зі співавторами [62] використовували двоетапний метод розпилення для нанесення вогнестійкого шару, що складався з композиту алкіламоній, функціоналізований



силсесквіоксаном (A-POSS) / фітинова кислота (PA) та гідрофобного шару, що складався з діоксиду титану та полідиметилсилоксану (PDMS), на бавовняну тканину. Модифікована бавовняна тканина виявила високу термічну стабільність, відмінну вогнестійкість, гідрофобність та високу механічну стабільність. A. Vishwakarma зі співавторами [63] розробили багатофункціональну бавовняну тканину за допомогою двоетапного методу розпилення «шар за шаром», в якому внутрішній шар забезпечує вогнестійкість, що складається з хітозану та функціоналізованої фітинової кислоти, а зовнішній шар, що складається з композиту PDMS-ZnO, який надає тканині гідрофобність. Така тканина має хорошу вогнестійкість і гідрофобність. Проте складний багатоетапний процес розпилення призводить до збільшення промислових витрат, а високий вміст вогнестійких речовин впливає на гнучкість і довговічність тканини.

Подібних недоліків намагалися уникнути автори [53], запропонувавши ефективний метод створення вогнестійкого тканинного матеріалу. У цьому дослідженні композитне покриття, що складається з фторованого PDMS, продуктів згоряння силіконового каучуку (в основному  $\text{SiO}_2$ ) і поліфосфату амонію (APP) (APP/ $\text{SiO}_2$ /фторований PDMS (F-ASP)), було нанесено розпиленням на поверхню тканини поліетилентерефталату (PET). Аналогічним чином було отримано тканину з нефторованим PDMS (APP/ $\text{SiO}_2$ /PDMS (ASP)). На рис. 3 представлені криві TG і DTG для необробленої PET тканини та з покриттям ASP і F-ASP в атмосфері повітря. Як для оригінальної, так і для покритих PET-тканин притаманні два етапи термічної окислювальної деградації.

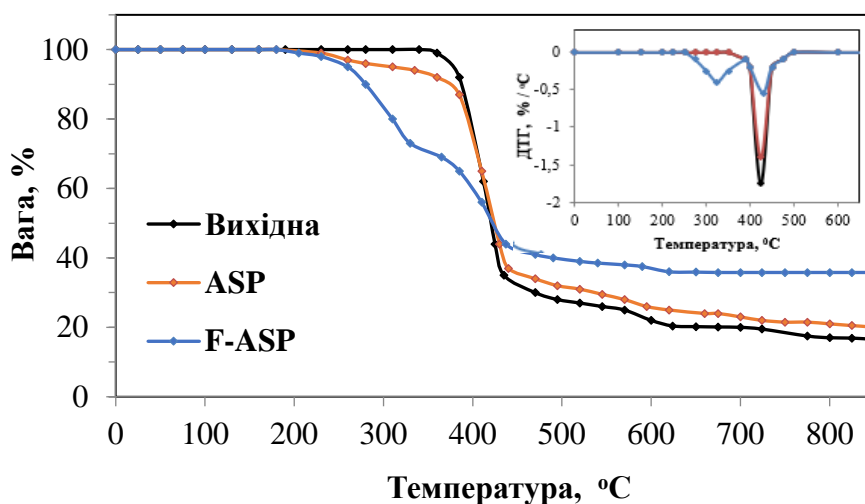


Рис. 3. Криві ТГ і ДТГ PET тканин з покриттям ASP і F-ASP [64]

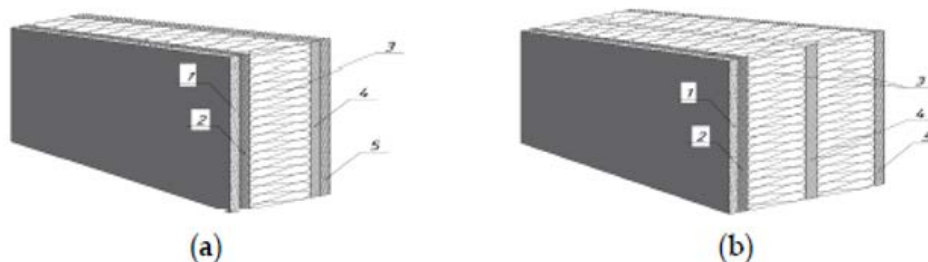
Перший етап спостерігається в діапазоні температур від 320 °С до 480 °С, що відповідає термічній деградації ланцюга PET на дрібні фрагменти. Слід зауважити, що початкова температура розкладання тканини з покриттям ASP і тканини з покриттям F-ASP знизилася до 255,3 °С і 229,3 °С відповідно порівняно з вихідною тканиною (379,2 °С), що в основному пояснюється раннім розкладанням APP. Після нагрівання APP виділяє  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$  та інші гази, які блокують проникнення кисню на поверхню матеріалу. У той же час, після зневоднення під дією теплової енергії APP генерує поліфосфорну кислоту та поліметафосфорну кислоту, що сприяє дегідратації поверхні з утворенням карбідів. Крім того, утворені нелеткі оксиди фосфору та поліфосфорна кислота покривають поверхню зразка. Завдяки наявності зв'язків C-F PDMS має вищу термічну стабільність ніж оригінальний PDMS. Це може певною мірою запобігти виходу утворених карбідів з гарячим повітрям і покращити стабільність вуглецевого шару [64].



Другий етап спостерігається в діапазоні температур від 490 до 600 °С і пов'язаний з утворенням летких продуктів дрібними фрагментами PET. Крім того, вуглецевий залишок вихідної тканини при 900 °С становить лише 15,7% мас., для тканини з покриттям ASP – 17,8% мас., а для тканини з покриттям F-ASP – 35,1 мас.%. Це підтверджує, що фторований PDMS у композитному покритті сприяє утворенню шару карбонізації. Основний механізм дії F-ASP полягає у тому, що термічна стабільність матеріалу покращується завдяки високому ефекту екранування теплової енергії, а продукти розкладання F-ASP не горять. Крім того, крива DTG показує, що загальна швидкість термічного розкладання тканини з покриттям F-ASP нижча, ніж у інших зразків. Під синергетичною дією фторованого PDMS на поверхні швидше утворювався компактний карбонізований шар. У той же час термічна деградація фторованого PDMS також призводить до утворення неорганічного SiO<sub>2</sub> на поверхні, що додатково збільшує товщину та механічну міцність вуглецевого шару [64].

У конструктивному рулонному вогнезахисті використовують не тільки тканинні, а й волокнисті матеріали: скловолокно, мінеральну і базальтову вату на основі тонкого і ультратонкого волокна [65, 66]. Базальтоне супертонке волокно є стійким до високих температур до 700 °С, короткочасно до 900 °С. Так, межа вогнестійкості рулонного матеріалу, виготовленого з надтонкого базальтового волокна товщиною від 5,0 до 16,0 мкм, ламінованого з одного боку алюмінієвою фольгою, становила R 190 [67]. Негорючі матеріали з добавками базальтового супертонкого волокна застосовують для підвищення меж вогнестійкості повітропроводів і металокопункцій, а також використовують як покриття апаратури побутового та промислового обладнання, транспортних засобів. Результати [68] підтверджують, що переваги для виробництва вогнестійкої тканини має базальтоне волокно, яке використовується у конструктивному вогнезахисті (кожухи, завіси та кришки, як на копункціях, так і на виробках) для забезпечення високої меж вогнестійкості [69–71].

Автори [65] розробили конструктивний рулонний інтумесцентний вогнезахист для будівельних копункцій об'єктів капітального будівництва, а також для кабельної копункції. Засіб вогнезахисту являє собою рулонний матеріал з армованою копункцією, що спучується в трьох напрямках (3-D) під час впливу термічного удару. Копункція копункційних шарів цього виробу представлена на рис 4.



Легенда: (а) для умов горіння стандартної (целюлозної) пожежі; (б) для умов горіння вуглеводневої пожежі; 1 – термоміцнена базальтова тканина; 2 – керамічне волокно; 3 – мінеральна вата; 4 – листи з металевих сплавів; 5 – склотканина

Рис. 4. Коопункційні шари матеріалу [65]

Представлений у роботі [65] коопункційний тип копункції, який в залежності від області застосування, показує хороші результати протипожежного захисту завдяки коопункції обраних шарів. Вогнезахисна ефективність копункцій, отриманих в результаті експериментів, коливається в межах 60–130 хв для стандартної пожежі, 30–93 хв для вуглеводневої пожежі. Такі матеріали можуть застосовуватися в нафтовій і газовій промисловості, при будівництві тунелів, на небезпечних хімічних виробництвах, тому що мають стійкість до вуглеводневого режиму пожежі, ремонтпридатність і високу довговічність в різних кліматичних умовах.

Армування вогнезахисних рулонних покриттів є важливим етапом, що підвищує їх експлуатаційні характеристики. Використання різних видів армуючих матеріалів і технологій дозволяє забезпечити надійний захист від впливу високих температур і механічних пошкоджень, що є ключовим для забезпечення безпеки в умовах пожежі.

**Конструкційні рулонні матеріали як мобільний засіб вогнезахисту боєприпасів при транспортуванні та в польових умовах.**

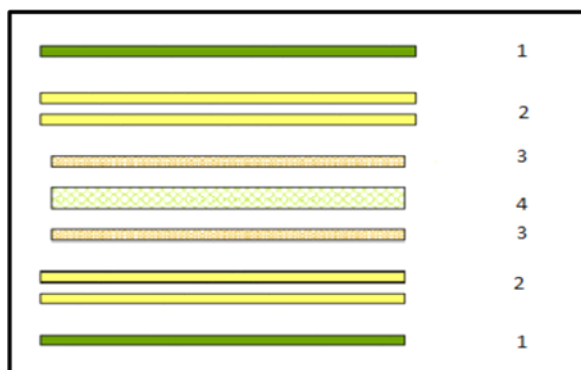
Рулонні матеріали можуть використовуватися як мобільні засоби вогнезахисту, оскільки мають певні переваги:

- портативність: завдяки своїй формі рулонів, ці матеріали легко транспортувати і встановлювати на місці;
- універсальність: такі матеріали можуть бути використані на різних поверхнях;
- ефективність: вони захищають поверхні від вогню або зменшують поширення полум'я;
- простота встановлення: їх можна легко встановити без необхідності спеціалізованих інструментів або досвіду в галузі вогнезахисту.

Одним з ефективних мобільних вогнестійких рулонних матеріалів є вогнезахисні ковдри, які можуть використовуватися для вогнезахисту боєприпасів під час транспортування та в польових умовах. Окрім вогнестійкості, такий матеріал має бути легким, гнучким, водонепроникним, міцним, стійким до розривів і проколів [72].

У роботі [72] розглядається конструкція вогнезахисної ковдри (Fire Barrier Blanket (FBB)), що складається з кількох шарів матеріалів, спеціально підібраних для захисту від високих температур, вогню та/або ударів снарядів. У конструкцію входять керамічна тканина на основі кремнезему, ізоляційний мат із кремнезему, а також тканина з пара-амідних волокон (кевлар) для захисту від уламків, яка має високу міцність і вогнестійкість. Ці шари захищені покриттям із поліефірної тканини з полівінілхлоридом (PVC) для підвищення міцності та захисту від несприятливих погодних умов. Перевагами поліефірних волокон є міцність, довговічність та відносно низька вартість. Поліефіри мають додаткову перевагу у стійкості до плісняви та ультрафіолетового випромінювання (рис. 5) [72].

Результати випробувань показали, що матеріал на основі кремнезему має високу теплостійкість і низьку теплопровідність, що робить його придатним для забезпечення захисту від вогню. Також кремнеземна теплоізоляція є кращою завдяки своїй довговічності та здатності краще переносити деформації, такі як згини та складання. Це важливо для FBB, який має витримувати складні умови застосування під час транспортування, встановлення та використання у польових умовах. На рис. 5 показані матеріали та їх розташування в ковдрі. Послідовність шарів матеріалу ковдри через її товщину симетрична.



Легенда: 1 – один шар поліефірної тканини з ПВХ-покриттям; 2 – два шари кевларової тканини; 3 – один шар кремнеземної тканини; 4 – кремнеземний мат.

Рис. 5. Послідовність укладання матеріалів у вогнезахисній ковдрі [72]

Дослідницька лабораторія армії США (Army Research Laboratory (ARL)) у випробуваннях проникнення вогню використовувала газовий пальник для імітації полум'я від горіння пороху. Критерій, встановлений ARL, полягав у тому, що температура за ковдрою не мала збільшуватися більше ніж на 100°C вище за атмосферну. Матеріали, які входять до складу FBB, не можуть витримати високих температур горіння довго, проте у цьому немає потреби, оскільки порох і сам виводиться з ладу за кілька секунд [72]. Кремнеземна тканина та кремнеземний мат складаються з аморфного волокна з вмістом кремнію  $\geq 94\%$  та діаметром 9 мкм. Теплопровідність при середній температурі 200°C менше 0,071 Вт/(м·К). Під час випробувань на газовому пальнику було виявлено, що температура за ізоляцією підвищується на 100 °C вище за атмосферну протягом 9–11 с. Авторами також розглядається такий важливий аспект проблеми, як система кріплення окремих секцій або модулів FBB одна до одної вздовж усіх країв, що перекриваються, і бічних стінок платформи з боєприпасами, де використовуються пружинні затискачі та реміні, а також комбінація пружинних затискачів та ремінів з липучкою Velcro. Важливо, що всі матеріали ремінів і Velcro є вогнестійкими [72].

Для виготовлення вогнезахисних ковдр використовують шари тканин з волокон як органічних, так і неорганічних полімерів [73, 74–77]. Прикладом використання комбінації тканин на основі неорганічних волокон є система термоізоляції, яка використовується NASA для підвищення термічного опору в гіперзвукових кораблях [73]. Передня та задня поверхні системи складаються з чотирьох шарів алюмоборосилікатної (ABS) тканини з п'ятим внутрішнім шаром кремнеземної тканини. Середина складається з комбінації шарів таких матеріалів: (1) кремнеземний повсть (98,5% SiO<sub>2</sub>), (2) ABS (62% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 14% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і 24% SiO<sub>2</sub>), (3) кремнеземний волокнистий мат (99,9% SiO<sub>2</sub>), (4) глиноземний мат (95% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5% SiO<sub>2</sub>) та (5) кремнеземний повсть (98,5% SiO<sub>2</sub>). Теплові властивості цих шарів наведено в таблиці 1.

Дані табл. 1 показують, що значення коефіцієнта теплової дифузії для матеріалів на основі неорганічних волокон становлять від 0,47 до 0,58 мм<sup>2</sup>/с. Цей коефіцієнт можна розглядати як параметр, що виражає опір проникненню тепла. Автори роблять висновок, що поєднання тканин на основі оксиду алюмінію та кремнезему може використовуватися і під час виробництва вогнезахисних ковдр для боєприпасів.

Таблиця 1

Теплові властивості шарів системи термоізоляції, що використовує NASA в гіперзвукових кораблях [73]

Шар	Матеріал	Щільність, кг/м <sup>3</sup>	Теплоємність, кДж/(кг·К)	Теплопровідність, кВт/(м·К)10 <sup>5</sup>	Коефіцієнт теплової дифузії <sup>1</sup> , мм <sup>2</sup> /с
1	Кремнеземний повсть	96	0,349	1,58	0,47
2	ABS	96	0,388	2,16	0,58
3	Кремнеземний волокнистий мат	136	0,258	1,87	0,53
4	Глиноземний мат	96	0,336	1,80	0,56
5	Кремнеземний повсть	96	0,349	1,58	0,47

Примітка. <sup>1</sup>наведено в [76]

Прикладом використання комбінації тканин на основі органічних і неорганічних полімерних волокон є система, використана для космічного човна Columbia [73]. Система складалася з ватину зі скловолокна, просоченого силіконом, вшитого в чохла з армованої поліімідної плівки, з чергуванням шарів перфорованої поліімідної плівки та PET. Авторами [73] була розроблена вогнестійка ковдра для захисту боєприпасів, яка складається з параарамідних і керамічних волокон. Балістичні характеристики ковдри забезпечують захист від

осколків масою 300 г і 454 г, що рухалися зі швидкостями 140 м/с і 60 м/с відповідно. Були проведені експерименти з вогнепроникності на тканинах та матеріалах покриття, які могли бути використані при розробці FBB. Випробування мали на меті імітувати умови, створені під час горіння палива, що лежить на поверхні FBB. При випробуваннях з застосуванням газового пальника ковдра забезпечувала захист від полум'я, коли температура перевищувала 1200 °С, протягом 10 с.

Зразки вогнезахисних ковдр також були досліджені в установці, яка визначає проникнення тепла (склад зразків наведено в табл. 2). Перші три зразки були тонкими (№ 1, 2, 3) (5 мм), а інші три (№ 4, 5, 6) товстими (20–25 мм). Перегляд профілів температури передньої та задньої поверхні зразків на рис. 6–8 вказує на те, що затримка підвищення температури задньої поверхні залежить від товщини та складу зразка.

Для тонких зразків (№ 1, 2, 3) підвищення температури задньої поверхні почалося між ~20 та 60 с (приклади на рис. 6 і 7). Для більш товстих зразків (товщина 20-25 мм, № 4, 5, 6) підвищення температури задньої поверхні почалося між ~80 і 130 с (приклад на рис. 8).

Таблиця 2

**Зразки ковдр FBB для експерименту з проникнення тепла [73]**

Зразок	Послідовність шарів у зразку	Товщина, мм
1	Алюміній. ABS. Алюміній	5, поверхня, пофарбована в чорний колір
2	Кремнеземне волокно. Керамічне волокно. Кремнеземне волокно.	5, бежевий колір
3	Керамічна тканина. Керамічна ковдра. Керамічна тканина.	5, бежевий колір
4	Фольга з нержавіючої сталі. Керамічне волокно. Кремнеземне волокно.	20, срібний/бежевий колір
5	Поліорганосилоксан. Керамічне волокно. Кремнеземне волокно.	20, бежевий колір
6	Фольга з нержавіючої сталі. Керамічне волокно. Алюміній.	25, срібний/ блискучий колір

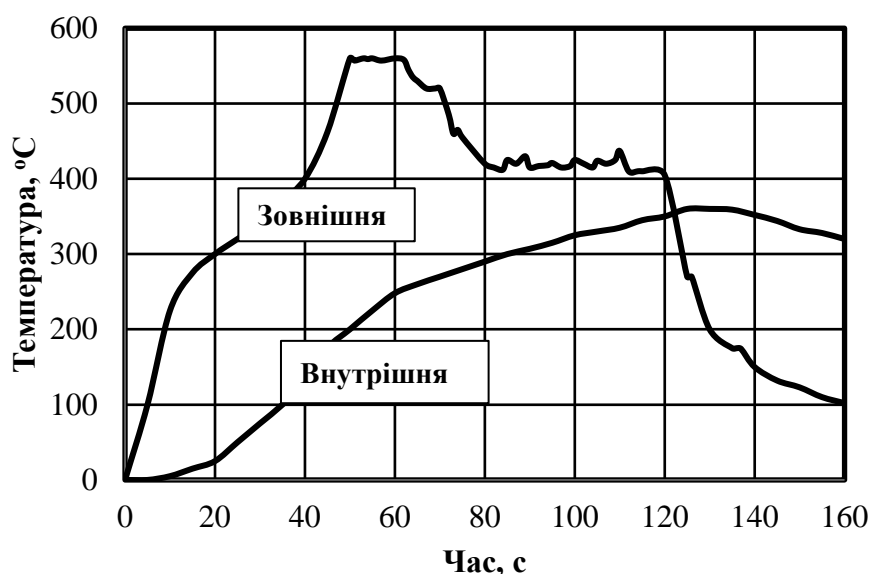


Рис.6. Середня температура зовнішньої та внутрішньої поверхонь в центрі зразка № 1 товщиною 5 мм (84 кВт/м<sup>2</sup> протягом 120 с) [73]

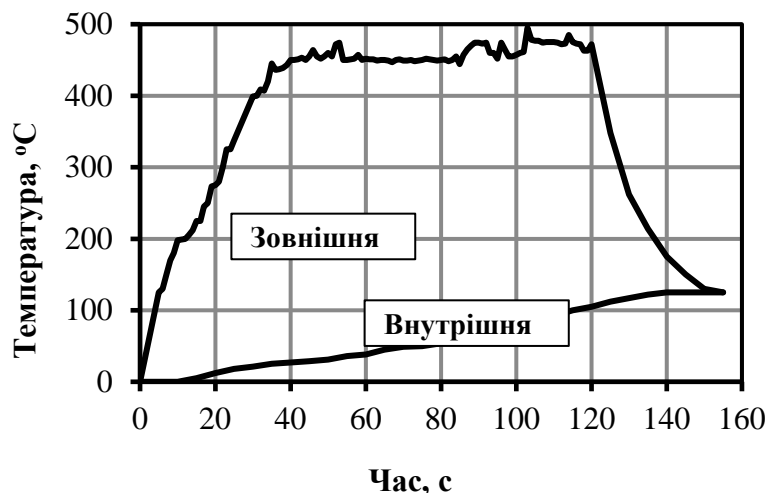


Рис. 7. Середня температура зовнішньої та внутрішньої поверхонь вище температури навколишнього середовища зразка № 2 товщиною 5 мм (84 кВт/м<sup>2</sup> протягом 120 с) [73]

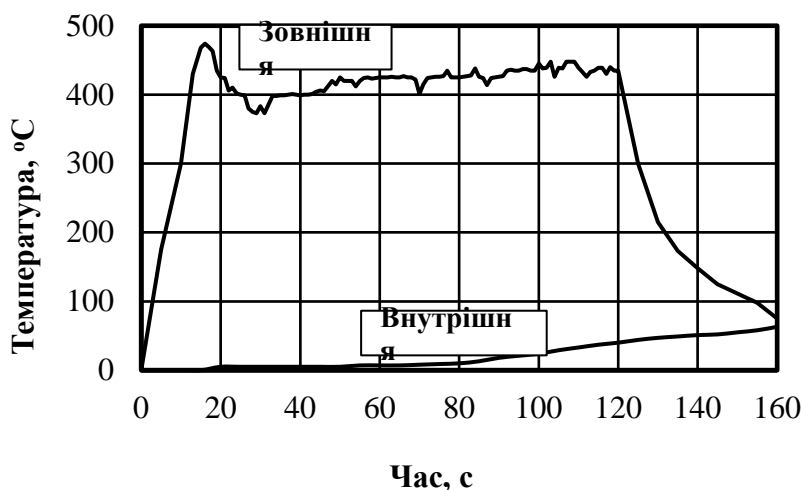


Рис. 8. Середня температура зовнішньої та внутрішньої поверхонь в центрі зразка №6 товщиною 25 мм. (84 кВт/м<sup>2</sup> протягом 120 с) [73]

Ф. Takahashi [78] дослідив теплові характеристики відносно тонких (0,15-3,7 мм) вогнезахисних ковдр інтумесцентного типу, до складу яких включено групи із чотирьох різних волокон: арамідне, скловолокно, аморфний кремнезем і вуглецеве волокно та їх композити. Зразок без домішок або з додаванням волокон піддавали тепловому потоку (до 84 кВт/м<sup>2</sup>) за допомогою газового пальника та конусного нагрівача переважно за рахунок конвекції або випромінювання [78]. Автори [78] оцінювали термоізоляційні властивості пінококсового шару вогнезахисних ковдр за допомогою коефіцієнта теплового блокування (Heat Blocking Efficiency, HBE) за вимірними температурами і тепловим потоком, що проходить через зразок в стаціонарному стані:

$$\text{HBE} = \left[ 1 - \frac{\text{Переданий тепловий потік}}{\text{Падаючий тепловий потік}} \right] \times 100\%. \quad (1)$$

Оскільки пінококсовий шар є пористим середовищем, внутрішня теплопередача включає як теплопровідність, так і випромінювання. Теплопровідність відбувається переважно через тверду фазу, а випромінювання – в газовій фазі між стінками пор при різних температурах.

Для більшості зразків коефіцієнти НВЕ (рівняння 1) становили приблизно  $70 \pm 10\%$  як для конвекції, так і для випромінювання, і лише незначно збільшувалися зі збільшенням товщини зразка або падаючого теплового потоку. Неткані (повстяні) матеріали з низькою теплопровідністю показали значно кращу ізоляцію (до 87%) проти конвективного тепла. Матеріали з алюмінієвим покриттям продемонстрували винятково високі значення НВЕ (до 98%) для випромінювання, тоді як вуглецеве і арамідне волокна показали нижчі значення НВЕ (до 50%) через ефективне поглинання випромінювання.

Для фіксованої товщини зразків значення НВЕ (конвективне тепло) змінюються таким чином: вуглецеве волокно (неткане) > арамідне волокно/ вуглецеве волокно /скловолокно > вуглецеве волокно (ткане) > скловолокно  $\approx$  арамідне волокно/скловолокно  $\approx$  кремнезем. Тонкі ( $\approx 1$  мм) вогнезахисні ковдри продемонстрували високі коефіцієнти теплового блокування (60–90%), що можна порівняти з показниками пінококсового шару товщиною  $\approx 20$  мм вогнезахисного покриття. Вогнезахисні ковдри підходять не тільки для термоізоляції та пригнічення невеликих пожеж, але й для захисту від прямого контакту з полум'ям [78].

Ф. Takahashi зі співавторами [78, 79] довели, що для конвективного падаючого теплового потоку втрата тепла через випромінювання з високотемпературних поверхонь і ефективна теплоізоляція за допомогою матеріалу ковдри є основними механізмами теплопередачі для відносно високих НВЕ. Що стосується падаючого теплового потоку за рахунок випромінювання, алюмінізовані матеріали з високою відбивною здатністю призводять до надзвичайно високих показників НВЕ.

Слід зазначити, що наукових досліджень стосовно підвищення ефективності протипожежних ковдр бракує порівняно з роботами, пов'язаними з підвищенням вогнестійкості тканин. Ефективність протипожежних ковдр при тривалому впливі тепла мало відома, незважаючи на її важливість у випадку спалаху від конструкції до конструкції. Такі аспекти як механізми блокування тепла та ефективність одно- та багат шарових матеріалів потребують додаткового вивчення. Вплив нових матеріалів на довкілля та їх довговічність в польових умовах для забезпечення тривалої експлуатації без втрати захисних властивостей також вимагає подальших досліджень.

### **Висновки.**

Розглянутий літературний матеріал дозволяє визначити основні напрямки розроблення вогнезахисних рулонних матеріалів, які спрямовані на покращення вогнестійкості, механічних властивостей та загальної ефективності матеріалів:

- використання нових вогнезахисних добавок та наповнювачів. Сучасні вогнезахисні рулонні матеріали включають інноваційні добавки та наповнювачі, такі як наноматеріали (наприклад, наноглини, нановолокна), які підвищують вогнестійкість та механічну міцність. Використання нанотехнологій дозволяє створити бар'єрні шари, які уповільнюють поширення вогню та покращують ізоляційні властивості;

- комбіновані системи армування. Комбінування різних армуючих матеріалів, таких як скловолокно, вуглеволокно та базальтові волокна, дозволяє досягти високої механічної міцності та термостійкості. Такі системи забезпечують підвищену стійкість до розривів та механічних пошкоджень при дії високих температур;

- використання інтумесцентних систем, що поєднують у собі теплову ізоляцію, механічний захист та запобігання доступу кисню. Їхня здатність багаторазово збільшуватися в об'ємі при нагріванні дозволяє створювати міцний захисний бар'єр, забезпечуючи надійний захист конструкцій в умовах пожежі;

- створення матеріалів, що поєднують у собі властивості кількох різних компонентів, наприклад, полімерів та неорганічних сполук. Такі матеріали мають високу термостійкість, механічну міцність і довговічність;

- екологічно чисті та безпечні матеріали. Сучасні тенденції також включають розробку вогнезахисних матеріалів, які не містять шкідливих для здоров'я та довкілля речовин. Екологічно чисті вогнезахисні добавки, такі як фосфорорганічні сполуки та модифіковані полімери, стають все більш популярними.

Найбільш перспективними є вогнезахисні рулонні матеріали, які містять у своєму складі реактивні системи вогнезахисту – покриття інтумесцентного типу. Такі матеріали можуть бути застосовані не лише для забезпечення зберігання боєприпасів. Вони можуть бути основою для організації мобільного вогнезахисту конструкцій у місцях дислокації особового складу, а також для створення надійних протипожежних рішень для захисту від руйнівної дії пожежі.

### References

### Література

1. Vakhitova, L. M., Kalafat, K. V., Taran, N. A., Drizhd, V. L. (2015). Khimichni rishennia problem z vohnezakhystu [Chemical solutions to fire protection problems]. *Nauka ta innovatsii = Science and innovation*, 11 (6), 47–56. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/scin11.06.047> [in Ukrainian].
1. Вахітова Л. М., Калафат К. В., Таран Н. А., Дріжд В. Л. Хімічні рішення проблем з вогнезахисту. *Наука та інновації*. 2015. № 11 (6). С. 47–56. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/scin11.06.047>.
2. 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. doi:10.1177/07349041211050328.
2. Brent K. M., T'ien J. S. Performance optimization of thin fire blankets by varying their radiative properties. *Journal of Fire Sciences*. 2022. № 40 (1). P. 26–43. doi:10.1177/07349041211050328.
3. Yang, W., Abu Bakar, B. H., Mamat, H., Gong, L. (2022). A New, Green, Recyclable Fireproof Insulation Board for Use in Integrated Composite Structure Fire Protection Systems. *Fire*, 5, 203. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire5060203>.
3. Yang W., Abu Bakar B. H., Mamat H., Gong L. A New, green, recyclable fireproof insulation board for use in integrated composite structure fire protection systems. *Fire*. 2022. № 5. Art. 203. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire5060203>.
4. 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). 55 p. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA387272.pdf>.
4. Tewarson A., Wu P. K., Chin W. K., Shuford R. Fire Blankets for Munition Protection: Flame and Heat Blocking Properties of Advanced Materials (ARL-TR-2398, Army Research Laboratory). 2001. 55 p. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA387272.pdf>.
5. UNODA (2021). International Ammunition Technical Guidelines (IATG 01.10). United Nations Office for Disarmament Affairs (UNODA). New York. 1354 p.
5. International Ammunition Technical Guidelines (IATG 01.10) United Nations Office for Disarmament Affairs (UNODA). New York, 2021. 1354 p.
6. Veselivskiy, R. B., Smoliak, D. V. (2021). Сposoby vohnezakhystu metalevykh budivelnykh konstruktsii [Methods of fire protection of metal building structures]. *Pozhezhna bezpeka = Fire safety*, 39, 63–76 [in Ukrainian].
6. Веселівський Р. Б., Смоляк Д. В. Способи вогнезахисту металевих будівельних конструкцій. *Пожежна безпека*. 2021. Вип. 1. № 39. С. 63–76.
7. de Silva, D., Nuzzo, I., Nigro, E., Occhiuzzi, A. (2022). Intumescent coatings for fire resistance of steel structures: current approaches for qualification and design. *Coatings*, 2 (5), 696.
7. de Silva D., Nuzzo I., Nigro E., Occhiuzzi A. Intumescent coatings for fire resistance of steel structures: current approaches for qualification and design. *Coating*. 2022. № 2 (5). Art. 696.
8. Fire-resistant Coatings Market by Type (Intumescent Coatings, Cementitious Coatings), Technology (Solvent-borne, Water-borne), Substrates (Metal, Wood), Application Technique (Spray, Brush & Roller),
8. Fire-resistant Coatings Market by Type (Intumescent Coatings, Cementitious Coatings), Technology (Solvent-borne, Water-borne), Substrates (Metal, Wood), Application



Application and Region – Global Forecast to 2026. Research and Markets, 2022. 480 p. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5211858/fire-resistant-coatings-market-by-type>.

9. Kalafat, K. V., Vakhitova, L. N. (2021). Analiticheskiy obzor sredstv ognезaschityi stalnyih konstruksiy 2021–2022 [Analytical review of fire protection means for steel structures 2021–2022]. Kyiv: UtsSS. 230 p. [in Russian].

10. Liu, X. D., Qin, S., Li, H. F. et al. (2019). Combination intumescent and kaolin-filled multilayer nanocoatings that reduce polyurethane flammability. *Macromolecular Materials and Engineering*, 304 (2), 180053.

11. Fox, D. M., Cho, W., Dubrulle, L., Grützmacher, P. G., Zammarano, M. (2020). Intumescent polydopamine coatings for fire protection. *Green Materials*, 1900065. 10 p.

12. Zehfuß, J., Sander, L. (2021). Gypsum plasterboards under natural fire – Experimental investigations of thermal properties. *Civil Engineering Design*, 3(3), 62–72.

13. Park, S. H., Manzello, S. L., Bentz, D. P., Mizukami T. (2009). Determining thermal properties of gypsum board at elevated temperatures. *Fire and Materials*, 34, 237–250.

14. Kolarkar, P., Mahendran, M. (2014). Experimental studies of gypsum plasterboards and composite panels under fire conditions. *Fire and Materials*, 38(1), 13–35.

15. Caetano, H., Laím, L., Santiago, A., Durães, L. Shahbazian, A. (2022). Development of passive fire protection mortars. *Appl. Sci.*, 12, 2093.

16. Veselivskiy, R. B., Yakovchuk, R. S., Vasylenko, O. O., Semeniuk, P. V. (2015). Eksperymentalne doslidzhennia vohnestiikosti ohorodzhivalnykh konstruksii z hipsokartonnyimi plytamy. [Experimental study of the fire resistance of enclosing structures with gypsum plasterboards]. *Pozhezhna bezpeka = Fire safety*, 27, 26–32 [in Ukrainian].

17. DBN V.1.1-7-2002. Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva. Zahalni vymohy / Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy [DBN V.1.1-7-2002. Fire safety of construction objects. General requirements / Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine]. Kyiv, 2017. 38 p. [in Ukrainian].

18. Pat. 6565040 US, IPC B64C 1/40. Burn through resistant systems for transportation, especially aircraft / Fay R. M. (US), Wulliman R. S. (US), Stacy J. W. (US), Townsend J. C. (US), Volenec S. N (US), inventors; Johns Manville International Inc. (US), assignee – No.

Technique (Spray, Brush & Roller), Application and Region – Global Forecast to 2026. Research and Markets, 2022. 480 p. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5211858/fire-resistant-coatings-market-by-type>.

9. Калафат К. В., Вахитова Л. Н. Аналитический обзор средств огнезащиты стальных конструкций 2021–2022. К.: УЦСС, 2021. 230 с.

10. Liu X. D., Qin S., Li. H. F. et al. Combination intumescent and kaolin-filled multilayer nanocoatings that reduce polyurethane flammability. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2019. Vol. 304 (2). Art. 180053.

11. Fox D. M., Cho W., Dubrulle L, Grützmacher P. G., Zammarano M. Intumescent polydopamine coatings for fire protection. *Green Materials*. 2020. 1900065. 10 p.

12. Zehfuß J., Sander L. Gypsum plasterboards under natural fire – Experimental investigations of thermal properties. *Civil Engineering Design*. 2021. № 3(3). P. 62–72.

13. Park S. H., Manzello S. L., Bentz D. P., Mizukami T. Determining thermal properties of gypsum board at elevated temperatures. *Fire and Materials*. 2009. Vol. 34. P. 237–250.

14. Kolarkar P., Mahendran M. Experimental studies of gypsum plasterboards and composite panels under fire conditions. *Fire and Materials*. 2014. Vol. 38 (1). P. 13–35.

15. Caetano H., Laím L., Santiago A., Durães L. Shahbazian A. Development of passive fire protection mortars. *Appl. Sci*. 2022. № 12. Art. 2093.

16. Веселівський Р. Б., Яковчук Р. С., Василенко О. О., Семенюк П. В. Експериментальне дослідження вогнестійкості огорожувальних конструкцій з гіпсокартонними плитами. *Пожежна безпека*. 2015. Vol. 27. P. 26–32.

17. ДБН В.1.1-7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. Київ, 2017. 38 с.

18. Pat. 6565040 US, IPC B64C 1/40. Burn through resistant systems for transportation, especially aircraft / Fay R. M. (US), Wulliman R. S. (US), Stacy J. W. (US), Townsend J. C. (US), Volenec S. N (US), inventors; Johns

- US20020017590; applied for on 09.10.2001; published on 20.05.2003. URL: <https://www.uspto.gov>.
19. ASTM E119 Standard test methods for fire tests of building construction and materials. 2017. 22 p. URL: <https://www.astm.org/e0119-05a.html>.
20. Pat. 3913290 US, IPC E04F 13/06, E04C 31293. Fire insulation edge reinforcements for structural members / Billing R. W. (US), Castle G. K. (US), inventors; Avco Corp. Appl. (US), assignee – No. US 478844; applied for on 13.06.1974; published on 21.10.1975. URL: <https://www.uspto.gov>.
21. Pat. 3915777 US, IPC C09D 5/18. Method of applying fire-retardant coating materials to a substrate having corners or other sharp edges / Kaplan B. B. (US), inventor; Albi Manuf. Co Inc. Appl. (US), assignee – No. US 368140; applied for on 08.06. 1973; published on 28.10.1975. URL: <https://www.uspto.gov>.
22. Pat. 10533318 US, IPC E04B 1/944, E04B 1/947. Prefabricated form for fireproofing structural steel and method of use / Miller P. G., Pool R. B., inventors; Alfred Miller Contracting Co (US), assignee. – No. US15/892910; applied for on 09.02.2018; published on 14.01.2021. URL: <https://www.uspto.gov>.
23. Pat. 8292027 US, IPC E4B I/84, D04B I/00. Composite laminate for a thermal and acoustic insulation blanket / Richardson L. B. (US), KnoffJian W. F. (US), Wang J. (US), inventors; DuPont Safety and Construction Inc. (US), assignee. – No.US20110094826 (US); applied for on 14.04. 2010; published on 23.10.2012. URL: <https://www.uspto.gov>.
24. Pat. 7767597 US, IPC D04H IMO, B32B 27/12. Fire barrier film laminate / Garvey C. E. (US), inventor; Unifrax I. LLC. (US), assignee – № US12/008040; applied for on 08.01.2008; published on 03.08.2010. URL: <https://www.uspto.gov>.
25. Pat. 6670291 US, IPC C03C 25/32, C03C 25/42. Laminate sheet material for fare barrier applications / Tompkins T. L. (US), Vogel-Martin M. M. (US), inventors; 3M Innovative Properties Co (US), assignee – No. US09/691575; applied for on 10.18.2000; published on 12.30.2003. URL: <https://www.uspto.gov>.
26. Kandola, B. K., Luangtriratana, P., Duquesne, S., Bourbigot, S. (2015). The Effects of Thermophysical Properties and Environmental Conditions on Fire Manville International Inc. (US), assignee – No. US20020017590; applied for on 09.10.2001; published on 20.05.2003. URL: <https://www.uspto.gov>.
19. ASTM E119 Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. 2017. 22 p. URL: <https://www.astm.org/e0119-05a.html>.
20. Pat. 3913290 US, IPC E04F 13/06, E04C 31293. Fire insulation edge reinforcements for structural members / Billing R. W. (US), Castle G. K. (US), inventors; Avco Corp. Appl. (US), assignee – No. US 478844; applied for on 13.06.1974; published on 21.10.1975. URL: <https://www.uspto.gov>.
21. Pat. 3915777 US, IPC C09D 5/18. Method of applying fire-retardant coating materials to a substrate having corners or other sharp edges / Kaplan B. B. (US), inventor; Albi Manuf. Co Inc. Appl. (US), assignee – No. US 368140; applied for on 08.06. 1973; published on 28.10.1975. URL: <https://www.uspto.gov>.
22. Pat. 10533318 US, IPC E04B 1/944, E04B 1/947. Prefabricated form for fireproofing structural steel and method of use / Miller P. G., Pool R. B., inventors; Alfred Miller Contracting Co (US), assignee. – No. US15/892910; applied for on 09.02.2018; published on 14.01.2021. URL: <https://www.uspto.gov>.
23. Pat. 8292027 US, IPC E4B I/84, D04B I/00. Composite laminate for a thermal and acoustic insulation blanket / Richardson L. B. (US), KnoffJian W. F. (US), Wang J. (US), inventors; DuPont Safety and Construction Inc. (US), assignee. – No.US20110094826 (US); applied for on 14.04. 2010; published on 23.10.2012. URL: <https://www.uspto.gov>.
24. Pat. 7767597 US, IPC D04H IMO, B32B 27/12. Fire barrier film laminate / Garvey C. E. (US), inventor; Unifrax I. LLC. (US), assignee – № US12/008040; applied for on 08.01.2008; published on 03.08.2010. URL: <https://www.uspto.gov>.
25. Pat. 6670291 US, IPC C03C 25/32, C03C 25/42. Laminate sheet material for fare barrier applications / Tompkins T. L. (US), Vogel-Martin M. M. (US), inventors; 3M Innovative Properties Co (US), assignee – No. US09/691575; applied for on 10.18.2000; published on 12.30.2003. URL: <https://www.uspto.gov>.
26. Kandola B. K., Luangtriratana P., Duquesne S., Bourbigot S. The Effects of Thermophysical Properties and Environmental Conditions on

- Performance of Intumescent Coatings on Glass Fibre-Reinforced Epoxy Composites. *Materials*, 8, 5216–5237.
27. Pat. 4069075 US, IPC E04B1/943. Structural support for char derived from intumescent coatings / Billing R. W. (US), Castle G. K. (US), inventors; Current Assignee Avco Corp. (US), assignee – No. US05/544168; applied for on 27.01.1975; published on 17.01.1978. URL: <https://www.uspto.gov>.
28. Nolan, D. P. (2019). Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities. noyes publications. Westwood. 426 p.
29. Pat. 2938283 CA, IPC B05D1/18, B05D3/042. Intumescent grid / Wall W. (CA), Wall A. (CA), Adab S. (CA), inventors; Canadian Borax Inc. Appl. (CA), assignee – No. CA2938283A, applied for on 05.08.2016; published on 05.02.2018. URL: <https://patents.google.com>.
30. Pat. 4069075 US, IPC B29C 25/00. Structural support for char derved from intumescent coatings / Billing R.W. (US), Castle G.K. (US), inventors; Avco Corp. (US), assignee – No. US05/544168; applied for on 27.01.1975; published on 17.01.1978. URL: <https://www.uspto.gov>.
31. Minkin, D. Y., Mironchev, A. V., Tursenev, S. A. (2017). Technologies of maintaining fire safety of the offshore oil and gas fields facilities. *Pollution Research*, 36 (3), 640–644.
32. Gravit, M., Gumerova, E., Bardin, A., Lukinov, V. (2018). Increase of fire resistance limits of building structures of oil and gas complex under hydrocarbon fire. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. Murgul V. and Popovic Z. (eds.). Springer International Publishing AG. P. 818–829.
33. Fox, D. M., Cho, W., Dubrulle, L., Grützmacher, P. G., Zammarano, M. (2020). Intumescent polydopamine coatings for fire protection. *Green Materials*, 1900065.
34. Narasimhan, J. H., Giuliani, L., Jomaas, G. (2019). Development of fire protection for bridge cable systems. *The 14th Nordic Steel Construction Conference* (Copenhagen, September 18–20, 2019), 3, 671–676.
35. 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.
- Fire Performance of Intumescent Coatings on Glass Fibre-Reinforced Epoxy Composites. *Materials*. 2015. Vol. 8. P. 5216–5237.
27. Pat. 4069075 US, IPC E04B1/943. Structural support for char derived from intumescent coatings / Billing R. W. (US), Castle G. K. (US), inventors; Current Assignee Avco Corp. (US), assignee – No. US05/544168; applied for on 27.01.1975; published on 17.01.1978. URL: <https://www.uspto.gov>.
28. Nolan D.P. Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities. noyes publications. Westwood, 2019. 426 p.
29. Pat. 2938283 CA, IPC B05D1/18, B05D3/042. Intumescent grid / Wall W. (CA), Wall A. (CA), Adab S. (CA), inventors; Canadian Borax Inc. Appl. (CA), assignee – No. CA2938283A, applied for on 05.08.2016; published on 05.02.2018. URL: <https://patents.google.com>.
30. Pat. 4069075 US, IPC B29C 25/00. Structural support for char derved from intumescent coatings / Billing R.W. (US), Castle G.K. (US), inventors; Avco Corp. (US), assignee – No. US05/544168; applied for on 27.01.1975; published on 17.01.1978. URL: <https://www.uspto.gov>.
31. Minkin D. Y., Mironchev A. V., Tursenev S. A. Technologies of maintaining fire safety of the offshore oil and gas fields facilities. *Pollution Research*. 2017. Vol. 36 (3). P. 640–644.
32. Gravit M., Gumerova E., Bardin A., Lukinov V. Increase of fire resistance limits of building structures of oil and gas complex under hydrocarbon fire. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. Murgul V. and Popovic Z. (eds.). Springer International Publishing AG., 2018. P. 818–829.
33. Fox D. M., Cho W., Dubrulle L., Grützmacher P. G., Zammarano M. Intumescent polydopamine coatings for fire protection. *Green Materials*. 2020. Art. 1900065.
34. Narasimhan J. H., Giuliani L., Jomaas G. Development of fire protection for bridge cable systems. *The 14th Nordic Steel Construction Conference* (Copenhagen, September 18–20, 2019). 2019. Vol. 3. P. 671–676.
35. Triantafyllidis Z., Bisby L. A. Fibre-reinforced intumescent fire protection coatings as a confining material for concrete columns.

36. Application 2016194766 WO, IPC D03D15/513. Flame-retardant fabric and protective clothing in which the same is used / inventor-applicant Yoshitomo Matsumoto Miwo Wataru (CN) – No. CN201680031673.0A; applied for on 26.05.2016; published on 08.12.2016. URL: <https://patents.google.com>.
37. Chowdhury, A. K. R. (2020). Flame Retardants for Textile Materials. CRC Press. 94 p.
38. Application 2017121922 US, IPC E02B3/122. Production and application of fire resistant eroision control mat / Lipscomb C. M. (US), inventor; Westerngreen LLC (US), applicant – No. 15/330240 US; applied for on 26.08.2016; published on 03.07.2018. URL: <https://www.uspto.gov>.
39. Pat. 3053484 EP, IPC A47C31/001. Fire resistant mattresses, fire resistant mattress cover materials and related methods / Lowe V. J. (US) inventor; Trafalgar Associates LLC (US), assignee – No. US15/019330; applied for on 17.06.2015; published on 15.11.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
40. Application 2016178057 WO, IPC D06N3/005. Method for producing flame retardant and/or waterproof multilayer fabric and flame retardant and/or waterproof multilayer fabric / Canonico S.B. (IT), inventor; Pratrivero S.P.A. (IT), applicant – No. PCT/IB2015/053248; applied for on 04.05.2015; published on 10.11.2016. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
41. Alongi, J., Carosio, F., Malucelli, G. (2014). Current emerging techniques to impart flame retardancy to fabrics: an overview. *Polym. Degrad. Stabil.*, 106, 138–149.
42. Qi, P., Chen, F., Li, Y., Li, H., Gu, X., Sun, J., Zhang, S. (2023). A review of durable flame retardant fabrics by finishing: fabrication strategies and challenges. *Adv. Fiber Mater.*, 5 (3), 731–763.
43. Application 2017129783WO, IPC C09D5/185. Textiles having flame protection function / Lottenbach R. (CH), Gartmann V. (CH), inventors; Schoeller Textil Ag (CH), applicant – No. PCT/EP2017/051831; applied for on 27.01.2017; published on 03.08.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
44. Pat. 3173390 EP, IPC C03C25/321. Flat textile substrate with at least partial fire protection coating, method
- Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 231. Art. 117085.
36. Application 2016194766 WO, IPC D03D15/513. Flame-retardant fabric and protective clothing in which the same is used / inventor-applicant Yoshitomo Matsumoto Miwo Wataru (CN) – No. CN201680031673.0A; applied for on 26.05.2016; published on 08.12.2016. URL: <https://patents.google.com>.
37. Chowdhury A. K. R. Flame Retardants for Textile Materials. CRC Press, 2020. 94 p.
38. Application 2017121922 US, IPC E02B3/122. Production and application of fire resistant eroision control mat / Lipscomb C. M. (US), inventor; Westerngreen LLC (US), applicant – No. 15/330240 US; applied for on 26.08.2016; published on 03.07.2018. URL: <https://www.uspto.gov>.
39. Pat. 3053484 EP, IPC A47C31/001. Fire resistant mattresses, fire resistant mattress cover materials and related methods / Lowe V. J. (US) inventor; Trafalgar Associates LLC (US), assignee – No. US15/019330; applied for on 17.06.2015; published on 15.11.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
40. Application 2016178057 WO, IPC D06N3/005. Method for producing flame retardant and/or waterproof multilayer fabric and flame retardant and/or waterproof multilayer fabric / Canonico S.B. (IT), inventor; Pratrivero S.P.A. (IT), applicant – No. PCT/IB2015/053248; applied for on 04.05.2015; published on 10.11.2016. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
41. Alongi J., Carosio F., Malucelli G. Current emerging techniques to impart flame retardancy to fabrics: an overview. *Polym. Degrad. Stabil.* 2014. Vol. 106. P. 138–149.
42. Qi P., Chen F., Li Y., Li H., Gu X., Sun J., Zhang S. A review of durable flame retardant fabrics by finishing: fabrication strategies and challenges. *Adv. Fiber Mater.* 2023. Vol. 5 (3). P. 731–763.
43. Application 2017129783WO, IPC C09D5/185. Textiles having flame protection function / Lottenbach R. (CH), Gartmann V. (CH), inventors; Schoeller Textil Ag (CH), applicant – No. PCT/EP2017/051831; applied for on 27.01.2017; published on 03.08.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
44. Pat. 3173390 EP, IPC C03C25/321. Flat textile substrate with at least partial fire



- for its production and uses thereof/ Zettl H. (DE), inventor; Vitrolan Textile Glass GmbH (DE), assignee – № DK15196448.3T; applied for on 26.11.2015; published on 31.05.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
45. Khaydarov, I. N., Ismailov, R. I., Ismailova, R. M., Yokubova, N. F., Baysenbaev, O. K. (2020). Chemical characterization flame retardant suspensions for impregnation of cellulose materials. *Technical science and innovation* (TSTU, Tashkent), 3, 24–31.
46. Herlinger, H., Haroltmann, G., Hermanutz, F. (1991). Preparation of flame-retardant polyacrylonitrile fibers by introducing polymer phosphorus compounds into the spinning solution. *Melliand Textilber*, 72(5), 353–359.
47. Pat. 3374441 EP, IPC C09D 5/18, C07F 9/6571. Materials having a fire-resistant coating containing a spiroposphonate / Butz V. (DE), inventor; Thor GmbH (DE), assignee – No. EP16794514.6A; applied for on 28.10.2016; published on 19.09.2018. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
48. Application 2016189396 WO, IPC A62B17/003. Fire extinguishing impregnating agent and its use in absorbent textiles and fire suit resistant to direct flame and fire evacuation device for use in direct flame / Lučanik A. (SZ), inventor; Dytrt P. (SZ), Lučanik A. (SZ), applicant – No. PCT/IB2016/001197; applied for on 27.05.2012; published on 12.01.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
49. Liu, J., Sun, Y., Ma, R., Zhou, X., Ye, L., Mailander, V., Steffen, W., Kappl, M., Butt, H.-J. (2022). Mechanically robust and flame-retardant superhydrophobic textiles with antibiofouling performance. *Langmuir*, 38 (42), 12961–12967.
50. Xue, C. H., Wu, Y., Guo, X. J., Liu, B. Y., Wang, H. D., Jia, S. T. (2020). Superhydrophobic, flame retardant and constructive cotton fabrics via layer-by-layer assembly of carbon nanotubes for flexible sensing electronics. *Cellulose*, 27, 3455–3468.
51. Qi, L., Qiu, S., Xi, J., Yu, B., Hu, Y., Xing, W. (2022). Construction of super-hydrophobic, highly effective flame retardant coating for cotton fabric with super Washability and abrasion resistance, *J. Colloid Interface Sci.*, 607, 2019–2028.
52. Application 2017091976 WO, IPC D06M11/70. Expandable flame retardant system for flame retardant of mattress or pillow inner sleeve filler and method of its use protection coating, method for its production and uses thereof/ Zettl H. (DE), inventor; Vitrolan Textile Glass GmbH (DE), assignee – № DK15196448.3T; applied for on 26.11.2015; published on 31.05.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
45. Khaydarov I. N., Ismailov R. I., Ismailova R. M., Yokubova N. F., Baysenbaev O. K. Chemical characterization flame retardant suspensions for impregnation of cellulose materials. *Technical science and innovation* (TSTU, Tashkent). 2020. № 3. P. 24–31.
46. Herlinger H., Haroltmann G., Hermanutz F. Preparation of flame-retardant polyacrylonitrile fibers by introducing polymer phosphorus compounds into the spinning solution. *Melliand Textilber*. 1991. Vol. 72 (5). P. 353–359.
47. Pat. 3374441 EP, IPC C09D 5/18, C07F 9/6571. Materials having a fire-resistant coating containing a spiroposphonate / Butz V. (DE), inventor; Thor GmbH (DE), assignee – No. EP16794514.6A; applied for on 28.10.2016; published on 19.09.2018. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
48. Application 2016189396 WO, IPC A62B17/003. Fire extinguishing impregnating agent and its use in absorbent textiles and fire suit resistant to direct flame and fire evacuation device for use in direct flame / Lučanik A. (SZ), inventor; Dytrt P. (SZ), Lučanik A. (SZ), applicant – No. PCT/IB2016/001197; applied for on 27.05.2012; published on 12.01.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
49. Liu J., Sun Y., Ma R., Zhou X., Ye L., Mailander V., Steffen W., Kappl M., Butt H.-J. Mechanically robust and flame-retardant superhydrophobic textiles with antibiofouling performance. *Langmuir*. 2022. Vol. 38 (42). P. 12961–12967.
50. Xue C. H., Wu Y., Guo X. J., Liu B. Y., Wang H. D., Jia S. T. Superhydrophobic, flame retardant and constructive cotton fabrics via layer-by-layer assembly of carbon nanotubes for flexible sensing electronics. *Cellulose*. 2020. Vol. 27. P. 3455–3468.
51. Qi L., Qiu S., Xi J., Yu B., Hu Y., Xing W. Construction of super-hydrophobic, highly effective flame retardant coating for cotton fabric with super Washability and abrasion resistance, *J. Colloid Interface Sci.* 2022. Vol. 607. P. 2019–2028.
52. Application 2017091976 WO, IPC D06M11/70. Expandable flame retardant system for flame retardant of mattress or pillow

- / Chen Jie (CN), inventor-applicant – inner sleeve filler and method of its use / Chen Jie (CN), inventor-applicant – No. PCT/CN2015/096123; applied for on 01.12.2015; published on 08.06.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>. No. PCT/CN2015/096123; applied for on 01.12.2015; published on 08.06.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
53. He, Q., Wang, J., Wang, G., Ha, X., Li, A. (2023). Construction of a durable superhydrophobic flame-retardant coating on the PET fabrics. *Materials & Design*, 33, 112258. 53. He Q., Wang J., Wang G., Ha X., Li A. Construction of a durable superhydrophobic flame-retardant coating on the PET fabrics. *Materials & Design*. 2023. Vol. 33. Art. 112258.
54. Baddam, Y., Ijaola, A. O., Asmatulu, E. (2021). Fabrication of flame-retardant and superhydrophobic electrospun nanofibers. *Surf. Interfaces*, 23, 101017. 54. Baddam Y., Ijaola A. O., Asmatulu E. Fabrication of flame-retardant and superhydrophobic electrospun nanofibers. *Surf. Interfaces*. 2021. Vol. 23. Art. 101017.
55. Li, A., Wang, G. Y., Zhang, J. Zhang, W., He, S., Ren, Z., Xu, J., Wang, M. Y. (2021). Preparation methods and research progress of superhydrophobic paper. *Coord. Chem. Rev.*, 449, 214207. 55. Li A., Wang G.Y., Zhang J., Zhang W., He S., Ren Z., Xu J., Wang M. Y. Preparation methods and research progress of superhydrophobic paper. *Coord. Chem. Rev.* 2021. Vol. 449. Art. 214207.
56. Gao, S., Li, H., Guan, L., Zheng, X., Lai, W., Chen, X., Zeng, L. (2021). Facile fabrication of superhydrophobic, flame-retardant and conductive cotton fabric for human motion detection. *Cellulose*, 29 (1), 1–13. 56. Gao S., Li H. Guan L., Zheng X., Lai W., Chen X., Zeng L. Facile fabrication of superhydrophobic, flame-retardant and conductive cotton fabric for human motion detection. *Cellulose*. 2021. Vol. 29 (1). P. 1–13.
57. Wang, X., Lu, Y., Zhang, Q., Wang, K., Carmalt, C. J., Parkin, I. P., Zhang, Z. (2021). Superhydrophobic and flame-retardant alginate fabrics prepared through a onestep dip-coating surface-treatment. *Cellulose*, 28 (9), 5973–5984. 57. Wang X., Lu Y., Zhang Q., Wang K., Carmalt C. J., Parkin I. P., Zhang Z. Superhydrophobic and flame-retardant alginate fabrics prepared through a onestep dip-coating surface-treatment. *Cellulose*. 2021. Vol. 28 (9). P. 5973–5984.
59. Li, Q., Zhang, S., Mahmood, K., Jin, Y., Huang, C., Huang, Z., Zhang, S., Ming, W. (2021). Fabrication of multifunctional pet fabrics with flame retardant, antibacterial and superhydrophobic properties, *Prog. Org. Coat.* 157, 106296. 59. Li Q., Zhang S., Mahmood K., Jin Y., Huang C., Huang Z., Zhang S., Ming W. Fabrication of multifunctional pet fabrics with flame retardant, antibacterial and superhydrophobic properties, *Prog. Org. Coat.* 2021. Vol. 157. Art. 106296.
60. Fu, J., Yang, F., Cheng, F., Guo, Z. (2022). Preparation of an electrically productive, flame retardant, and superhydrophobic recycle paper. *Colloid Surf. A-Physicochem. Eng. Asp.*, 642, 128671. 60. Fu J., Yang F., Cheng F., Guo Z. (2022). Preparation of an electrically productive, flameretardant, and superhydrophobic recycle paper. *Colloid Surf. A-Physicochem. Eng. Asp.* 2022. Vol. 642. Art. 128671.
61. Zhou, Q., Wu, W., Zhou, S., Xing, T., Sun, G., Chen, G. (2020). Polydopamine-induced growth of mineralized  $\gamma$ -FeOOH nanorods for construction of silk fabric with excellent superhydrophobicity, flame retardancy and UV resilience. *Chem. Eng. J.*, 382, 122988. 61. Zhou Q., Wu W., Zhou S., Xing T., Sun G., Chen G. (2020). Polydopamine-induced growth of mineralized  $\gamma$ -FeOOH nanorods for construction of silk fabric with excellent superhydrophobicity, flame retardancy and UV resilience. *Chem. Eng. J.* 2020. Vol. 382. Art. 122988.
62. Guo, W., Wang, X., Huang, J., Zhou, Y., Cai, W., Wang, J. (2020). Construction of durable flame-retardant and robust superhydrophobic coatings on cotton fabrics for water oil separation application. *Chem. Eng. J.*, 398, 125661. 62. Guo W., Wang X., Huang J., Zhou Y., Cai W., Wang J. Construction of durable flame-retardant and robust superhydrophobic coatings on cotton fabrics for water oil separation application. *Chem. Eng. J.* 2020. Vol. 398. Art. 125661.

63. Vishwakarma, A., Singh, M., Weclawski, B., Reddy, V. J., Kandola, B. K., Manik, G., Dasari, A., Chattopadhyay, S. (2022). Construction of hydrophobic fire retardant coating on cotton fabric using a layer-by-layer spray coating method. *Int. J. Biol. Macromol.*, 223, 1653–1666.
64. Liu, L., Huang, Z., Pan, Y., Wang, X., Song, L., Hu, Y. (2018). Finishing of cotton fabrics by multi-layered coatings to improve their flame retardancy and water repellency. *Cellulose*, 25, 4791–4803.
65. Gravit, M., Prusakov, V., Shcheglov, N., Kotlyarskaya, I. (2024). Fire protection of steel structures of oil and gas facilities: multilayer, removable, non-combustible covers. *Fire*, 7, 86.
66. Application 202017003447 DE, IPC B32B19/04. Textile multilayer structure made of non-combustible, textile fiber structures in combination with mixtures of intumescent substances for creating a heat and fire barrier / Casaretto R. (DE), inventor-applicant – No. DE202017003447.6U; applied for on 29.06.2017; published on 02.08.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
67. Budykina, T., Anosova, Y. (2022). Thermal resistance of fire retardant materials. *Mag. Civ. Eng.*, 112, 11213.
68. Pang, Y., Zhong, Z., Liu, H., Rao, L. (2012). Research on Fire-Resistant Fabric Properties of Basalt Fiber. *Appl. Mech. Mater.*, 217–219, 1151–1154.
69. Wang, K., Fu, C., Xu, A., Wu, M., Jia, L., Xu, W., Su, B., Xia, Z. (2022). Skin-friendly and highly fireproof fabric up to 1142 °C weaved by basalt @ polyimide yarns. *Compos. Part B. Eng.*, 246, 110238.
70. Pat. 105088794 CN, IPC D06M 15/55. Fire-Proof Basalt Fiber Cloth / Ming, H. (CN), inventor; Sichuan Aerospace Wuyuan Composite Co Ltd (CN), assignee – No. CN201510553702.7A; applied for on 02.09.2015; published on 05.11.2015. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
71. Pat. 20776895 CN, IPC A62C 8/06. Multi-Functional Basalt Fiber Fire Blanket / Xiang W. (CN), Maolin L. (CN), Xiaolong T. (CN), inventors; Sichuan Middle New Fiber Research Institute Co Ltd (CN), assignee – No. CN201820031596.5U; applied for on 09.01.2018; published on 28.08.2018. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
72. Frame, B. J., Hansen, J. G. R. (2004). Fire blocking blanket for protection of stored ammunition. Oak Ridge
63. Vishwakarma A., Singh M., Weclawski B., Reddy V.J., Kandola B.K., Manik G., Dasari A., Chattopadhyay S. Construction of hydrophobic fire retardant coating on cotton fabric using a layer-by-layer spray coating method. *Int. J. Biol. Macromol.* 2022. Vol. 223. P. 1653–1666.
64. Liu L., Huang Z., Pan Y., Wang X., Song L., Hu Y. Finishing of cotton fabrics by multi-layered coatings to improve their flame retardancy and water repellency. *Cellulose*. 2018. Vol. 25. P. 4791–4803.
65. Gravit M., Prusakov V., Shcheglov N., Kotlyarskaya I. Fire protection of steel structures of oil and gas facilities: multilayer, removable, non-combustible covers. *Fire*. 2024. № 7. Art. 86.
66. Application 202017003447 DE, IPC B32B19/04. Textile multilayer structure made of non-combustible, textile fiber structures in combination with mixtures of intumescent substances for creating a heat and fire barrier / Casaretto R. (DE), inventor-applicant – No. DE202017003447.6U; applied for on 29.06.2017; published on 02.08.2017. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
67. Budykina T., Anosova Y. Thermal resistance of fire retardant materials. *Mag. Civ. Eng.* 2022. Vol. 112. Art. 11213.
68. Pang Y., Zhong Z., Liu H., Rao L. Research on Fire-Resistant Fabric Properties of Basalt Fiber. *Appl. Mech. Mater.* 2012. Vol. 217–221. P. 1151–1154.
69. Wang K., Fu C., Xu A., Wu M., Jia L., Xu W., Su B., Xia Z. Skin-friendly and highly fireproof fabric up to 1142 °C weaved by basalt @ polyimide yarns. *Compos. Part B. Eng.*, 2022. Vol. 246. Art. 110238.
70. Pat. 105088794 CN, IPC D06M 15/55. Fire-Proof Basalt Fiber Cloth / Ming, H. (CN), inventor; Sichuan Aerospace Wuyuan Composite Co Ltd (CN), assignee – No. CN201510553702.7A; applied for on 02.09.2015; published on 05.11.2015. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
71. Pat. 20776895 CN, IPC A62C 8/06. Multi-Functional Basalt Fiber Fire Blanket / Xiang W. (CN), Maolin L. (CN), Xiaolong T. (CN), inventors; Sichuan Middle New Fiber Research Institute Co Ltd (CN), assignee – No. CN201820031596.5U; applied for on 09.01.2018; published on 28.08.2018. URL: <https://worldwide.espacenet.com>.
72. Frame B. J., Hansen J. G. R. Fire blocking blanket for protection of stored ammunition. Oak Ridge



- National Laboratory. Oak Ridge, Tennessee. August 6, 2004. 23 p. URL: <https://www.researchgate.net/publication/237376347>.
73. 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, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066, September 2000). 71 p.
74. Lern, K. W., Kwon Y. D., Chin, H. B., Li, H. L., Prevorsek, D. C. (1993). Spectra composite that withstands torch flame test. *J. Fire Sciences*, 1, 147–151.
75. Saad, M. A., Airman, R. L. (1988). Thermal Protection Studies of Plastic Films and Fibrous Materials. *J. Fire Sciences*, 6, 250–259.
76. Kourtides, D. A., Pitts, W. C., Araujo, M., Zimmerman, R. S. (1988). High Temperature properties of ceramic fibers and insulations for thermal protection of atmospheric entry and hypersonic cruise vehicles. *J. Fire Sciences*, 6, 313–321.
77. Damant, G. H. (1996). Use of barriers and fire blocking layers to comply with full scale fire tests for furnishings. *J. Fire Sciences*, 14, 3–7.
78. Takahashi, F. (2021). Fire blanket and intumescent coating materials for failure resistance. *MRS Bulletin*, 46, 429–434.
79. Takahashi, F. (2019). Whole-house fire blanket protection from wildland-urban interface fires. *Front. Mech. Eng.*, 5, 60.
- Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, Tennessee, 2004. 23 p. URL: <https://www.researchgate.net/publication/237376347>.
73. Chin W. K., Mulkern T. J., Tewarson A. Fire-Resistant and Fragment Penetration-Resistant Blankets for the Protection of Stored Ammunition (ARL-TR-2285, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5066, September 2000). 2000. 71 p.
74. Lern K. W., Kwon Y. D., Chin H. B., Li H. L., Prevorsek D. C. Spectra composite that withstands torch flame test. *J. Fire Sciences*. 1993. № 1. P. 147–151.
75. Saad M. A., Airman R. L. Thermal Protection Studies of Plastic Films and Fibrous Materials. *J. Fire Science*. 1988. Vol. 6. P. 250–259.
76. Kourtides D. A., Pitts W. C., Araujo M., Zimmerman R. S. High Temperature properties of ceramic fibers and insulations for thermal protection of atmospheric entry and hypersonic cruise vehicles. *J. Fire Sciences*. 1988. № 6. P. 313–321.
77. Damant G. H. Use of barriers and fire blocking layers to comply with full scale fire tests for furnishings. *J. Fire Science*. 1996. Vol. 14. P. 3–7.
78. Takahashi F. Fire blanket and intumescent coating materials for failure resistance. *MRS Bulletin*. 2021. Vol. 46. P. 429–434.
79. Takahashi F. Whole-house fire blanket protection from wildland-urban interface fires. *Front. Mech. Eng*. 2019. № 5. Art. 60.

**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  
<https://orcid.org/0000-0003-1043-5596>  
Scopus Author ID: 15119449100  
E-mail: [nadegda5.09.2017@gmail.com](mailto:nadegda5.09.2017@gmail.com)

**VAKHITOV RAMIL**

Postgraduate, Department of Chemical  
Technology and Resource Conservation,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-9657-5743>  
Researcher ID: rid30607  
E-mail: [vahitov89@gmail.com](mailto:vahitov89@gmail.com)

**SHOLOGON VIKTOR**

Candidate of Chemical Sciences,  
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/0000-0002-6249-5390>  
Scopus Author ID: 6507045182  
E-mail: [Shologon@nas.gov.ua](mailto:Shologon@nas.gov.ua)

**RAYENKO GENNADIY**

Candidate of Chemical Sciences, Senior researcher,  
Deputy Director for Scientific Work,  
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic  
and Coal Chemistry of the National Academy  
of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3694-536X>  
Scopus Author ID: 7801436067  
E-mail: [rayenko@nas.gov.ua](mailto:rayenko@nas.gov.ua)

**KALAFAT KOSTIANTIN**

Candidate of Technical Sciences, Researcher  
Department of Nucleophilic Reactions Research  
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal  
Chemistry of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-6165-0005>  
Scopus Author ID: 5719302971  
E-mail: [kalafat@nas.gov.ua](mailto:kalafat@nas.gov.ua)

**BESSARABOV VOLODYMYR**

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

**<sup>1</sup>TARAN N. A., <sup>1</sup>SHOLOHON V. I., <sup>2</sup>VAKHITOV R. A.,**

**<sup>1</sup>RAYENKO G. F., <sup>1</sup>KALAFAT K. V., <sup>1,2</sup>BESSARABOV V. I.**

<sup>1</sup> L.M. Lytvynenko Institute of Physical and Organic Chemistry and Coal Chemistry  
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

**DEVELOPMENT OF MOBILE FIRE PROTECTION MEANS –  
ROLL FIRE PROTECTION MATERIALS. LITERATURE REVIEW**

**Purpose.** Determination of modern trends in the improvement of fire protection roll materials aimed at increasing their fire resistance, mechanical strength and environmental safety, to find innovative technical solutions for the development of mobile fire protection equipment.

**Methodology.** The methods of literature-system and critical analysis, the method of summarising the results from different sources to create a holistic picture of the state of the scientific problem, the method of comparative analysis of different approaches used in research on the topic of the review were used.

**Findings.** It is shown that one of the current trends in the development of the fire protection industry is the creation and organisation of mobile fire protection, which can be used for fire protection of ammunition storage sites in the field. The scientific papers and practical implementations of various types of fire protection roll materials - fire protection blankets, flexible products with intumescent coating or heat-resistant filling, etc. are considered. It is substantiated that reinforcement of fire retardant blankets is an important process that contributes to the improvement of mechanical properties and efficiency of the fire protection means. The existing methods of obtaining fibres and textile materials with reduced flammability used in the manufacture of fire protection roll materials are analysed. It is shown that an effective means that combines the best qualities of constructive and intumescent fire protection is the use of flexible swellable fire protection materials. The patent information, formulations and manufacturing technologies for mobile intumescent fire protection means are analysed.

**Originality.** For the first time, on the basis of an array of literature data and patent search, the analysis and generalisation of literature data on the composition, technological aspects of manufacturing, characteristics of fire protection efficiency of flexible fire protection products as a component of mobile fire protection in the field to ensure long-term operation without loss of protective properties was carried out.

**Practical value.** Practical recommendations on the composition, effect of innovative fire retardant additives and nanomaterials, and manufacturing technology of fire retardant roll materials that can be used for fire protection of defence, construction and industrial facilities have been provided.

**Keywords:** structural fire protection; roll fire protection materials; fire protection blankets; intumescent materials.