

УДК 614.841

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЦЕПТУРИ ВОГНЕГАСНОГО ПОРОШКУ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ДЛЯ КОМБІНОВАНОГО ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ А, В та D

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.123-134>

Ковалишин В. В., ORCID iD 0000-0002-5463-0230
Марич В. М., ORCID iD 0000-0001-7051-4494
Веселівський Р. Б.*, ORCID iD 0000-0003-3266-578X
Ковалишин Вол. В., ORCID iD 0000-0003-3739-8668
Чернецький В. В., ORCID iD 0000-0002-7193-8245
*E-mail: roman_veselivskuy@yahoo.com

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 29.09.2023

Пройшла рецензування: 15.10.2022

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

вогнегасний порошок, клас пожежі, комбінована пожежа, дробовий факторний експеримент, оптимальне співвідношення.

АНОТАЦІЯ

Процес гасіння пожеж класів D (за наявності сполук легких металів) та А, В є актуальним як у воєнний час, так і в мирний період. Основну небезпеку в пожежах цих класів становлять магній, алюміній та їх сплави, що використовують і у цивільній промисловості, і у військовій галузі під час виготовлення запалювальних гранат. Ураховуючи небезпеки горіння металів та можливість виникнення комбінованих пожеж, пошук та дослідження нових складів вогнегасних речовин комбінованої дії є актуальним завданням. Проведено вогневі випробування вогнегасних порошоків для гасіння сплавів магнію та встановлено, що найбільш ефективними є NaCl, KCl, мелений шлак, мелена зола. Обґрунтовано, що пожежі за наявності легких металів супроводжуються також горінням ЛЗР, ГР та твердих горючих речовин. Отже, є доцільність додавання в рецептуру вогнегасного порошку амофосу та складників, що будуть опудрювати вогнегасну суміш і забезпечувати її текучість. Визначено оптимальні вогнегасні характеристики порошку різної рецептури для гасіння легких металів. Встановлено вплив оптимального складу вогнегасного порошку на процес пожежогасіння, що досліджено згідно з матрицями планів, складених на підставі теорії планування багатофакторних експериментів. Здійснено експериментальні розвідки щодо окремих хімічних складників вогнегасних порошоків для гасіння пожеж класу D. З'ясовано, що ефективними хімічними речовинами є хлорид натрію, мелений шлак та амофос. Виконано лабораторні дослідження вогнегасних сумішей, які складаються з натрію хлориду, амофосу, меленого шлаку та аеросилу, стеарату цинку, та визначено параметри гасіння. Встановлено, що оптимальним співвідношенням складників вогнегасного порошку, які забезпечують оптимальну величину інтенсивності подавання, є: амофос – 17,5%, NaCl – 60%, мелений шлак – 20%, аеросил / стеарат цинку – 2,5%. Отримані експериментальні результати підтверджені математичним моделюванням із використанням матриць дробових факторних експериментів 2-го порядку.

Постановка проблеми. Процес гасіння пожеж класів D (за наявності сполук легких металів) та А, В є актуальним як у воєнний час, так і в мирний період. Основну небезпеку в пожежах зазначених класів становлять

магній, алюміній та їх сплави, що використовують і в цивільній промисловості, і у військовій галузі під час виготовлення запалювальних гранат.

Слід зазначити, що особливістю пилу магнієвих сплавів є можливість його

загоряння навіть від іскри, а горіння супроводжується вибухоподібною реакцією. Пил та стружка магнію і його сплавів за наявності залишків мастила мають властивість самозагорятись. Також значну небезпеку становить пил магнію з підвищеною вологістю, горіння якого має вибухоподібний характер [1]. Наелектризований магнієвий пил здатний займатися внаслідок його накопичення на витяжних трубопроводах систем вентиляції у виробничих приміщеннях.

Зазвичай пожеж одного класу D не буває. Можуть статися пожежі класу D із виникненням надалі пожеж класів A, B або, навпаки, – пожежі легкозаймистих речовин (ЛЗР) чи твердих горючих речовин із розвитком пожеж класу D. Для їх ліквідації необхідно використовувати вогнегасні речовини комбінованої дії з урахуванням високої температури горіння легких металів та інтенсифікації горіння під час застосування для гасіння води, вуглекислого газу та азоту. Необхідно також зважати на тиск під час подавання вогнегасної речовини, величина якого буде впливати на розбризкування горючих сплавів легких металів із подальшим збільшенням площі пожежі [2]. Слід зазначити, що в Україні не виготовляються порошки для комбінованого гасіння пожеж класів D та A, B.

Формулювання цілей дослідження. Метою роботи є дослідження складів вогнегасних порошоків на основі натрію хлориду з добавкою, амофосу, меленого шлаку та аеросилу / стеарату цинку, а також встановлення оптимального складу у відсотковому відношенні для ефективного гасіння пожеж класів A, B та D і розроблення оптимальної рецептури.

Задачами дослідження є:

- постановка проблеми щодо гасіння комбінованих пожеж (A, B та D);
- аналіз вітчизняних та зарубіжних складів вогнегасних речовин, призначених для гасіння пожеж класів A, B та D;
- проведення дослідження окремих хімічних складників вогнегасних порошоків для гасіння пожеж класу D;

- удосконалення рецептури вогнегасних порошоків для гасіння комбінованих пожеж;

- отримання оптимального складу вогнегасного порошку для гасіння комбінованих пожеж.

Методи дослідження. Методи аналізу процесів пожежогасіння, що містять послідовний підбір / перебір всіх чинників пожежогасіння і класичний регресійний аналіз, для визначення оптимальних вогнегасних характеристик порошку різної рецептури під час гасіння легких металів.

Для планування експерименту слід використовувати плани, що дають змогу отримати найбільш повну інформацію за несприятливих умов та мінімальної кількості проведення дослідів. Тобто необхідно оцінити оптимальність цих планів за різними критеріями.

За методикою [3–5] використовують плани повних факторних експериментів типу 2_k , що належать до найбільш ефективних під час побудови лінійних моделей і задовольняють як критеріям ортогональності, симетричності, нормування, рототабельності, так і критеріям D-, G-, A- і E-оптимальності. Під час застосування критерію ортогональності в планах 2-го порядку порушуються вимоги нормування і рототабельності, тобто цей критерій є недостатнім [6]. Важливішим є критерій рототабельності, який забезпечує отримання симетричних інформаційних контурів. Також він є близьким до ортогональності та мінімізує систематичні помилки.

Метод факторного планування експерименту використовуємо для дослідження впливу чинників пожежогасіння на інтенсивність подавання порошку різних рецептур. На основі досліджень чинників, що впливають на процес гасіння, і математичних моделей як поліноміальних залежностей використовуємо метод факторного планування 3_k [6].

У цьому разі визначальними факторами, що впливають на інтенсивність

подавання вогнегасного порошку під час гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів, є відповідний склад вогнегасної речовини А (NaCl / KCl), Б (мелений шлак), В (амофос).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми щодо гасіння пожеж класів А, В та D розглянуто у працях А. Антонова, В. Ковалишина, М. Вайсмана, О. Демиденка, М. Білошицького, R. Nelson, Kang et al H., С. Wilson, R. Tapscott, D. Zallen, В. Марича. Ці автори у своїх працях наголошують на застосовуванні відповідних вогнегасних речовин та засобів їх подавання для гасіння легких металів. Встановлено, що під час гасіння легких металів необхідно подавати порошок за мінімальної швидкості руху його частинок на горючу поверхню так, щоб він покривав поверхню і не роздмухував вогонь. Результати досліджень з гасіння пожеж класу D вогнегасними порошками спеціального призначення наведені у [7–8]. В усіх випадках дослідники дійшли висновку, що до складу спеціальних порошоків має входити NaCl або KCl. Наповнювачами можуть бути мелений пісок, шлак, зола, сполуки мелаїну, графіт, каолінова глина, проте відсотковий склад цих речовин потребує подальших досліджень та належних обґрунтувань. На сьогодні для гасіння пожеж класу D у Європі та США найчастіше застосовують вогнегасні порошки спеціального призначення (ВПСП) на основі хлоридів лужних металів. Як вогнегасні склади для металів використовують ряд рідинних складів (наприклад, на основі борних ефірів), але вони не набули широкого застосування у практиці пожежогасіння.

У роботі [9] пропонується гасити магній аргоном. Зазначене має сенс тільки за закритих об'ємів. Гасіння аргоном та аерозолями є об'ємним способом гасіння, що погано працює у разі поверхневого гасіння. Горіння сповільнюється, але не припиняється повністю.

Рецептура патенту CN 101455886 А від 17.06.2009 р.: для гасіння магнію та шлаку магнію; утворюється під час плавлення та

переробки магнієвих сплавів, має хороший ефект пожежогасіння. Складниками цієї рецептури є: 40–50 мас. % хлориду калію, 45–55 мас. % хлориду натрію і від 2–8 мас. % фториду кальцію. Завдяки низькій температурі плавлення порошку він швидко плавиться під час нагрівання, утворюючи рівномірне покриття на поверхні магнію.

Рецептура патенту FR 2689769 А1 від 15.10.1993 р.: містить шлак, отриманий під час виробництва заліза та сталі, в якому є близько 50 мас. % CaO, 12,5 мас. % SiO₂, 6 мас. % MgO, мас. % P₂O₅, 2 мас. % MnO, а решта – цинк, мідь, кобальт, хром і сірка; має високі вогнегасні властивості. Як недолік вказано, що композиція не є текучою, сильно поглинає вологу та швидко злежується під час зберігання. Шлак у своєму складі має елементи сірки, що підвищує його прогорання під час утворення захисного покриття на вогнищі горіння. Також не вказано хімічний елемент, який відповідає за текучість порошку.

Відомо про вогнегасний порошок (патент UA 70185 U від 25.05.2012 р.) для гасіння шматків губчастого титану, який містить сухий ільменітовий концентрат або титановий шлак, що включає оксиди титану, заліза, кремнію, марганцю тощо. Недоліком є вартість титанового шлаку, який не може бути основним компонентом у рецептурі вогнегасного порошку, тому що він не забезпечить ефективного гасіння, а може використовуватись як наповнювач.

Вогнегасний порошок – патент SU 1790951 А1 від 30.01.1993 року – призначений для гасіння легких металів, який містить негорючу легку фракцію кам'яновугільного шлаку, що є відходами теплових електростанцій, та включає оксиди кремнію і кальцію, розтікається, спікається з утворенням кірки, що перешкоджає доступу кисню до палаючого металу. Зазначено, що до вогнегасного порошку входить легка фракція кам'яновугільного шлаку, а для ефективної ізоляції і максимальної кількості потрапляння порошку на об'єкт

горіння необхідно використовувати важкі фракції.

З огляду на аналіз складів вогнегасних речовин встановлено, що недоліком цих складів є низька питома щільність, від якої залежить текучість вогнегасної речовини, а відповідно й ефективність процесу гасіння.

На основі проведеного аналізу однозначним є висновок, що гасіння легких металів потребує розроблення / вдосконалення нових вогнегасних складів, а кількісний склад компонентів суміші необхідно оптимізувати відповідно до теорії планування експерименту за умови досягнення найкращих показників.

Основні результати. Для встановлення вогнегасних характеристик складників порошку, що будуть використані для виготовлення порошків для гасіння легких металів, проводяться вогневі випробування за методикою [8].

Методика проведення експериментальних досліджень така. Увімкнути обладнання та перевірити його справність. Як пожежне навантаження

використовується стружка сплаву магнію, з якого виготовляють барабани коліс літаків. Підготовлення наважки вогнегасних речовин. Стружка сплаву магнію (20 г) висипається на термостійке деко та рівномірно розподіляється на площі 200x100 мм. Деко встановлене у лабораторній шафі. Вмикається вентиляція лабораторної шафи та одягаються засоби індивідуального захисту. Газовим пальником підпалюється магнієвий сплав. Після поширення полум'я на площу понад 50% розпочинається процес гасіння однією з підготовлених вогнегасних речовин (рис. 1) [10–11; 14–15]. Досліджуваний вогнегасний склад рівномірно насипається на поверхню, що горить, для покриття зони горіння однаковим шаром порошку. Результати гасіння (рис. 2) фіксуються в табл. 1 та 2, де вказується витрата вогнегасного порошку, час гасіння та інтенсивність подавання вогнегасної суміші. Після проведення експерименту випробувальна шафа очищається від твердих залишків магнієвих сплавів.



Рисунок 1 – Лабораторні вогневі випробування вогнегасних порошків для гасіння легких металів

З аналізу проведених досліджень окремих хімічних складників вогнегасних порошків для гасіння сплавів магнію встановлено, що найбільш ефективними є NaCl, KCl, мелений шлак, мелена зола. Зазвичай пожежі за наявності легких металів супроводжуються також горінням ЛЗР, ГР та твердих горючих речовин, тому надалі для досягнення результату гасіння комбінованої пожежі доцільно додати в рецептуру вогнегасного порошку амофос. Відомо, що ця хімічна речовина придатна

для гасіння пожеж класу В та є основною складовою сертифікованих вогнегасних порошків загального призначення [12–16]. Також для забезпечення текучості порошку необхідно додавати незначний відсоток опудрювачів, таких як аеросил, стеарат цинку, стеарат кальцію тощо.

Ураховуючи зазначене вище необхідно провести експериментальне дослідження сумішей вогнегасних порошків для гасіння пожеж класів А, В та D.

Таблиця 1 – Результати досліджень окремих складників вогнегасних порошоків для гасіння легких металів

№ експерименту	Вид вогнегасної речовини	Витрата вогн. реч., кг	Час гасіння t, с	Примітка
1.	NaCl	0,120	20	З'являються поодинокі язички полум'я
2.	KCl	0,123	22	З'являються поодинокі язички полум'я, зникають через 20 с після гасіння
3.	Каолін, біла глина	0,056	35,5	Прогоряє, з'являються язички полум'я
4.	FeO	0,13	39,2	Прогоряє, з'являються язички полум'я
5.	Аеросил	0,012	31	Не погасили
6.	Стеарат цинку	0,08	34,7	Спочатку частинки стеарату кальцію підсилюють горіння, після гасіння утворюється зв'язувальна суміш
7.	Мелена зола	0,173	32,8	З'являються поодинокі язички полум'я
8.	Мелений шлак	0,218	19,87	З'являються поодинокі язички полум'я, після гасіння через 20 с зникають
9.	Амофос	0,1	29,4	Не погасили



Рисунок 2 – Результати випробувань вогнегасних порошоків для гасіння магнію

Із проведених досліджень бачимо, що найкраще у спроможності гасіння ошурків магнію себе показали склади на основі хлориду натрію, меленого шлаку з відходів металургійного виробництва, амофосу та аеросилу зі стеаратом цинку.

З огляду на результати експериментальних досліджень, що

наведені у табл. 1, необхідно визначити оптимальні вогнегасні характеристики порошку різної рецептури для гасіння легких металів. Для цього проведемо вогневі випробування. Експеримент у лабораторних умовах здійснено за методикою [13–14; 17–18].

Таблиця 2 – Результати дослідження сумішей вогнегасних порошоків для гасіння комбінованих пожеж

№ Експерименту	Вид вогнегасної речовини	Витрата вогнегасн. речовини, кг	Час гасіння t, с	Примітка
1	NaCl – 45% Шлак – 43% Амофос – 10% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,213	34	Після гасіння, через 10 с горіння припинене
2	NaCl – 55% Шлак – 28% Амофос – 15% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,205	33	Після гасіння, через 10 с горіння припинене
3	NaCl – 60% Шлак – 20% Амофос – 18% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,218	36	Після гасіння, через 10 с горіння припинене
4	KCl – 45% Шлак – 43% Амофос – 10% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,206	35	Після гасіння, через 10 с горіння припинене
5	KCl – 55% Шлак – 28% Амофос – 15% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,210	31	Після гасіння, через 10 с горіння припинене
6	KCl – 60% Шлак – 20% Амофос – 18% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,219	30	Після гасіння, через 10 с горіння припинене
7	KCl – 58% Шлак – 20% Бура – 20% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,195	35	Після гасіння, через 10 с відбувається прогорання
8	NaCl – 58% Шлак – 15% Мідний купурус-15 Амофос – 10% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,201	36	Після гасіння, через 10 с відбувається прогорання
9	NaCl – 60% Каолін, біла глина – 28% Амофос – 10% Аеросил – 1% Стеарат цинку – 1%	0,215	34	Після гасіння, через 10 с відбувається прогорання

Схема випробувань вогнегасних порошоків для встановлення їх оптимальних характеристик наведена на рис. 3.

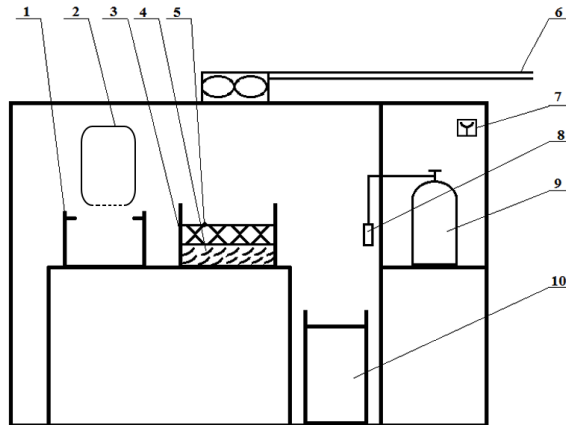


Рисунок 3 – Випробування рецептур вогнегасного порошку в лабораторних умовах: 1 – ємність з ВПСР; 2 – ємність для насипання порошку; 3 –термостійке деко; 4 – ошурки сплавів магнію; 5 – шар ВПСР; 6 – система димовилучення лабораторної шафи; 7 – вмикач системи вентиляції; 8 – газовий паливник; 9 – балон із газом; 10 – металевий бак для відпрацьованого порошку та ошурків магнію

Інтенсивність подавання вогнегасного порошку визначається за формулою (1):

$$I = m/F \times t \quad (1)$$

де I – інтенсивність подавання вогнегасної речовини, $\text{кг}/(\text{м}^2 \times \text{с})$;

m – маса витраченої вогнегасної речовини, кг

F – площа горіння, м^2

t – час подавання вогнегасної речовини, с .

Площа горіння в усіх дослідах однакова: $2,85 \times 10^{-2} \text{м}^2$. Маса порошку, витрачена на гасіння, фіксується за фактом гасіння.

Таблиця 3 – Результати гасіння магнію та його сплаву різними вогнегасними складами, які містять хлорид натрію, мелений шлак із відходів металургійного виробництва, амофос та аеросил

№ з/п	Компоненти вогнегасного порошку			Інтенсивність I , $\text{кг}/(\text{м}^2 \times \text{с})$
	NaCl, %	мелений шлак, %	амофос, %	
1	2	3	4	5
1	80	10	7,5	0,25
2	75	13	9,5	0,26
3	70	15	12,5	0,29
4	65	17	15,5	0,3
5	60	20	17,5	0,33
6	55	23	19,5	0,36
7	50	25	22,5	0,38
8	45	27,5	25	0,43
9	45,5	28	24	0,47
10	42,5	30	25	0,5

У всіх випадках кількість аеросилу в рецептурі вогнегасних порошків становить 2,5%.

Згідно з [9; 15] відомо, що оптимальним складом вогнегасного порошку для гасіння сплавів магнію є порошок, до складу якого входить мелений шлак, хлорид натрію і аеросил. Найбільше значення у цій рецептурі має хлорид натрію та мелений шлак, але це справедливо для гасіння пожеж класу D.

Для гасіння пожеж класів А і В важливе значення має наявність в рецептурі порошоків-інгібіторів горіння в кількості близько 10–30%. Основні складники порошоків загального призначення є такими: фосфорамонійні солі (моно-, діамонійфосфати, амофос), карбонат і бікарбонат натрію та калію, хлориди натрію і калію [16].

Найчастіше у рецептурі сучасних порошоків використовують амофос (П-2АП, «Пірант», П-4АП, П-1А, АВС «Фактор», АВС «Промікс», АВС «Вогнеборець»).

Амофос на поверхні магнію за температури понад 1300 °С прогоряє. Отже, необхідно підібрати такий склад вогнегасного порошку за максимальної кількості амофосу, що буде мати найнижчу інтенсивність гасіння пожеж класу D та найменше прогоряти.

Експериментальні дослідження проводили згідно з планами матриць дробових факторних експериментів (далі – ДФЕ) [6]. ДФЕ проводили відповідно до плану № 30, водночас за основні параметри пожежогасіння вогнегасним порошком взято: А (NaCl / KCl фактор X_1), Б (мелений шлак, фактор X_2) та В (амофос, фактор X_3). Інші фактори – незмінні: площа горіння легких металів – $2,85 \times 10^{-2} \text{ м}^2$; вміст аеросилу / стеарату цинку в рецептурі вогнегасних порошків – 2,5%. Рівні варіювання факторів для ДФЕ типу № 30 [5] беремо згідно з табл. 3.

Зв'язки між параметрами оптимізації (геометричними та фізичними параметрами, складовими різних процесів тощо) та характеристиками процесів пожежогасіння беремо як математичні залежності, що мають вигляд ступеневих

функцій. З огляду на це вважаємо, що для процесу гасіння вогнегасним порошком нелінійні за факторами математичні моделі 2-го порядку будуть адекватно описувати зв'язок між технологічними параметрами процесу пожежогасіння та параметрами оптимізації, зокрема інтенсивністю подавання вогнегасного порошку для гасіння легких металів. Виконавши стандартне логарифмічне перетворення ступеневі функції отримують рівняння регресії, для якої допустимо використовувати матриці планування експериментів:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 \quad (2)$$

де Y – вибіркова оцінка функції, що вивчається; b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – вибіркові коефіцієнти регресії (оцінки для генеральних значень коефіцієнтів регресії $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$); X_i, X_j – незалежні змінні; k – загальне число незалежних змінних.

Вибіркові коефіцієнти регресії цієї моделі визначаються з використанням матриці планування і результатів експериментів; матриця нормальних рівнянь плану повинна бути не виродженою, тобто необхідно, щоб існувала обернена матриця $(X^*X)^{-1}$.

Загальне число коефіцієнтів регресії для моделі 2-го порядку передається, як

$$N_k = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad (3)$$

Під час побудови математичних моделей кількість повторних дослідів вибираємо $r = 2$ для гарної їх відтворюваності. Також на вибір кількості дослідів має вплив працемісткість проведення експериментів, наявність необхідних матеріалів і обробка результатів.

Результати експериментів опрацьовували за методикою, яка містить статистичний аналіз досліджень [6]. Перевірка гіпотези про адекватність отриманої математичної моделі проводиться за даними матриці планування і результатами з неповторюваними за умовами рядками із застосуванням критерію Фішера для рівня значущості $\alpha = 0,05$. Гіпотеза про

значущість множинного коефіцієнта кореляції визначається за F-критерієм.

Таблиця 4 – Рівні варіювання факторів для ДФЕ типу № 30 [24]

№ з/п	Характеристика фактора	Кодоване позначення	Рівні варіювання		Інтервал варіювання
			Верхній	нижній	
1	NaCl A, %	X ₁	80	42,5	37,5
2	Мелений шлак B, %	X ₂	30	10	20
3	Амофос B, %	X ₃	25	7,5	17,5

Процес гасіння залежить від параметрів та способу подавання вогнегасного порошку відповідного складу у певному відсотковому співвідношенні, які відіграють визначальну роль у підвищенні ефективності процесу пожежогасіння: хлориду натрію / калію (NaCl / KCl) A, меленого шлаку B, амофосу B. Взаємний вплив оптимальних параметрів процесу пожежогасіння на інтенсивність подавання вогнегасного порошку через складність теоретичного прогнозування процесів подавання доцільно досліджувати експериментально.

Вплив оптимального складу вогнегасного порошку на процес пожежогасіння досліджували згідно з матрицями планів, складених на підставі теорії планування багатофакторних експериментів. Під час пожежогасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів контролювали такий параметр, як інтенсивність подавання вогнегасного порошку I за різного його складу. За оптимальні параметри процесу пожежогасіння комбінованих пожеж у разі наявності легких металів взято: хлориду натрію / калію (NaCl / KCl) A, мелений шлак B, амофос B. Інші фактори –

стабілізовані: площа горіння магнію – $2,85 \times 10^{-2} \text{ м}^2$; вміст аеросилу в рецептурі вогнегасних порошків – 2,5%. На підставі експериментальних досліджень для процесу пожежогасіння магнієвих ошук беруться такі межі зміни факторів: A = 42,5 – 80%; B = 10 – 30%; C = 7,5 – 25%.

Матриця планування дробового багатофакторного експерименту та визначені значення інтенсивності подавання вогнегасного порошку, отримані під час гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів, наведена у табл. 4.

Обробку результатів експериментальних досліджень проводили за загальноприйнятою методикою [6]. Математичні залежності у кодованих змінних для визначення інтенсивності подавання вогнегасного порошку після перевірки однорідності дисперсій, відтворюваності у дослідах за критерієм Кохрена, значущості коефіцієнтів регресій за допомогою критерію Стьюдента та адекватності математичних моделей у разі застосування критерію Фішера мають вигляд:

$$y_I = -0,4589 - 0,3227 \cdot x_1^2 - 0,324 \cdot x_2^2 - 0,3844 \cdot x_3^2 - 0,0327 \cdot x_1 - 0,0392 \cdot x_2 + 0,1408 \cdot x_3 - 0,0372 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,0039 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,0481 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (4)$$

На підставі результатів дисперсійного аналізу за величиною та знаком коефіцієнтів регресії із математичної залежності (4) можна зробити такий висновок: для гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів найбільший вплив на інтенсивність подавання вогнегасного

порошку має амофос (фактор x₃) та хлорид натрію (NaCl / KCl, фактор x₁). Найбільш впливовою є взаємодія факторів x₂·x₃, після неї – взаємодія x₁·x₂. Збільшення величини цих факторів до значень, що наближаються до максимальних, забезпечує найкращу інтенсивність подавання вогнегасного порошку.

Порушення взаємозв'язку між ними різко погіршує інтенсивність подавання вогнегасного порошку.

$$lgI = -0,4589 - 0,3227(7,27lgA - 12,84)^2 - 0,324(4,19lgB - 5,19)^2 - 0,3844(3,82lgC - 4,35)^2 - 0,0327(7,27lgA - 12,84) - 0,0392(4,19lgB - 5,19) + 0,1408(3,82lgC - 4,35) - 0,0372(7,27lgA - 12,84) \cdot (4,19lgB - 5,19) - 0,0039(7,27lgA - 12,84) \cdot (3,82lgC - 4,35) + 0,0481 \cdot (4,19lgB - 5,19) \cdot (3,82lgC - 4,35)$$

$$I = 10^{lgI} \quad (5)$$

На підставі аналізу даних експериментальних досліджень, рівняння регресії і графічних залежностей встановлено, що оптимальну інтенсивність подавання вогнегасного порошку для гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів можна забезпечити за такого співвідношення компонентів порошку: $A = 60\%$; $B = 20\%$; $C = 17,5\%$.

Отримана рецептура порошку апробована під час гасіння пожеж класів А та В на модельних вогнищах, що підтверджує її комбіновану вогнегасну здатність [17].

Висновки та напрями подальших досліджень. З огляду на те, що пожеж одного класу D не буває, а зазвичай стаються пожежі класу D з виникненням надалі пожеж класів А, В або, навпаки, – пожежі легкозаймистих речовин (ЛЗР) або твердих горючих матеріалів, а потім – пожежі легких металів, пошук та дослідження нових складів вогнегасних речовин комбінованої дії є перспективами з погляду теоретичних та експериментальних досліджень.

Аналіз публікацій та літературних джерел показав, що на сьогодні немає вогнегасних речовин, які б забезпечили ефективно гасіння комбінованих пожеж і

У натуральних змінних математичні залежності для відображення змін інтенсивності подавання вогнегасного порошку мають вигляд:

були призначені для гасіння пожеж класів А, В та D.

Проведено експериментальні дослідження окремих хімічних складників вогнегасних порошків для гасіння пожеж класу D та встановлено, що ефективними хімічними речовинами є хлорид натрію, мелений шлак та амофос.

Виконано лабораторні дослідження вогнегасних сумішей, які складаються з натрію хлориду, амофосу, меленого шлаку та аеросилу / стеарату цинку та визначено параметри гасіння.

Встановлено оптимальне співвідношення складників вогнегасного порошку, які забезпечують оптимальну величину інтенсивності подавання. Таким складом є: амофос – 17,5%, NaCl – 60%, мелений шлак – 20%, аеросил / стеарат цинку – 2,5%.

Отримані експериментальні результати підтверджені математичним моделюванням з використанням матриць дробових факторних експериментів 2-го порядку, які адекватно описують зв'язок між технологічними параметрами процесу пожежогасіння та параметрами оптимізації, зокрема інтенсивністю подавання вогнегасного порошку для гасіння легких металів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ковалишин В. В., Мірус О. Л., Марич В. М., Ковалишин Вол. В., Лозинський Р. Я. Проблеми гасіння магнію та його сплавів. *Збірник наукових праць. Пожежна безпека*. Львів. 2016. № 28. С. 58–63.
2. 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 наук.-практич. конференції з міжнародною участю, Львів, 1 жовт. 2022. Львів: ЛДУБЖД, 2022. С. 303–305.
3. Налімов В. В., Голикова Т. И. Логические основания планирования эксперимента. М.: МГУ, 1971. 72 с.
4. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента. М.: Легкая индустрия, 1974. 262 с.

5. Душинский В. В., Пуховский Е. С., Радченко С. Г. Оптимизация технологических процессов в машиностроении. Київ : Техніка, 1977. 176 с.
6. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей (справочное издание) / Р. З. Бродский и др. М.: Металлургия, 1982. 752 с.
7. Wilson C., Plugge M. and Zallen D. Evaluation of Existing: Phase 1. Agents Extinguishing Agent for Magnesium Fire / New Mexico Engineering and Research Institute Report prepared for Air Force Engineering and Services Center. Tyndall Air Force Base, 1983. P. 3–24.
8. Ковалишин В. В., Марич В. М., Кирилів Я. Б. та ін. Дослідження хімічних речовин як складників вогнегасних порошків для гасіння легких металів. *Збірник наукових праць. Пожежна безпека*. Львів. 2016. № 29. С. 46–56.
9. Баланюк В. М., Ковалишин В. В., Козяр Н. М. Запобігання займання газових сумішей n-гептану комбінованими системами ударних хвиль та об'ємних вогнегасних речовин. *ScienceRise*. 2017. № 11(40). С. 21–24.
10. Ковалишин В. В., Кріса І. Я., Васильєва О. Е., Кирилів Я. Б. Основи експлуатації вогнегасників : навч. посіб. Львів : Сполом, 2011. 304 с.
11. Антонов А. В., Боровиков В. О., Орел В. П., Жартовський В. М., Ковалишин В. Вогнегасні речовини : посіб. Київ : 2004. 171 с.
12. Методичний посібник з питань експлуатації та застосування вогнегасників. Київ : Основа, 1997. 149 с.
13. Антонов А. В., Стилик І. Г. Методи випробувань вогнегасних порошків з визначення їх вогнегасної здатності за класом пожежі D. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. Київ, 2013. № 2(28). С. 242–248.
14. Ковалишин В. В., Марич В. М., Гусар Б. М. та ін. Обґрунтування методики випробувань вогнегасних порошків спеціального призначення. *Збірник наукових праць. Пожежна безпека*. Львів. 2018. № 33. С. 53–59. doi : 10.32447/20786662.33.2018.07.
15. Вогнегасний порошок для гасіння легких металів, електроустановок під напругою за наявності магнію, алюмінію та їх сплавів / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Вол. В. Ковалишин, Б. М. Гусар, Я. Б. Кирилів. Пат. на винахід 124876 Україна : МПК (2021.01), A62D 1/00 № а 2018 01936; заявл. 26.02.2018; опубл. 08.12.2021. Бюл. № 49. 4 с.
16. Вогнегасний порошок спеціального призначення для комбінованого гасіння пожеж класу D, А, В / В. В. Ковалишин, Б. М. Гусар, В. М. Марич, Вол. В. Ковалишин. Пат. на корисну модель 145068 Україна : МПК (2020.01), A62D 1/00 № u 2019 11577; заявл. 02.12.2019; опубл. 25.11.2020. Бюл. № 22. 3 с.
17. Звіт науково-дослідної роботи «Вдосконалення технології гасіння комбінованих пожеж за наявності легких металів чи фосфорних сполук», виконавці : В. В. Ковалишин, Р. Б. Веселівський, В. М. Марич, Вол. В. Ковалишин, В. Л. Петровський, П. В. Пастухов, Н. Р. Великий ; номер державної реєстрації № 0122U200807. Львів : ЛДУБЖД, 2023. 123 с.

REFERENCES

1. Kovalysh, V. V., Mirus. O. L., Marych, V. M., Kovalyshyn, Vol. V., Lozinsky, R. Ya. Problemy (2016) Hasinnia mahniiu ta yoho splaviv [The problems of magnesium and its alloyextinguishing] *Pozhezhna bezpeka*, 28. P. 55–62. [in Ukrainian].
2. Kovalyshyn, V. V., Petrovskiy, V. L., Veselivskiy, R. B., Marych, V. M., Kovalyshyn, Vol. V., Velykiy, N. R. Analysis and problems of extinguishing combined fires in the presence of light metals or phosphorus compounds. 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, Lviv, 1 october 2022. Lviv: LSULS, 2022. P. 303–305.
3. Nalymov, V. V., Holykova, T. Y. (1971) *Lohycheskye osnovanyia planirovaniya eksperymenta* [Logical bases for planning an experiment]. Moscow: MSU. [In Russian].
4. Tykhomirov, V. B. (1974) *Planirovaniye y analiz eksperymenta* [Planning and analysis of the experiment]. Moscow: Light industry. [In Russian].
5. Dushynskiy, V. V., Pukhovskiy, E. S., Radchenko, S. H. (1977) *Optymyzatsiya tekhnolohycheskykh protsessov v mashynostroenyi* [Optimization of technological processes in mechanical engineering]. Kyiv: Technique. [In Russian].
6. Brodsky, R. Z., et al. (1982) *Tablytsy planov eksperymenta dlia faktornykh y polynomyalnykh modelei (spravochnoe izdanye)* [Tables of experiment plans for factor and polynomial models (reference edition)]. Moscow: Metallurgy. [In Russian].
7. Wilson, C., Plugge, M. and Zallen, D. Evaluation of Existing: Phase 1. Agents Extinguishing Agent for Magnesium Fire / New Mexico Engineering and Research Institute Report prepared for Air Force Engineering and Services Center. Tyndall Air Force Base, 1983. P. 3–24.
8. Kovalyshyn, V. V., Marych, V. M., Kyryliv, Ya. B., Koshelenko, V. V., Mirus, O. L. (2016) *Doslidzhennia khimichnykh rehovyn yak skladnykiv vohnehasnykh poroshkiv dlia hasinnia lehkykh metaliv* [Researchof thechemicals usablein fireextinguishing powder forlight metalfires extinguish] *Pozhezhna bezpeka*, 29. P. 46–56. [in Ukrainian].
9. Balaniuk, V. M., Kovalyshyn, V. V., Koziar, N. M. (2017) *Zapobihannia zaimannia hazovykh sumishei n-heptanu kombinovanymy systemamy udarnykh khvyl ta obiemnykh vohnehasnykh rehovyn* [Prevention of ignition of n-heptane gas mixtures by combined systems of shock waves and bulk extinguishing agents]. *ScienceRise*, 11(40). P. 21–24. [in Ukrainian].
10. Kovalyshyn, V. V., Krisa, I. Ya., Vasyliieva, O. E., Kyryliv, Ya. B. (2011) *Osnovy ekspluatatsii vohnehasnykiv* [Basic operation of fire extinguishers]. Lviv: Spolom [in Ukrainian].
11. Antonov, A. V., Borovykov, V. O., Orel, V. P., Zhartovskiy, V. M., Kovalyshyn, V. V. (2004) *Vohnehasni rehovyny* [Fire extinguishing agents]. Kyiv. [in Ukrainian].
12. *Metodychnyi posibnyk z pytan ekspluatatsii ta zastosuvannia vohnehasnykiv* [Methodical guide on the operation and use of fire extinguishers] (1997). Kyiv: Osнова. [In Ukrainian].
13. Antonov, A. V., Stylyk, I. H. (2013) *Metody vyprobuvan vohnehasnykh poroshkiv z vyznachennia yikh vohnehasnoi zdatnosti za klasom pozhezhi D* [Test methods for fire extinguishing powders to determine their fire extinguishing capacity according to fire class D]. *Naukovyi visnyk UkrNDIPB*, № 2(28). P. 242–248. [In Ukrainian].

14. Kovalyshyn, V. V., Marych, V. M., Gusar, B. M., Navaliany, V. I., Fedjuk, Ya. I. (2018) Obhruntuvannia metodyky vyprobuvan vohnehasnykh poroshkiv spetsialnoho pryznachennia [Justification of dry chemical powders testing procedure]. *Pozhezhna bezpeka*, 33. P. 53–59. [in Ukrainian]. doi: 10.32447/20786662.33.2018.07.
15. Kovalyshy, V. V., Marych, V. M., Kovalyshyn, Vol. V., Husar, B. M., Kyrlyiv, Ya. B. Vohnehasnyi poroshok dlia hasinnia lehkykh metaliv, elektroustanovok pid napruhoiu za naiavnosti mahnniu, aliuminiu ta yikh splaviv [Fire extinguishing powder for extinguishing light metals, electrical installations under voltage in the presence of magnesium, aluminum and their alloys]. Patent UA, no. 124876.
16. Kovalyshyn, V. V., Husar, B. M., Marych, V. M., Kovalyshyn, Vol. V. Vohnehasnyi poroshok spetsialnoho pryznachennia dlia kombinovanoho hasinnia pozhezh klasu D, A, B [Special purpose fire extinguishing powder for combined extinguishing of fires of class D, A, B]. Patent UA, no. 145068.
17. Report of the research work (2023) «Vdoskonalennia tekhnolohii hasinnia kombinovanykh pozhezh za naiavnosti lehkykh metaliv chy fosfornykh spoluk» [Improving the technology of extinguishing combined fires in the presence of light metals or phosphorus compounds], performers: Kovalyshyn V. V., Veselivskyi R. B., Marych V. M., Kovalyshyn Vol. V., Petrovskyi V. L., Pastukhov P. V., Velykyi N. R., state registration number № 0122U200807. Lviv: LSULS . 123 p.

OPTIMIZATION OF THE FORMULATION OF SPECIAL-PURPOSE FIRE EXTINGUISHING POWDER FOR COMBINED EXTINGUISHING OF CLASS A, B AND D FIRES

V. Kovalyshyn, V. Marych, R. Veselivskyi, Vol. Kovalyshyn, V. Chernetskyi

Lviv State University of Life Safety, Ukraine

KEYWORDS: ANNOTATION

extinguishing powder, fire class, combined fire, fractional factorial experiment, optimal ratio.

The process of extinguishing class D fires (in the presence of light metal compounds) and class A, B fires is relevant both in wartime and in peacetime. The main danger of fires of this class is magnesium, aluminum and their alloys, which are used both in civilian industry and in the military in the manufacture of incendiary grenades. Given the hazards of metal combustion and the possibility of combined fires, the search for and research of new compositions of extinguishing agents with combined action is an urgent task. Fire tests of fire extinguishing powders for extinguishing magnesium alloys were carried out and it was found that NaCl, KCl, ground slag, ground ash are the most effective. It has been substantiated that fires in the presence of light metals are also accompanied by the burning of lubricants, grease and solid combustibles, and therefore it is advisable to add ammophos and components to the fire extinguishing powder formulation that will dust the extinguishing mixture and ensure its fluidity. Optimal fire extinguishing characteristics of powders of different formulations for extinguishing light metals are determined. The influence of the optimal composition of fire extinguishing powder on the fire extinguishing process was studied according to the plan matrices compiled on the basis of the theory of planning multifactorial experiments. Experimental studies of individual chemical components of fire extinguishing powders for extinguishing class D fires were carried out and it was found that sodium chloride, ground slag and ammophos are effective chemicals. Laboratory tests of fire extinguishing mixtures consisting of sodium chloride, ammophos, ground slag and aerosil, zinc stearate were performed and extinguishing parameters were determined. It was found that the optimal ratio of fire extinguishing powder components that provide the optimal value of the supply intensity is: ammophos – 17,5%, NaCl – 60%, ground slag – 20%, aerosil/zinc stearate – 2,5%. The obtained experimental results are confirmed by mathematical modeling using matrices of fractional factorial experiments of the 2nd order.