



*В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Р. Б. Веселівський,  
Вол. В. Ковалишин, Р. Я. Лозинський*

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5463-0230> – В. В. Ковалишин

<http://orcid.org/0000-0001-7051-4494> – В. М. Марич

<https://orcid.org/0000-0003-3266-578X> – Р. Б. Веселівський

<https://orcid.org/0000-0003-3739-8668> – Вол. В. Ковалишин

<https://orcid.org/0009-0004-7292-711X> – Р. Я. Лозинський



[kovalyshyn.v@gmail.com](mailto:kovalyshyn.v@gmail.com)

## ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГАСІННЯ КОМБІНОВАНИХ ПОЖЕЖ ЗА НАЯВНОСТІ ЛЕГКИХ МЕТАЛІВ ЧИ ФОСФОРНИХ СПОЛУК

**Постановка проблеми.** Під час збройної агресії росії на території України неодноразово були зафіксовані випадки виникнення комбінованих пожеж за наявності легких металів чи фосфорних сполук, котрі супроводжуються високою температурою горіння та виділенням токсичних продуктів горіння. Враховуючи небезпеку цих пожеж, важливим є їх швидка локалізація та ліквідація. Проаналізувавши наукові праці щодо ефективних вогнегасних засобів та способів їх подавання, ми дійшли висновку, що відсутній єдиний підхід та алгоритм гасіння зазначених пожеж. Отже, обґрунтування технології гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи сполук фосфору та дослідження впливу товщини шару вогнегасного порошку на температуру горіння та охолодження магнію є актуальним науково-технічним завданням.

**Мета роботи** – вдосконалення технології гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи сполук фосфору та дослідження впливу товщини шару вогнегасного порошку на температуру горіння та охолодження магнію.

**Методи дослідження.** Для проведення дослідження використано комплексний метод, який включає в себе: аналіз та застосування статистичних методів обробки даних та комплексний метод дослідження пожеж. Для дослідження ефективності охолодження під час процесу гасіння ошурок сплаву магнію використано методику визначення необхідної кількості вогнегасного порошку для досягнення ізолювального ефекту.

**Основні результати дослідження.** Для ефективного гасіння пожеж класу D необхідно вивчити теплофізичні характеристики вогнегасних порошків в умовах гасіння ними пожеж магнієвих сплавів. Експериментально досліджено здатність до теплової ізоляції вогнегасного порошку на основі хлориду натрію, меленого шлаку, амофосу, аеросилу та стеарату цинку. Встановлено, що товщина шару вогнегасного порошку впливає на температуру горіння та охолодження магнію. Визначено залежність температури на межі метал/порошок та температури на межі повітря/порошок від товщини шару нанесеного вогнегасного порошку. На основі отриманих експериментальних значень температур, визначено коефіцієнт теплопровідності та теплоємності вогнегасного порошку та розраховано необхідну товщину шару порошку для забезпечення теплової ізоляції осередку горіння ошурок сплаву магнію. Необхідна товщина шару вогнегасного порошку, яка забезпечить безпечну для людини температуру на границі з повітрям 80 °C, становить 24 мм.

Для ефективного гасіння комбінованих пожеж на початковій стадії розвитку необхідно використовувати установку порошково-пінного гасіння з насадкою-заспокоювачем.

**Висновки.** Експериментально досліджено вплив товщини шару вогнегасного порошку на температуру горіння та охолодження магнію. Визначено необхідну товщину шару вогнегасного порошку на основі хлориду натрію, меленого шлаку, амофосу, аеросилу та стеарату цинку ( $\delta = 24$ ) мм для досягнення безпечної для людини температури на границі з повітрям (80 °C).

Розроблено рекомендації з гасіння легких металів чи фосфорних сполук та сформульовано основні вимоги безпеки праці під час роботи з вогнегасними порошками та пінами/піною підвищеної стійкості.

**Ключові слова:** легкі метали, фосфорні сполуки, сплав магнію, технологія гасіння, ефективність гасіння, безпека праці, вогнегасні речовини.

## **SUBSTANTIATION OF TECHNOLOGY FOR EXTINGUISHING COMBINED FIRES IN THE PRESENCE OF LIGHT METALS OR PHOSPHORUS COMPOUNDS**

**Formulation of the problem.** During Russia's armed aggression on the territory of Ukraine, cases of combined fires in the presence of light metals or phosphorus compounds, accompanied by high combustion temperatures and the release of toxic combustion products, have been repeatedly recorded. Given the danger of these fires, it is important to quickly localise and eliminate them. The analysis of scientific papers on effective extinguishing agents and methods of their supply has revealed the absence of a single approach and algorithm for extinguishing these fires. Accordingly, the substantiation of the technology for extinguishing combined fires in the presence of light metals or phosphorus compounds and the study of the effect of the thickness of the extinguishing powder layer on the combustion and cooling temperature of magnesium is an urgent scientific and technical task.

**The aim of the work** is to improve the technology for extinguishing combined fires in the presence of light metals or phosphorus compounds and to study the effect of the thickness of the extinguishing powder layer on the combustion and cooling temperature of magnesium.

**Research methods.** A comprehensive method was used to conduct the study, which includes: the analysis and application of statistical data processing methods and a comprehensive method of fire research. To study the effectiveness of cooling during the process of extinguishing magnesium alloy cinders, a methodology was used to determine the required amount of fire extinguishing powder to achieve an insulating effect.

**The main results of the study.** For effective extinguishing of class D fires, it is necessary to study the thermal characteristics of fire extinguishing powders in the conditions of extinguishing magnesium alloy fires. The thermal insulation ability of fire extinguishing powders based on sodium chloride, ground slag, ammophos, aerosil, and zinc stearate was experimentally investigated. The effect of the thickness of the fire extinguishing powder layer on the combustion and cooling temperature of magnesium was determined. The dependence of the temperature at the metal/powder interface and the temperature at the air/powder interface on the thickness of the layer applied by the fire extinguishing powder was determined. Based on the experimental temperature values obtained, the coefficient of thermal conductivity and heat capacity of the fire extinguishing powder was determined and the required thickness of the powder layer was calculated to ensure thermal insulation of the burning centre of magnesium alloy shavings. The required thickness of the fire extinguishing powder layer, which will ensure a safe temperature for humans at the border with an air of 80 °C, is 24 mm.

For effective extinguishing of combined fires at the initial stage of development, it is necessary to use a powder-foam extinguishing unit with a nozzle-soothing agent.

**Conclusions.** The influence of the thickness of the extinguishing powder layer on the temperature of magnesium combustion and cooling was experimentally investigated. The required thickness of the layer of extinguishing powder based on sodium chloride, ground slag, ammophos, aerosil, and zinc stearate ( $\delta = 24$  mm) to achieve a safe temperature for humans at the border with an air of (80 °C) was determined.

Recommendations for extinguishing light metals or phosphorus compounds have been developed and the basic requirements for occupational safety when working with extinguishing powders and foams/extended life foams have been formulated.

**Keywords:** light metals, phosphorus compounds, magnesium alloy, extinguishing efficiency, occupational safety, fire extinguishing agents.

**Постановка проблеми.** Гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи фосфорних сполук є проблемою та викликом для рятувальників. Ця проблема зросла під час збройної агресії росії на території України. Використання запалювальної зброї, обмежено. Протокол III-ї Конвенції про конкретні види звичайної зброї забороняє використання будь-яких запалювальних пристроїв проти цивільного населення або майна. Заборонено застосування зброї в районах, де відбувається концентрація цивільного населення, або де немає чіткого поділу між військовими і цивільними цілями. Необхідно передбачати заходи щодо обмеження негативно дії запалювальної зброї та зведення до мінімуму випадкових жертв та травм

серед цивільного населення, передбачати заходи щодо збереження майна.

Також жовтий фосфор широко застосовується у виробництві боєприпасів для військових цілей. Дуже часто під час війни ворог використовує фосфорні запалювальні боєприпаси. Тому виникає необхідність у застосуванні ефективних рекомендацій з гасіння таких пожеж.

Для розуміння небезпеки проаналізуємо основні властивості фосфору та магнію [1]. Фосфор – це легкозаймиста воскоподібна речовина від безбарвного до жовтуватого кольору. Він прозорий і має різкий запах, що нагадує запах часнику. Можливе спалахування від контакту з киснем. Фосфор є самозапальним матеріалом, тому

його зберігають під водою, у герметичних контейнерах і при мінімальному освітленні. Потрапляючи на шкіру людини фосфор викликає опіки, а потрапляючи в середину організму, він спричиняє важке отруєння і смерть. Смертельна доза становить 0,05-0,15 г. Фосфор використовується при виробництві мінеральних добрив і в так званих фосфорних бомбах. Характеризується здатністю прилипати навіть до вертикальних поверхонь і обпалювати їх.

Магній – це сріблясто-білий, блискучий метал, відносно м'який і пластичний, добре проводить тепло та електрику. Він майже в п'ять разів легший за мідь, у 4,5 раза – за чорний метал, і навіть від алюмінію в 1,5 раза легший. Магній плавиться при 651°C, але за звичайних умов його важко розплавити, він запалюється при 550°C і миттєво згорає з виділенням великої кількості тепла і світла. Гасіння палаючого магнію водою неприпустиме: може утворитися гримуча суміш водню з киснем, яка вибухає. Вуглекислий газ також не здатний загасити палаючий магній, тому, що магній відновлює його.

Проведемо аналіз пожеж, спричинених магнієвими і фосфорними сполуками, в Україні та світі.

Пожежа з горінням магнію в м. Зонненберзі, Німеччина, у 2010 році завдала збитків на мільйони євро. Вогонь охопив 30 тонн магнію. Гасіння пожежі було повільним через відсутність ефективних первинних засобів пожежогасіння [2].

2 жовтня 2015 року понад 20 пожежників гасили 47 тонн магнію, що горіли на заводі PolMag у Польщі. Початкові спроби загасити розплавлений магній були неефективними. Були використані порошкові вогнегасники, але вогонь був занадто сильним, щоб його загасити, при цьому вогнегасних речовин було недостатньо [3].

30 березня 1988 року в м. Чикаго вибухнув трейлер з магнієм і 200 людей довелося евакуювати з прилеглих територій. Трейлер був на 91% заповнений чистим магнієм. Температура горіння досягла 2030 °C, повністю розплавивши трейлер з алюмінію і сталі. Пожежники, які прибули на місце події, не змогли загасити вогонь, оскільки не мали спеціальних вогнегасних порошоків, і чекали, поки згорить весь магній. Щоб запобігти поширенню вогню на будівлі та споруди, розташовані навколо місця пожежі, рятувальники охолоджували їх [4].

10 червня 2018 року виникла пожежа на автомобільному заводі Корпорації BMW. За повідомленнями, горіли вироби, що містять магній. Дим був настільки сильним, що мешканцям рекомендували зачинити вікна та двері. Пожежа також вплинула на залізничний рух [5].

2 вересня 2017 року десятки тисяч людей, що мешкають в автономному співтоваристві Мадрид, Іспанія, були попереджені про необхідність залишатися в приміщенні через токсичний дим. Причиною пожежі стало загоряння 40 тонн магнію та алюмінію на виробничому складі муніципалітету Фуенлабрада [6].

У квітні 2010 року на ВО "Київприлад" па вулиці Гарматній, 2 у Солом'янському районі Києва стався потужний вибух магнію. Вибух стався, коли іскри від газозварювального апарата потрапили на контейнер з магнієм, в результаті чого двоє людей загинули на місці. Висока температура розплавилася металеву конструкцію ліфта, а ударна хвиля вибила вікна магазинів з першого по четвертий поверх [7].

16 липня 2007 року близько 17 години селі Ожидів, Буського району Львівської області на залізничному перегоні Красне-Ожидів зійшов з рейок та перекинувся потяг з 15 цистернами (рис. 1), у яких перевозили жовтий фосфор із Казахстану до Польщі.



**Рисунок 1** – Гасіння жовтого фосфору на залізничній станції Ожидів Львівської області (2007 рік)

Через витік фосфору з однієї цистерни відбулося самозаймання шести сусідніх. Пожежу загасили, але утворилася хмара продуктів згоряння (зона ураження: близько 90 км). Зоною ураження охоплено 14 населених пунктів у Буському районі та окремих територіях Радехівського та Бродівського районів. Внаслідок пожежі отруїлося 16 осіб [8].

Масштабні пожежі, що супроводжувалися вибухами на складах боєприпасів, які містять магнієві сплави, підтверджують актуальність проблеми: Артемівськ, Донецька область (2003); Новоіванівка, Запорізька область (2004, 2005, 2006, 2007); Лозова, Харківська область (2008); Сватове, Луганська область (2015); вибухи на території складів у Запорізькій області (2016); Балаклія Харківська область та Калинівка Вінницька область (2017) [9].

З початку повномасштабної війни в Україні, росія активно використовує фосфорні бомби. Таке застосування зафіксовано в Рубіжному (Луганської області), Маріуполі, Мар'їнці, Авдіївці Сєвєродонецьку, Краматорську і Попасній (Донецької області) [10].

Актуальність досліджень гасіння комбінованих пожеж за наявності сплавів магнію та фосфорних сполук підтверджується кількістю пожеж в Україні та світі.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Станом на сьогоднішній час в Україні немає розроблених рекомендацій для гасіння легких металів чи фосфорних сполук, а тільки вогнегасні речовини та засоби їх подачі для гасіння пожеж класу D, A, B. Такими проблемними питаннями займалися А. Антонов, В. Ковалишин, М. Вайсман, О. Демиденко, М. Білошицький, R. Nelson, Kang et al H., C. Wilson, R. Tapscott, D. Zallen, B. Марич [1].

У статті [11] проаналізовано сучасний стан проблем розробки та застосування порошків для гасіння пожеж класу D та сполук фосфору і запропоновано створення нових рецептур таких порошків з використанням вітчизняної сировини та удосконалення технічних засобів їх подачі як шлях до підвищення ефективності порошкового пожежогасіння в Україні.

У статті [12] на основі аналізу публікацій та літературних джерел показано, що наразі відсутні вогнегасні речовини, спрямовані на покращення гасіння комбінованих пожеж класів A, B і D. На основі експериментальних досліджень окремих компонентів порошкових вогнегасних речовин для гасіння пожеж класу D також встановлено, що оптимальним співвідношенням складу порошкових вогнегасних речовин, що забезпечує оптимальні значення інтенсивності, є: 17,5% амофосу, 60% NaCl, 20% меленого шлаку та 2,5% аеросилу/стеарату цинку.

У роботі [13] запропоновано рецептуру універсального порошку KM-2 для гасіння пожеж класу D, A, B, який складається з хлориду натрію, амофосу, шлаку, аеросилу, а також розроблена технологія комбінованого гасіння пожеж класу D і A.

Автори пропонують гасити комбіновані пожежі класів A, B, C та E з використанням аерозолів та газів-флегматизаторів [14]. Така вогнегасна речовина не є ефективною для гасіння комбінованих з класом D, що відображено в роботі.

У роботі [15] проведено аналіз українських та міжнародних нормативних документів, які регламентують методи випробувань з визначення вогнегасної здатності вогнегасних порошків, призначених для гасіння пожеж за класом D. Встановлено, що необхідно розробити відповідний національний стандарт для випробування вогнегасних порошків спеціального призначення.

Звичайні протипожежні засоби, такі як вода та водні розчини, не можна використовувати для гасіння сполук фосфору, оскільки вони малоефективні. Фосфор має тенденцію до швидкого повторного спалахування кожного разу, коли він отримує доступ до повітря, наприклад, після випаровування чи стікання води, яка була використана для гасіння. Також вода буде підсилювати горіння магнію та його сплавів. Досвід гасіння жовтого фосфору в Ожидові показав, що фосфор найкраще гасити піною низької та середньої кратності та використовувати стволи СВП та ГПС. Шар піни наносять до досягнення надійного захисту фосфору від самозагорання. Ще краще було б подати компресійну піну, піну підвищеної стійкості. Можна використати при невеликих площах горіння фосфору пінні пересувні, стаціонарні установки пожежогасіння.

За відсутності вогнегасної піни потрібно ізолювати фосфор від повітря порошками та піскосумішами до прибуття пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС.

Для гасіння легких металів слід використовувати відповідні вогнегасні речовини та засоби їх подачі. При гасінні легких металів порошок слід наносити на горючу поверхню з такою інтенсивністю, щоб покрити поверхню і запобігти поширенню вогню. Багато вчених вивчали вогнегасні речовини для гасіння пожеж класу D. У всіх випадках дослідники дійшли висновку, що спеціальні порошки повинні містити NaCl і KCl. Наповнювачами можуть бути: пісок, шлак, зола, мелаїнові сполуки, графіт і каолінова глина.

Для гасіння магнію та його сполук використовується вогнегасний порошок спеціального призначення для гасіння пожеж класу D. Вогнегасні порошки цього типу виготовляють на

основі NaCl або KCl. В Україні розроблені порошки КМ-1, КМ-2, КМ-3. Цими порошками можуть споряджатися посудини від 10 до 250 кг, які використовуються для порошкових вогнегасників, цистерни порошкових автомобілів. Розроблений вогнегасний порошок КМ-3 призначений для гасіння комбінованих пожеж за наявності сполук фосфору, пожеж класу D (магнію та його сплавів) та легкозаймистих рідин.

Вогнегасний порошок придатний до використання у вогнегасниках, установках пожежогасіння і пожежних автомобілях порошкового та комбінованого пожежогасіння в усіх кліматичних зонах при температурі від мінус 50 °С до 50 °С.

За результатами аналізу вогнегасних речовин та засобів їх подачі для гасіння пожеж класу А, В, D та фосфорних сполук встановлено необхідність розроблення технології гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи сполук фосфору.

**Мета** – вдосконалення технології гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи сполук фосфору та дослідження впливу товщини шару вогнегасного порошку на температуру горіння та охолодження магнію.

**Методи досліджень.** Для проведення дослідження використано комплексний метод, який

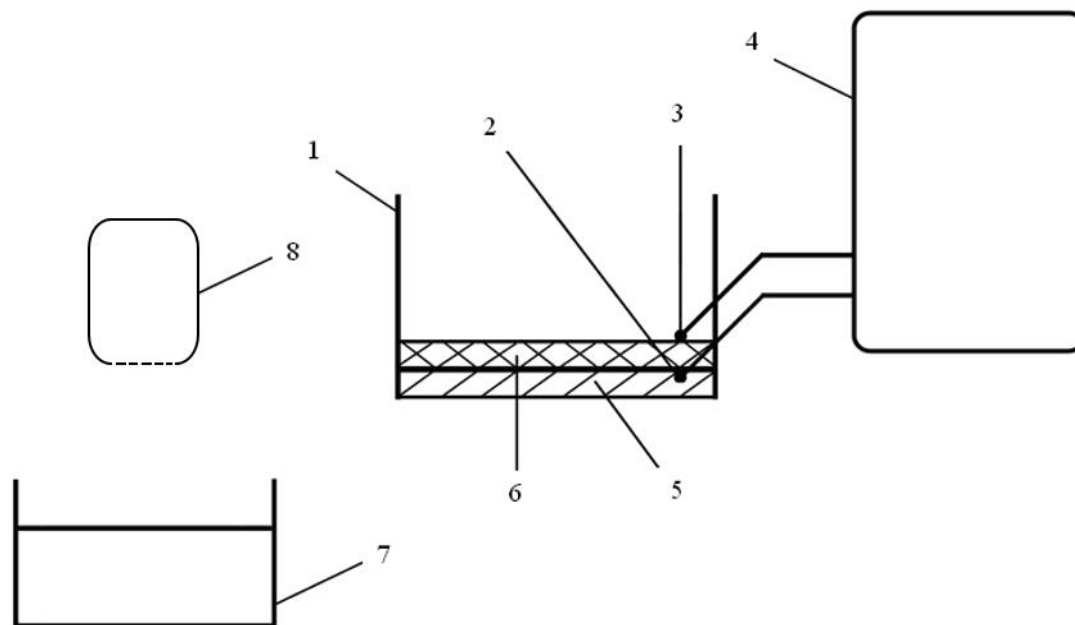
включає в себе: аналіз та застосування статистичних методів обробки даних та комплексний метод дослідження пожеж. Для дослідження ефективності охолодження під час процесу гасіння ошурок сплаву магнію використано методику визначення необхідної кількості вогнегасного порошку для досягнення ізолювального ефекту.

**Основний матеріал.** Існуючі вогнегасні речовини та способи їх подачі потребують чіткого алгоритму застосування для ефективного гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів ч и сполук фосфору. Це зумовлено небезпекою горіння легких металів та фосфорних сполук, що супроводжується високою температурою горіння та виділенням токсичних продуктів горіння.

Для ефективного гасіння пожеж класу D необхідно вивчити теплофізичні характеристики вогнегасних порошоків в умовах гасіння ними пожеж магнієвих сплавів. Для цього використовуємо методику, яка представлена у роботі [1].

При прогнозуванні теплової ізоляції осередку горіння ошурок сплавів магнію проведено експериментальні дослідження з вогнегасним порошком [12].

Дослідження здатності до теплової ізоляції розробленого складу вогнегасного порошку проведено з використанням лабораторної установки, схема якої представлена на рисунку 2.



**Рисунок 2** – Схема лабораторної установки для визначення ефективності гасіння легких металів:

- 1 – деко термостійке розміром 15x19 см; 2 – термопара для визначення температури на поверхні металу, що горить; 3 – термопара на поверхні порошку на межі з повітрям; 4 – комп'ютер; 5 – ошурки сплаву магнію та алюмінію; 6 – вогнегасний порошок; 7 – посудина з вогнегасним порошком; 8 – посудина для нанесення порошку на горючу поверхню

При проведенні експериментальних досліджень визначимо вплив товщини шару вогнегасного порошку на температуру горіння та охолодження

магнію. Для досліджень використаємо склад порошку на основі хлориду натрію, меленого шлаку, амофосу, аеросилу та стеарату цинку[12].

Інтенсивність подавання порошку за якої температура  $T_z$  на межі повітря-порошок, буде меншою за  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , становить від  $0,372$  до  $0,93\text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$ .

На рисунку 3 показано процес насипання порошку для гасіння сплаву магнію.



а)



б)

**Рисунок 3** – Насипання порошку для гасіння сплаву магнію в лабораторних умовах

На рисунку 4 показано процес і вимірювання температури на поверхні під час гасіння сплаву

магнію. рис. 3.



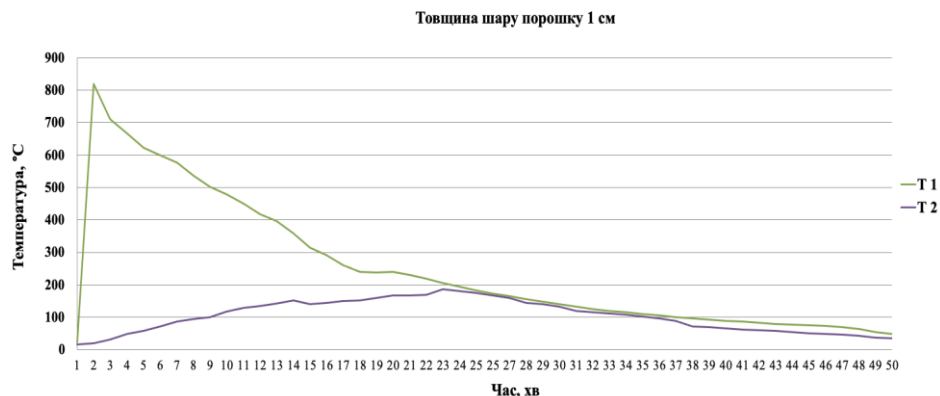
а)



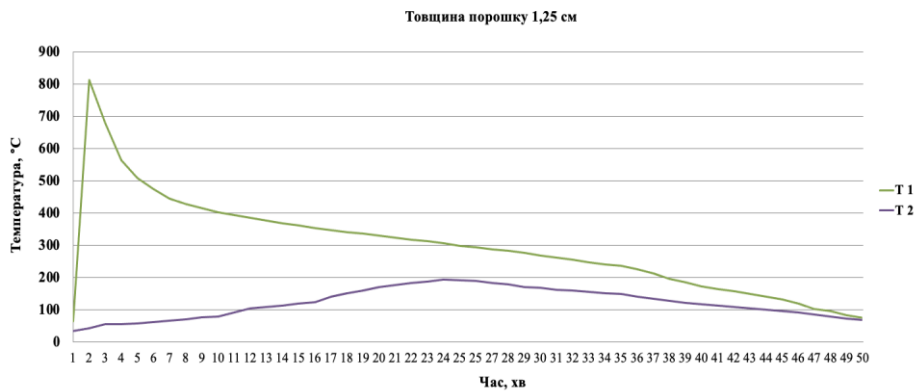
б)

**Рисунок 4** – Процес гасіння сплаву магнію і вимірювання температури на поверхні шару вогнегасного порошку та на межі шару вогнегасного порошку та сплаву магнію

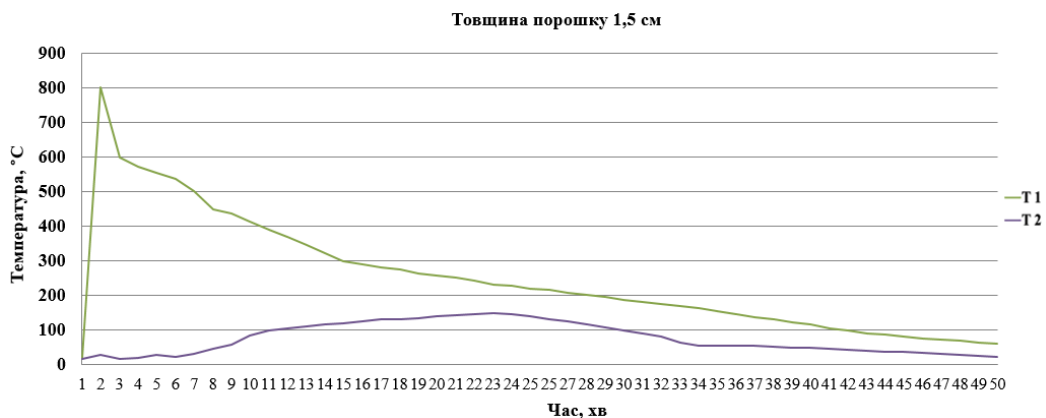
Результати експериментальних досліджень температури горіння та охолодження магнію впливу товщини шару вогнегасного порошку на представлено на рисунках 5 – 7.



**Рисунок 5** – Температурні показники на поверхні шару (1 см) вогнегасного порошку та на стику шару вогнегасного порошку та сплаву магнію під час процесу гасіння ошукрок сплаву магнію в лабораторних умовах: T 1 – термопара на поверхні металу, що горить; T 2 – термопара на поверхні порошку на межі з повітрям



**Рисунок 6** – Температурні показники на поверхні шару (1,25 см) вогнегасного порошку та на стику шару вогнегасного порошку та сплаву магнію під час процесу гасіння ошукрок сплаву магнію в лабораторних умовах: Т 1 – термопара на поверхні металу, що горить; Т 2 – термопара на поверхні порошку на межі з повітрям



**Рисунок 7** – Температурні показники на поверхні шару (1,5 см) вогнегасного порошку та на стику шару вогнегасного порошку та сплаву магнію під час процесу гасіння ошукрок сплаву магнію в лабораторних умовах: Т 1 – термопара на поверхні металу, що горить; Т 2 – термопара на поверхні порошку на межі з повітрям

У таблиці 1 наведено температурні показники з магнієвих сплавів шару вогнегасного порошку під час гасіння стружки

**Таблиця 1**

Температурні показники шару вогнегасного порошку під час гасіння ошукрок з магнієвих сплавів

№ з/п	Товщина шару нанесеного вогнегасним порошком, мм	Температура на межі метал / порошок, °C	Температура (Тз) на межі повітря / порошок, °C	Час гасіння, с	Розмір дека, мм	Маса витраченого порошку, г
1	10	820	187	24	150×190	256
2	12,5	812	193	21		320
3	15	803	150	20		384

Для розробки математичної моделі цього теплового процесу було враховано такі положення:

1. Теплові процеси в шарі вогнегасного порошку при гасінні магнію є нестационарними, за винятком першого експериментального процесу, і це припущення може бути виконане, якщо створити відповідні експериментальні умови.

2. Умови теплопередачі на межі між вогнегасним порошком і повітрям однакові у всіх експериментах і не змінюються.

3. Температура шару порошку на межі з горючим середовищем постійна і не змінюється протягом часу гасіння.

4. Шар вогнегасного порошку є однорідним, ізотропним і безпустотним;

5. При визначенні ефективного коефіцієнта теплопровідності враховують супутні теплові процеси в шарі вогнезахисного порошку.

6. Коефіцієнт ефективної теплопровідності  $\lambda(\delta)$  не залежить від температури. Його значення може залежати від товщини шару вогнегасної речовини ( $\delta$ ).

7. Питома теплоємність  $C_p$  і густина  $\rho$  порошку є постійними величинами і не залежать від температури або товщини шару [16,17].

Використовуючи методику, викладену в [18], проведемо розрахунок необхідної товщини шару вогнегасного порошку для забезпечення теплової ізоляції осередку горіння ошурок сплаву магнію.

Для визначення температури на границі між шаром вогнегасного порошку та повітрям, з якої надалі визначаємо коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт тепловіддачі та їх залежностей від товщини шару порошку, використовуємо рівняння:

$$\theta_{1,k} = \frac{2\lambda(\delta)\theta_{m,k} + a_1\delta\lambda(\delta)\theta_a}{2\lambda(\delta) + a_1\delta\lambda(\delta)} \quad (1)$$

де:  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $\delta$  – товщина порошку;  $a_1$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $\theta_a$  – температура горючого середовища.

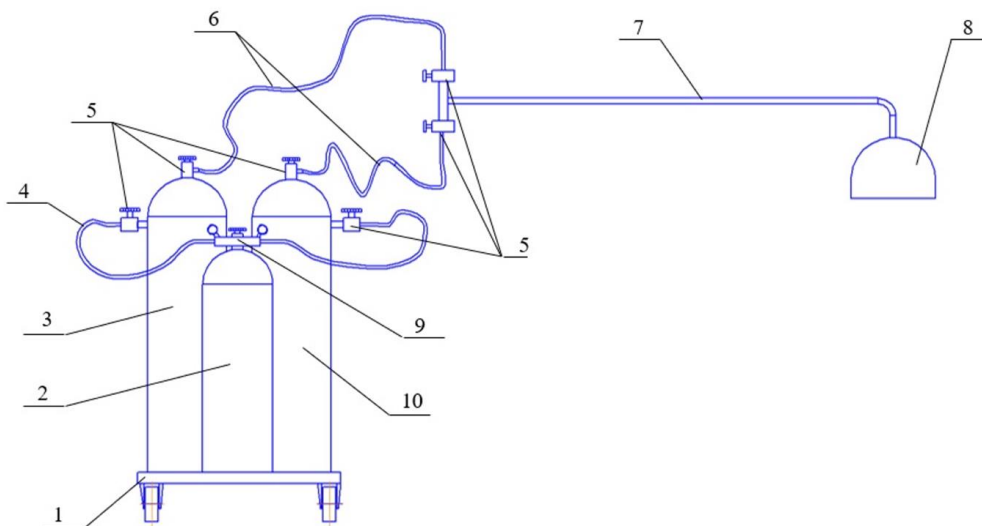
З огляду на роботи [16,17] значення питомої теплоємності ( $C_p$ ) та густини порошку ( $\rho$ ) приймаємо 1000 Дж/(кг·°C) та 950 кг/м<sup>3</sup> відповідно.

З міркувань безпеки для людини приймаємо необхідну температуру на границі з повітрям 80 °C. Час гасіння ошурок сплаву магнію в лабораторних умовах згідно з методикою становить 30 с, або до припинення горіння, при цьому температура на межі поверхні металу, що горить, та вогнегасним порошком становить 900 °C.

Провівши відповідні розрахунки, визначено, що необхідна товщина шару вогнегасного порошку, яка забезпечить температуру на границі з повітрям 80 °C, становить 24 мм.

Технологія гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи сполук фосфору. Для ефективного застосування існуючих вогнегасних речовин та способів їх подачі пропонується такий порядок гасіння. До об'єкта, де сталася пожежа, слід прибувати тільки з навітряної сторони по визначених під'їздах. Якщо доступ до об'єкта з навітряного боку неможливий, рятувальники, які прибувають на місце події, повинні використовувати ізолюючий захисний одяг та засоби захисту органів дихання.

Для ефективного гасіння комбінованих пожеж на початковій стадії розвитку пропонуємо використовувати установку порошково-пінного гасіння (УППГ). Принципова схема цієї установки з насадкою-заспокоювачем представлена на рисунку 8.



**Рисунок 8** – Установка порошково-пінного гасіння (УППГ): 1 – шасі установки; 2 – балон зі стиснутим повітрям; 3 – посудина (12 л) з вогнегасним порошком КМ-3; 4 – шланг високого тиску для подачі стиснутого повітря; 5 – запірні шарові крани; 6 – шланги подачі вогнегасних речовин; 7 – штанга із заспокоювачем для транспортування вогнегасних речовин в осередок горіння; 8 – заспокоювач; 9 – редуктор для регулювання тиску повітря; 10 – посудина (12 л) з розчином піноутворювача

Установка складається із двох посудин та балона, заповненого стиснутим повітрям, які

встановлено на пересувному шасі. Посудина 1 – об'єм 12л, заповнена вогнегасним порошком



спеціального призначення (ВПСП) КМ-3. Посудина 2 – об'єм 12 л, (заповнена 6 % розчином піноутворювача спеціального призначення). Ця установка дає змогу швидко переходити від порошкового до пінного гасіння.

З установкою працюють дві людини. Гасіння пожеж із використанням установки УППГ проводиться таким чином. Розташовують установку на відстані 4-5 м від палаючого вогнища. Після чого один з операторів контролює процес подачі вогнегасних речовин з посудини установки, а другий через насадку-заспокоювач подає вогнегасні речовини. З метою досягнення повного гасіння, а також продувки системи, вогнегасні речовини слід подавати до повного вивільнення вогнегасних балонів установки комбінованого гасіння. На вогнище, де горить магній або його сплави, або будь які легкі метали, спочатку подають ВПСП до повного гасіння, за наявності залишків порошку накривають легкозаймисті та горючі речовини (ЛЗР та ГР) або дерев'яні вироби. Гасіння пожеж класу В, А далі проводять піною. Оператор переключає заспокоювач на балон з пінним розчином та подає піну. Піну подають на всю поверхню конструкцій навколо магнію. Піна поганої якості (з великим вмістом води) подається на дерев'яні конструкції або зливається набік. Для запобігання потраплянню води на ошурки магнію струмись «мокрої піни» категорично заборонено подавати на поверхню порошку. Це може підсилити горіння.

При гасінні осередку пожежі із застосуванням насадок-заспокоювачів відстань від нижньої поверхні насадки до вогню повинна бути 15-30 см, при цьому треба насадку переміщувати в горизонтальній площині з метою рівномірного покриття горючої поверхні порошком.

При гасіння пожеж фосфору та легких металів категорично заборонено використовувати в якості вогнегасних речовин воду. При гасінні пожеж класу А, В, D великої площі та значним фронтом горіння, рекомендовано застосовувати декілька установок УППГ.

Якщо є можливість накрити всю площу горіння (наприклад запалювальна граната), то корпусом заспокоювача накривають предмет гасіння, запобігаючи розбризкуванню горючих крапель.

При горінні ЛЗР у деках, доцільніше з установки комбінованого гасіння одразу подавати піну через насадку-заспокоювач. Якщо горіння ЛЗР відбувається на землі, то можна також використати вогнегасний порошок, що подається через насадку-заспокоювач.

Під час гасіння фосфору, шар піни необхідно наносити до досягнення надійного захисту фосфору від samozагорання, якщо можливо, то подати компресійну піну чи піну підвищеної

стійкості. При невеликих площах горіння фосфору використовувати пінні пересувні, стаціонарні установки пожежогасіння. За відсутності вогнегасної піни спробувати ізолювати фосфор від повітря порошками та піскосумішами до прибуття пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС.

Безпека праці. Ізолювати небезпечні зони радіусом не менше 100 м. Скорегувати цю відстань відповідно до результатів хімічної розвідки. Не допускати сторонніх осіб. У разі пожежі заходити в небезпечну зону в захисних засобах. Дотримуватись заходів пожежної безпеки. Усунути джерела вогню, іскор та забезпечити доступ до води. Надати першу медичну допомогу постраждалим. Евакуювати людей із сусідніх будівель, враховуючи напрямок руху токсичних продуктів горіння.

При гасінні пожеж легких металів заборонено використовувати воду. Гасити тільки порошковими сполуками при цьому їх подавання здійснювати через насадку-заспокоювач. При гасінні пожеж цього типу використовувати засоби індивідуального захисту органів дихання. Після покриття осередку горіння ВПСП, доцільно покрити всі горючі конструкції навколо шаром піни середньої кратності або компресійною піною. Необхідно покривати палаючий метал суцільним шаром порошку товщиною не менше 15 мм та з врахуванням шару горючих ошурок легкого металу, чим більший шар ошурок горючого металу, тим більший шар порошку, який може сягати 10 см і більше (приблизно на 25 мм шару ошурок 10 мм шару порошку).

Засоби для гасіння: ВПСП, сухий пісок, шлак, цемент, флюси, хлориди калію або натрію. Польовий шпат, карбонат натрію і бура, борна кислота та ґрунт підходять для гасіння невеликих загорянь.

Фосфор гасити піною або вогнегасним порошком. За наявності сполук фосфору в металевій посудині – заповнити її водою вище рівня фосфору.

Для утилізації розсипані ошурки сплавів легких металів зібрати без застосування вологи в суху металеву ємність; герметично закрити і відправити на переробку з дотриманням заходів безпеки.

З дотриманням заходів безпеки потрібно утилізувати матеріал. Зібрати стружку легких металів у суху та герметичну металеву ємність для переробки.

**Висновки.** Проведено аналіз вогнегасних речовин та засобів їх подачі для гасіння пожеж класу А, В, D та фосфорних сполук. Встановлено чинники, які негативно впливають на ефективність гасіння комбінованих пожеж.

Експериментально досліджено вплив товщини шару вогнегасного порошку на температуру горіння та охолодження магнію. Встановлено, що при товщині нанесеного шару порошку 10 мм та 12,5 мм, температура на межі метал/порошок становить 820 °С та, 812 °С відповідно. Ефективність охолодження під час процесу гасіння ошук сплаву магнію спостерігається при нанесенні шару 15 мм, де температура на межі метал/порошок дорівнює 150 °С, що на 40 °С нижча порівняно з товщинами 10 та 12,5 мм.

З використанням методики визначення необхідної кількості вогнегасного порошку та експериментальних даних для досягнення відповідного ізолювального ефекту визначено необхідну товщину шару вогнегасного порошку на основі хлориду натрію, меленого шлаку, амофосу, аеросилу та стеарату цинку ( $\delta = 24$  мм) для досягнення безпечної для людини температури на границі з повітрям 80 °С.

Розроблено рекомендації з гасіння легких металів чи фосфорних сполук та сформульовано основні вимоги безпеки праці під час роботи з вогнегасними порошками та пінами/піною підвищеної стійкості. Вдосконалено технологію гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи сполук фосфору.

#### Список літератури

1. Звіт по науково-дослідній роботі «Вдосконалення технології гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи фосфорних сполук», виконавці: В. В. Ковалишин, Р. Б. Веселівський, В. М. Марич, Вол. В. Ковалиши, В. Л. Петровський, П. В. Пастухов, Н. Р. Великий, номер державної реєстрації № 0122U200807. Львів : ЛДУБЖД, 2023. 107 с.

2. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.thueringer-allgemeine.de/web/zgt/leben/blaulicht/detail/-/specific/Magnesium-Brand-richtet-bei-Sonneberg-Millionenschaden-an1529078490>

3. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://nto.pl/poteczny-pozar-fabryki-polmag-w-olszowej-plonie-47-ton-magnezu/ar/8962865>

4. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.firehouse.com/operations-training/hoselineswaterappliances/article/11300616/ffirefighter-training-extinguishing-magnesium-fires>

5. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://nv.ua/ukr/world/countries/u-nimechchi-ni-horiv-bavarskij-zavodbmw-2475328.html>

6. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://comments.ua/ua/world/593821-.html>

7. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://p-p.com.ua/news/10544/>

8. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://zlochiv.net/12-rokiv-tomu-stalas-](https://zlochiv.net/12-rokiv-tomu-stalas-fosforna-avariia-pid-ozhydovom/)

[fosforna-avariia-pid-ozhydovom/](https://zlochiv.net/12-rokiv-tomu-stalas-fosforna-avariia-pid-ozhydovom/)

9. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://magnolia-tv.com/news/36294-masshtabni-pozhezhi-i-vibukhi-v-kaliniivci-i-balaklii-viyskovi-vse-znali-zazdalegid>

10. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.unian.ua/war/misiya-ekspertiv-obsye-pidtvverdila-vikoristannya-viyskami-rf-zaboronenoji-zbroji-novini-vtorgnennya-rosiji-v-ukrajinu-11903427.html>

11. Ковалишин В. В., Петровський В.Л., Веселівський Р. Б., Марич В. М. Ковалишин Вол. В., Великий Н.Р. Аналіз та проблеми гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи фосфорних сполук. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю (Львів, 1жовтень 2022р.). Львів: ЛДУБЖД, 2022. С. 303–305.

12. Ковалишин В. В., Марич В. М., Веселівський Р. Б., Ковалишин Вол. В., Чернецький В. В. Оптимізація рецептури вогнегасного порошку спеціального призначення для комбінованого гасіння пожеж класу А, В та D. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека, (2(16)), С. 123–134. [https://doi.org/10.33269/nvc.2023.2\(16\).123-134](https://doi.org/10.33269/nvc.2023.2(16).123-134)

13. Ковалишин В. В., Марич В. М., Лозинський Р. Я., Пастухов П. В., Гусар Б. М. Комбіноване гасіння пожеж класу D та А, В. Пожежна безпека: зб. наук. праць. Львів, 2019. №35. С. 30–34. doi: 10.32447/20786662.35.2019.05

14. Баланюк В. М., Козяр Н. М., Гарасим'юк О. І. Застосування газоаерозольно-порошкових вогнегасних сумішей для захисту від запалювальних сумішей. ScienceRise. 2016. Т. 5, № 2 (22). С. 10–14.

15. Антонов А. В., Стилик І. Г. Методи випробувань вогнегасних порошків з визначення їх вогнегасної здатності за класом пожежі D. Вісник УкрНДІПБ. 2013. № 2 (28). С. 242–248.

16. Kravets O.V., Mozgovoy D. K. Wavelet Transform in remote sensing data processing : Engineer of the 3rd Millennium : The VII I Students' Scientific Conference (May, 2009, Dniepropetrovsk) Dniepropetrovsk, 2009. P. 49–50.

17. Zhenmin S., Weidong S., Yuzhao W., Long G. Analysis of Optical Properties of Off-Axis Reflective Volume Holographic Grating. Optics and Photonics Journal. 2016. No 6. P. 136-144;

18. Gusar, B., Kovalyshyn, V., Pozdieiev, S., Zemlianskyi, O. Myhalenko, K. Thermotechnical properties of the fireextinguishing powder for extinguishing materials based on magnesium alloy chips. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies This link is disabled., 2020, 2(10-104), pp. 46–53.

## References

1. Report on the research work "Improving the technology of extinguishing combined fires in the presence of light metals or phosphorus compounds," performers: V.V. Kovalyshyn, R.B. Veselivskiy, V.M. Marych, Vol. V. Kovalyshyn, V. L. Petrovskiy, P. V. Pastukhov, N. R. Velykiy, state registration number No. 0122U200807. Lviv: LDUBZHD, 2023. 107 p.
2. [Electronic resource] - Mode of access to the resource: <https://www.thueringerallgemeine.de/web/zgt/leben/blaulicht/detail/-/specific/Magnesium-Brand-richttet-beiSonneberg-Millionenschaden-an1529078490>
3. [Electronic resource] - Resource access mode: <https://nto.pl/potezny-pozar-fabrykipolmag-w-olszo-wej-plonie-47-ton-magnezu/ar/8962865>
4. [Electronic resource] - Resource access mode: <https://www.firehouse.com/operationstraining/hoselin-eswaterappliances/article/11300616/firefighter-training-extinguishingmagnesium-fires>
5. [Electronic resource] - Mode of access to the resource: <https://nv.ua/ukr/world/countries/unimech-chini-horiv-bavarskij-zavodbmw-2475328.html> ;
6. [Electronic resource] - Mode of access to the resource: <https://comments.ua/ua/world/593821-.html>
7. [Electronic resource] - Resource access mode: <https://p-p.com.ua/news/10544/>
8. [Electronic resource] - Mode of access to the resource: <https://zlochiv.net/12-rokiv-tomustalas-fosforna-avariia-pid-ozhydovom/>
9. [Electronic resource] - Mode of access to the resource: <https://magnoliatv.com/news/36294-masshtabni-pozhezhi-i-vibukhi-v-kalinivci-i-balaklii-viyskovi-vse-znalizazdalegid>
10. [Electronic resource] - Mode of access to the resource: <https://www.unian.ua/war/misiyaekspertiv-obsye-pidtverdila-vikoristannya-viyskami-rf-zaboronenoji-zbroji-novinivtorgnennya-rsiji-v-ukrajinu-11903427.html>
11. Kovalyshyn V.V., Petrovskiy V.L., Veselivskiy R.B., Marych V.M. Kovalyshyn Vol. V., Velykiy N.R. (2019) Analysis and problems of extinguishing combined fires in the presence of light metals or phosphorus compounds. Aktualni problemy pozheznoi bezpeky ta zapobihannia nadzvychainym sytuatsiiam v umovakh sohodennia: materialy vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu [Actual problems of fire safety and prevention of emergencies in today's conditions: materials of the all-Ukrainian scientific and practical conference with international participation]. (pp. 303-305) Lviv, October 1, 2022. Lviv: LDUBZHD, Ukraine [in Ukrainian].
12. Kovalyshyn V.V., Marych V.M., Veselivskiy R.B., Kovalyshyn Vol. V., Chernetskiy V. V. (2023) Optimizatsiia retseptury vohnehasnogo poroshku spetsialnogo pryznachennia dlia kombinovanoho hasinnia pozhezh klasu A, B ta D [Optimization of the formulation of special-purpose fire-extinguishing powder for combined extinguishing of fires of class A, B and D ]Naukovi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezna bezpeka, Scientific Bullitin: Civil Protection and Fire Safety, (2 (16), 123-134. [https://doi.org/10.33269/nvc..2\(16\).123-134](https://doi.org/10.33269/nvc..2(16).123-134) [in Ukrainian].
13. Kovalyshyn V.V., Marych V.M., Lozynskiy R. Ya., Pastukhov P.V., Husar B.M.(2019) Kombinovane hasinnia pozhezh klasu D ta A, B [ Combined extinguishing of fires of class D and A, B.] Pozhezna bezpeka zb. nauk. prats Lviv,2019. №35. P. 30-34. doi:10.32447/20786662.35.2019.05 [in Ukrainian].
14. Balaniuk V.M., Koziar N.M., Harasymyuk O.I. (2016) Zastosuvannia hazoerozolno-poroshkovykh vohnehasnykh sumishei dlia zakhystu vid zapaliuvalnykh sumishei.[Application of gas-aerosol-powder fireextinguishing mixtures for protection against incendiary mixtures.] ScienceRise. 2016. T. 5, № 2 (22). 10-14 [in Ukrainian].
15. Antonov A.V., Stylyk I. G.(2013) Metody vyprobuvan vohnehasnykh poroshkiv z vyznachennia yikh vohnehasnoi zdatnosti za klasom pozhezhi D [Methods of testing fire extinguishing powders to determine their fire extinguishing ability by fire class D]. Visnyk UkrNIIPB. 2013. № 2 (28). 242-248 [in Ukrainian].
16. Kravets O.V., Mozgov oy D. K. Wavelet Transform in remote sensing data processing : Engineer of the 3rd Millennium : The VII I Students' Scientific Conference (May, 2009, Dniepropetrovsk) Dniepropetrovsk, 2009. P. 49–50.
17. Zhenmin S., Weidong S., Yuzhao W., Long G. Analysis of Optical Properties of Off-Axis Reflective Volume Holographic Grating. Optics and Photonics Journal. 2016. No 6. P. 136-144
18. Gusar, B., Kovalyshyn, V., Pozdieiev, S., Zemlianskiy, O. Myhalenko, K. Thermotechnical properties of the fireextinguishing powder for extinguishing materials based on magnesium alloy chips. Eastern-European Journal of Enterprise TechnologiesThis link is disabled., 2020, 2(10-104), pp. 46–53.

© В. В. Ковалишин, В. М. Марич,  
Р. Б. Веселівський, Вол. В. Ковалишин,  
Р. Я. Лозинський, 2024.

### Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 13.05.2024.

Прийнято до публікації 12.06.2024.