

[0000-0002-2373-2429] **Є. П. Кириченко**

e-mail: kyrychenkojp@gmail.com

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНІХ ТЕРМІЧНИХ ДІЙ НА ПІРОТЕХНІЧНІ МЕТАЛОКСИДНІ ВИРОБИ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Практичне значення мають методики попередження вимушених передчасних пожежонебезпечних руйнувань виробів у випадку впливу зовнішніх термічних дій, які повинні базуватися на науково-обґрунтованих методах визначення критичних значень параметрів термічних впливів на виробу і технологічних параметрів зарядів сумішей, перевищення яких призводить до передчасних пожежонебезпечних руйнувань виробів. На базі отриманих експериментальних даних, математичних, експериментально-статистичних моделей, спеціалізованого програмного забезпечення у вигляді чотирьох стандартних пакетів прикладних програм розроблено науково-обґрунтовану методику визначення критичних діапазонів зміни параметрів зовнішніх термодій та керованих технологічних параметрів зарядів сумішей, перевищення яких призводить до пожежовибухонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів. Практичне застосування розробленої методики для виробів на основі досліджуваних сумішей у вигляді засобів контролю і технологічних рекомендацій дозволяє знизити вірогідність їх руйнування в умовах експлуатації у 2...3 рази.

Ключові слова: пожежна безпека, піротехнічні суміші, процеси займання та горіння, порошки металевих пальних та оксидів металів.

Вступ. Нині піротехнічні металооксидні виробу, основою яких є суміші металевих пальних (магнію, алюмінію, титану, цирконію та ін.) та оксидів металів (оксидів міді, сурми, нікелю та ін.), широко використовуються як спалахувальні та запалювальні засоби для освітлювальних і сигнальних патронів та снарядів, ІЧ-засобів теплового захисту різних об'єктів, а також у вигляді засобів в артилерійських або бомбових дистанційних трубках та ін. Водночас з кожним роком в Україні та в усьому світі зростає кількість пожеж і вибухів у процесі обігу досліджуваних виробів, що призводить до руйнування об'єктів, травмування та загибелі людей, значних матеріальних збитків [9]. Велика кількість передчасних вибухонебезпечних спрацьовувань зазначених виробів мала катастрофічні наслідки (Мексика (2017 р.), Йорданія (2019 р.), Ліван (2020 р.) та ін.). Так, наприклад, у порту м. Бейрут (2020 р.) в результаті пожежі на складі піротехніки стався потужний вибух, що створив ударну хвилю, яка повністю зруйнувала припортову інфраструктуру, будівлі та споруди на відстані 10 км, загинуло сотні людей, тисячі – було поранено.

Зазначені випадки свідчать про те, що виробу спалахують і руйнуються з виникнен-

ням пожеж та вибухів внаслідок впливу зовнішніх термічних дій. Останні можуть бути обумовлені, наприклад, пожежею у складських приміщеннях, де зберігаються виробу, займанням близько розташованих об'єктів при транспортуванні, умовами пострілу та польоту виробів тощо.

Тому практичного значення набувають методики попередження руйнувань виробів з виникненням пожежі при впливі зовнішніх термічних дій. Основою цих методик є методи визначення значень параметрів термічних впливів і технологічних характеристик зарядів сумішей, перевищення яких призводить до пожежонебезпечних руйнувань виробів.

На цей момент на основі проведених достатньо широких теоретико-експериментальних досліджень зазначені методи розроблено тільки для широко використовуваних у піротехніці сумішей металевих пальних і нітратовмісних окиснювачів (нітратів лужних та лужноземельних металів) [5-8]. Розроблено методи для визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів (теплових потоків, часів їх дії, швидкостей обдуву потоком повітря, режимів обтікання та ін.) [10-13]. Запропоновано метод для визначення критичних діапазонів зміни швидкості горін-

ня зазначених сумішей в умовах підвищених температур нагріву (до 600...700 К) і зовнішніх тисків (до 10^7 Па) [14-16]. Сформульовано практичні рекомендації з використання розроблених методів у піротехнічному виробництві виробів на основі зазначених сумішей та при їх експлуатації, що дозволяють знижувати вірогідність пожежонебезпечних руйнувань виробів при наявності екстремальних термічних впливів [16-18]. Щодо досліджуваних піротехнічних металооксидних виробів, то нині зазначені методи для них відсутні.

Мета та задачі досліджень. *Мета роботи:* розробка методики визначення значень характеристик термічних впливів та керованих технологічних параметрів зарядів сумішей, що призводять до передчасного займання та вибухового розвитку горіння піротехнічних сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів, та, у кінцевому підсумку, до пожежонебезпечного руйнування виробів.

Задачами досліджень є:

- сформулювати програмний комплекс, що дозволяє вирішувати типові інженерно-технологічні задачі пожежної безпеки різних піротехнічних сумішей;
- розробити алгоритм практичного використання методики;
- оцінити підвищення пожежної безпеки при використанні методики.

Виклад основного матеріалу. В основу методики покладено розроблені раніше [18, 19] математичні та експериментально-статистичні моделі, а також стандартне спеціалізоване програмне забезпечення у вигляді чотирьох пакетів прикладних програм ПАКЕТ1 – ПАКЕТ4 за сучасними чисельними методами, використовуючи які, формується база даних по критичних значеннях, перевищення яких призводить до передчасного розвитку вибухового горіння, величин теплових потоків та часів їх дії, а також технологічних параметрах зарядів (співвідношеннях компонентів та їх дисперсності, коефіцієнтах ущільнення сумішей, геометричних розмірах виробів).

Комплекс моделей. На рисунку 1 зображено комплекс розроблених математичних та експериментально-статистичних моделей [18, 19], розрахунки за якими дозволяють сформулювати базу даних, на основі якої й було розроблено зазначену вище методику.

Спеціалізований програмний комплекс. Для проведення розрахунків за моделями використовувався спеціалізований програмний комплекс СПК, що містить стандартні пакети

прикладних програм (ППП) ПАКЕТ1 – ПАКЕТ4 з основних методів розв'язання обчислювальних задач (рисунки 2).

Програмний комплекс складається з чотирьох спеціалізованих ППП, що містять 80 програмних модулів з сучасних чисельних методів розв'язання лінійних і нелінійних, одиничних і систем алгебраїчних та трансцендентних рівнянь, одиничних і систем звичайних диференціальних рівнянь 1-го порядку і 2-го порядку, диференціальних рівнянь у часткових похідних 2-го порядку, крайових задач для звичайних і диференціальних рівнянь у часткових похідних 2-го порядку, інтегральних рівнянь Вольтера II роду, а також методів чисельного інтегрування функцій, регресійного аналізу, інтерполяції і статистичної обробки експериментальних даних. Ефективність зазначених ППП було встановлено в результаті проведення широких чисельних експериментів (у діалоговому режимі було вирішено більше 300 інженерно-технологічних задач, властивих процесам горіння піротехнічних сумішей).

Алгоритм практичного використання методики. Згідно з розробленим алгоритмом (рисунки 3) на першому етапі створюється вихідна база даних, яка містить параметри зовнішніх термодій (густина теплового потоку q_n , час його дії t , швидкість обдуву потоком повітря V , критерій Рейнольдса Re , температура нагріву T_0 та тиск P , при яких починається горіння зарядів сумішей), технологічні характеристики зарядів сумішей (природа окиснювача та металевого пального, відносний вміст металевого пального ζ_m у суміші, середній розмір частинок порошку металевого пального d_m та порошку окиснювача $d_{ок}$), механічні та теплофізичні параметри зарядів сумішей (геометрична форма та розміри, густина, теплоємність та коефіцієнт теплопровідності), отриманий комплекс математичних та експериментально-статистичних моделей, пакети прикладних програм ПАКЕТ1 – ПАКЕТ4, що входять у СПК, з метою проведення розрахунків на ПК. На другому етапі вводяться значення T_n (температура поверхні заряду суміші) та T_3 (температура займання металевого пального у продуктах розкладання окиснювача), при перевищенні яких ($T_n > T_3$), що відповідає критичним зовнішнім термічним впливам ($q_n > q_n^*$, $t > t^*$, $V > V^*$, $Re > Re^*$), відбувається прискорення саморозігрівання сумішей, передчасне їх займання та розвиток вибухового горіння. Потім вибирається мо-

дель зовнішніх термічних впливів на заряд суміші, використовуючи ППП, розраховуються значення параметра T_n , далі вони порівнюються з їх граничними значеннями і знаходяться критичні значення q_n^* , t^* , V^* та Re^* , при яких виробу руйнуються. Проводяться вимірювання температури поверхні T_n , теплового потоку q_n , швидкості обдуву V та критерію Рейнольдса Re в окремих точках заряду. Результати вимірювань зіставляються з результатами розрахунків та визначаються помилки розрахункових методів знаходження критичних параметрів q_n^* , t^* , V^* та Re^* . Якщо виявлено істотні розбіжності (більше 10...12 %), здійснюється коригування моделей. На третьому етапі, якщо виріб залишається у працездатному стані у жорстких умовах експлуатації, тобто не відбулись перегрів корпусу та передчасне спрацювання заряду суміші, відсутні локальне або повне руйнування, вводяться значення температури займання T_3 , часу згоряння частинок металевго пального τ_2 , швидкості горіння сумішей u та їх граничні значення (τ_2^* , T_3^* , $u_{(\zeta)}^*$) (швидкість горіння на верхній концентраційній межі, перевищення якої веде до вибухового розвитку процесу

горіння), $u_{(\zeta)}^*$ (швидкість горіння на нижній концентраційній межі, перевищення якої призводить до затухання процесу горіння). Далі вибирається математична або експериментально-статистична модель та, використовуючи ППП, проводиться розрахунок τ_2 , T_3 , u при заданих значеннях керованих параметрів (ζ_m , d_m , $d_{ок}$, T_0 , P), після чого значення параметрів зіставляються з їх граничними значеннями (перевірка виконання умов: $\tau_2 < \tau_2^*$, $T_3 < T_3^*$, $u < u_{(\zeta)}^*$, $u > u_{(\zeta)}^*$). Якщо зазначені умови не виконуються, проводиться коригування значень керованих параметрів і визначаються критичні діапазони їх зміни: $\zeta_m < (\zeta_m)_{ВМГ}$, $\zeta_m > (\zeta_m)_{НМГ}$, $d_m < d_m^*$ (або $d_m > d_m^*$), $d_{ок} < d_{ок}^*$ (або $d_{ок} > d_{ок}^*$), $T_0 > T_0^*$ (або $T_0 < T_0^*$), $P > P^*$ (або $P < P^*$). Наступними кроками є проведення вибірових вимірювань температури займання та часу горіння, швидкості горіння, зіставлення з їх розрахунковими значеннями, і визначення похибки розрахункових методів знаходження критичних діапазонів зміни керованих параметрів. Коригування моделей проводиться у разі виявлення значних розбіжностей між розрахунковими та експериментальними даними (більше 10...12 %).



Рисунок 1 – Комплекс розроблених математичних та експериментально-статистичних моделей для формування бази даних



Рисунок 2 – Склад спеціалізованого програмного комплексу (СПК)

На завершення слід відзначити, що розроблена науково обґрунтована методика дає можливість при розробці піротехнічних ви-

бів, основою яких є суміші з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів, формувати в автоматизованому режимі базу даних по критичних значеннях параметрів термічних дій, перевищення яких призводить до передчасного займання зарядів сумішей, прискореного розвитку їх горіння та зрештою до вибухонебезпечного руйнування виробів.

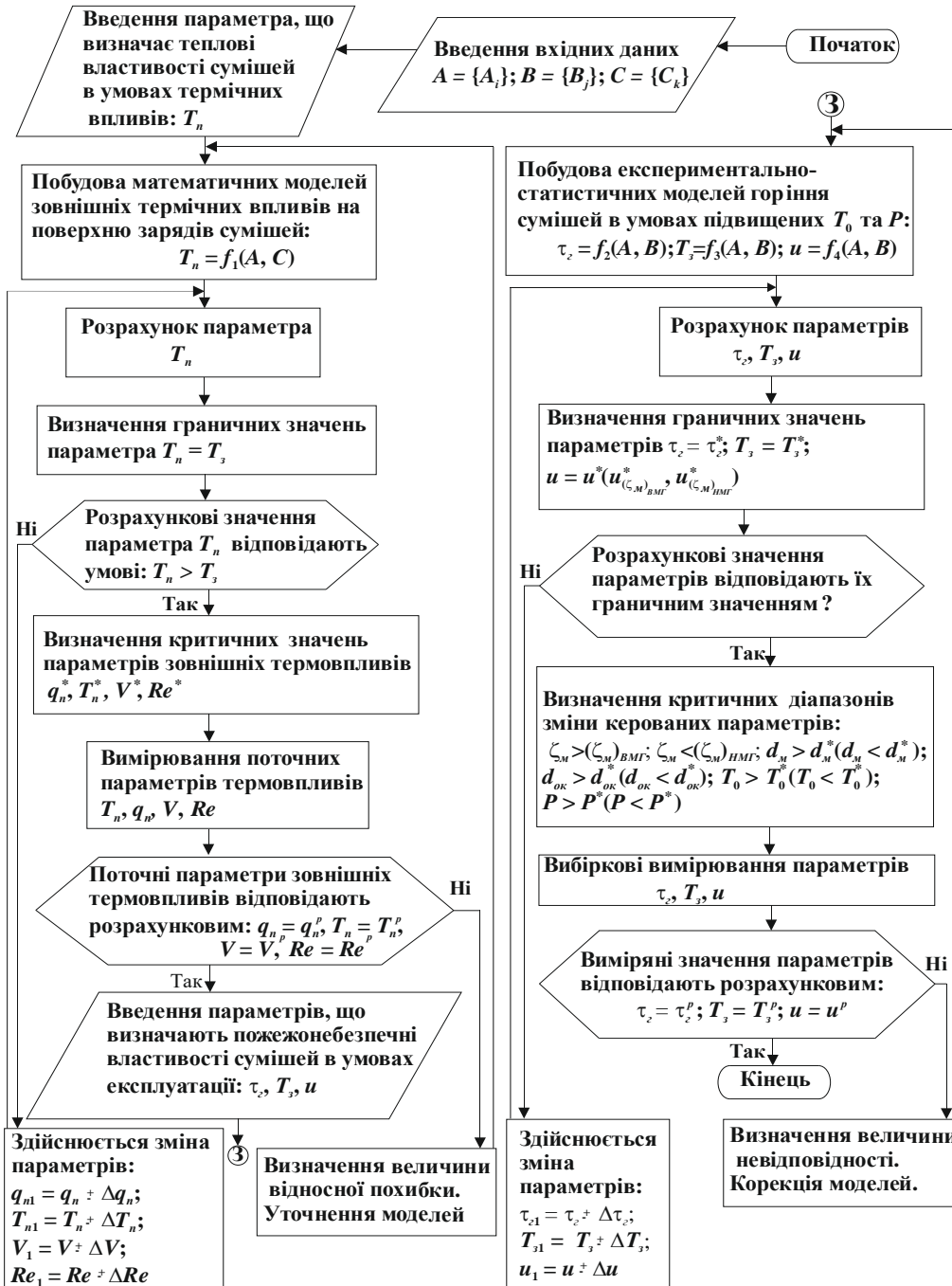


Рисунок 3 – Алгоритм визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій (теплових потоків та часів їх дії, швидкостей обдуву потоком повітря та критеріїв Рейнольдса) на піротехнічні вироби з зарядами сумішей, що дозволяє попереджати можливі передчасні їх спрацювання та пожежонебезпечні руйнування у процесі експлуатації: *A* – параметри зовнішніх термічних дій; *B* – керовані технологічні параметри сумішей; *C* – механічні, теплофізичні та фізико-хімічні характеристики зарядів сумішей

Результати досліджень. Для запобігання займання та подальшого пожежонебезпечного руйнування піротехнічних виробів з зарядами досліджуваних сумішей в умовах зовнішнього термічного впливу необхідним є запобігання утворенню у горючому середовищі осередків екзотермічного окиснення частинок магнію та алюмінію в продуктах розкладання оксидів металів. Останнє забезпечується зниженням горючості сумішей, що досягається шляхом варіювання їх технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення, розмірів заряду) [20].

Для оцінки рівня пожежної безпеки виробів в умовах зовнішньої термічної дії (див. ДСТУ 8829:2019 п. 3. Розрахунок вірогідності появи джерела запалювання (ініціювання горіння та вибуху [4])) розраховується вірогідність W появи джерела запалювання у піротехнічному виробі, яке призводить до передчасного горіння заряду суміші виробу. Враховується, що при експлуатації піротехнічних виробів неможливо передбачити умови виникнення зовнішніх термічних дій на їх поверхню, які можуть призвести до появи у заряді сумішей осередків екзотермічного окиснення частинок металу в продуктах розкладання оксидів металів. Тому згідно з ДСТУ 8829:2019 [4] для розрахунку W використовується вираз

$$W=1-e^{-t/\tau}, \quad (1)$$

де t – час зберігання (транспортування) піротехнічного виробу, год; $\tau = 3,03 \cdot 10^4 \cdot E_0^{1,2}$ – середній час зберігання (транспортування) до появи джерела запалювання, год; E_0 – мінімальна енергія запалювання суміші (утворення осередків екзотермічного окиснення), Дж. Величину E_0 можна визначити як мінімальну енергію, необхідну для нагріву об'єму реакційної зони k -фази заряду від початкової температури (T_0 , К) до температури займання частинок металевого пального у продуктах розкладання оксидів металів (T_3 , К) в умовах зовнішнього термовпливу [18]:

$$E_0 = \rho_c \cdot c_c \cdot V_c \cdot (T_3 - T_0), \quad (2)$$

де ρ_c , c_c – густина (кг/м³) та питома теплоємність (Дж/кг·К) суміші; V_c – об'єм реакційної зони k -фази суміші, в якій відбувається термічне розкладання оксиду металу, окиснення та спалахування частинок металевого пального, м³.

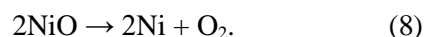
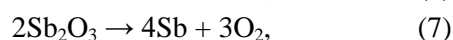
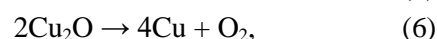
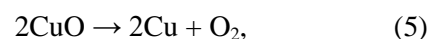
Оскільки заряд має діаметр d та висоту h , а товщина реакційної зони k -фази становить δ , у першому наближенні можна вважати [19]

$$V_c \approx 0,5 \pi \cdot d \cdot h \cdot \delta. \quad (3)$$

Підставляючи (3) у (2), отримуємо

$$E_0 \approx \rho_c \cdot c_c \cdot 0,5 \pi \cdot d \cdot h \cdot \delta \cdot (T_3 - T_0). \quad (4)$$

Для знаходження T_3 скористаємося результатами, отриманими у роботах [19, 20]. Для використання цих даних враховано, що при температурах T_p , які відповідають реакційній зоні k -фази ($T_p = 1400 \dots 1800$ К) досліджувані окиснювачі розкладаються згідно з реакціями [18, 19]:



Молекулярні маси хімічних елементів, що входять у (5)–(8): $\mu_{\text{CuO}} = 79,54$, $\mu_{\text{Cu}} = 63,54$, $\mu_{\text{O}_2} = 32$, $\mu_{\text{Cu}_2\text{O}} = 143,08$, $\mu_{\text{Sb}_2\text{O}_3} = 291,52$, $\mu_{\text{Sb}} = 121,76$, $\mu_{\text{NiO}} = 74,71$, $\mu_{\text{Ni}} = 58,71$. Тоді відносні масові вмісти O_2 у продуктах розкладання окиснювачів: $C_{\text{O}_2} \approx 0,11$ (окиснювач Sb_2O_3); $C_{\text{O}_2} \approx 0,14$ (окиснювач Cu_2O); $C_{\text{O}_2} \approx 0,21$ (окиснювач NiO); $C_{\text{O}_2} \approx 0,25$ (окиснювач CuO). Враховуючи також, що розглядається початковий період займання частинок магнію та алюмінію (зовнішній тиск $P = 10^5$ Па), отримуємо, що на величину T_3 найсильніше впливає дисперсність порошку металевого пального (рисунки 4, 5). Відносна похибка для кривих, що апроксимують експериментальні дані, становить 5...7 %.

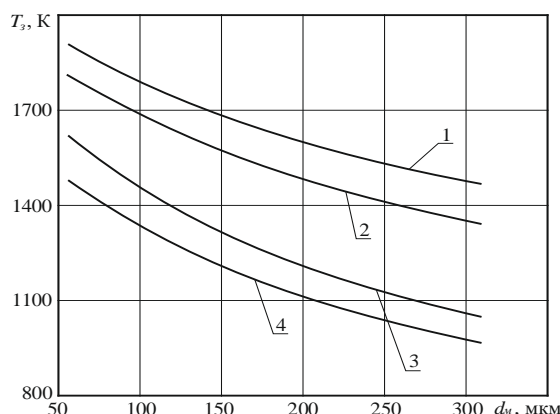


Рисунок 4 – Залежності температури T_3 від середнього розміру частинок порошку магнію та природи окиснювача ($P = 10^5$ Па): 1 – суміш $\text{Mg} + \text{Sb}_2\text{O}_3$; 2 – суміш $\text{Mg} + \text{Cu}_2\text{O}$; 3 – суміш $\text{Mg} + \text{NiO}$; 4 – суміш $\text{Mg} + \text{CuO}$

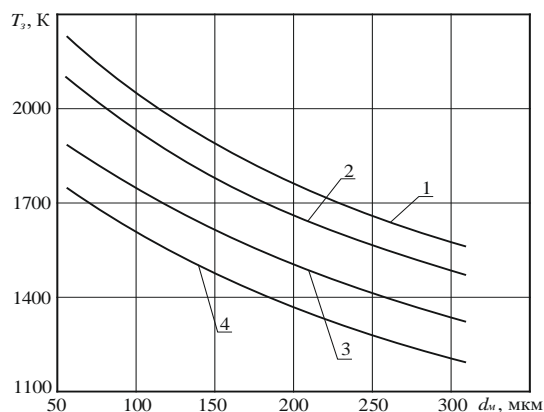


Рисунок 5 – Залежності температури T_3 від середнього розміру частинок порошку алюмінію та природи окиснювача ($P = 10^5$ Па): 1 – суміш $Al + Sb_2O_3$; 2 – суміш $Al + Cu_2O$; 3 – суміш $Al + NiO$; 4 – суміш $Al + CuO$

Обговорення результатів. З результатів, зображених на рисунках 4, 5, випливає, що для досліджуваних діапазонів зміни середніх розмірів частинок порошку металевого пального ($d_m = 56...305$ мкм – для магнію та $d_m = 4...310$ мкм – для алюмінію) збільшення d_m призводить до зменшення T_3 : для сумішей магній + оксиди металів – у 1,3...1,5 разу; для сумішей алюміній + оксиди металів – у 1,4...1,6 разу. Це пояснюється тим, що зі збільшенням d_m значно зростає площа поверхні ($\sim d_m^2$), на якій відбуваються гетерогенні екзотермічні реакції окиснення, що призводить до займання частинок при більш низьких T_3 внаслідок швидкого їх нагріву. Заміна кисневмісного окиснювача на окиснювач, при термічному розкладанні якого вміст кисню зменшується (наприклад, при заміні CuO на Cu_2O значення C_{O_2} зменшуються у 2,3 разу), призводить до збільшення T_3 у 1,3...1,4 разу (див.

рисунки 4, 5). Таким чином, використання дрібнодисперсних порошоків магнію та алюмінію, а також оксидів металів зі зменшеним вмістом кисню у їх продуктах розкладання на стадії виготовлення зарядів досліджуваних сумішей дозволить зменшити передчасне ініціювання зарядів сумішей в умовах зовнішнього термовпливу, тобто підвищити пожежну безпеку піротехнічних виробів.

Для кількісної оцінки сказаного вище розрахуємо вірогідність W ініціювання заряду досліджуваної суміші при термічному впливі, тобто вірогідність пожежонебезпечного руйнування піротехнічних виробів.

Розраховуючи за формулами (1)–(4) та використовуючи дані, зображені на рисунках 4, 5 на прикладі чотирьох стехіометричних зарядів сумішей (таблиця 1), з урахуванням відомих даних ($T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па; $h = 3 \cdot 10^{-2}$ м; $d = 2 \cdot 10^{-2}$ м; $\delta = 10^{-5}...10^{-6}$ м; $t = 8,76 \cdot 10^3$ год [18]), отримуємо, що вірогідність W зі збільшенням d_m суттєво збільшується (рисунки 6, 7): для виробу 1 – у 4,1 разу; для виробу 2 – у 3,5 разу; для виробу 3 – у 2,8 разу; для виробу 4 – у 2,2 разу.

Таким чином, шляхом зміни дисперсності порошоків металевого пального, що використовуються в зарядах досліджуваних сумішей, можна підвищувати пожежну безпеку піротехнічних виробів на їх основі в умовах зовнішніх термічних впливів більше, ніж у 2...3 рази.

Крім цього, замінюючи один оксид металу на інший, що має менший вміст вільного кисню (наприклад, заміна CuO на Cu_2O), також можна підвищити пожежну безпеку піротехнічних виробів у 1,5...1,8 разу.

Таблиця 1 – Перелік серійних піротехнічних виробів з досліджуваними зарядами сумішей, для яких розраховувалась вірогідність W згідно з ДСТУ 8829:2019 [4]

№ з/п	Призначення	Склад заряду суміші	Відносний масовий вміст компонентів у суміші, %
1	Піротехнічні спалахувачі для освітлювальних патронів та снарядів	Mg	21
		CuO	79
2	Піротехнічні спалахувачі для сигнальних засобів	Mg	31
		Cu ₂ O	69
3	Піротехнічні спалахувачі для трасерів білого вогню	Al	27
		CuO	73
4	Піротехнічні запалювальні вироби	Al	75
		Cu ₂ O	25

Примітка. Технологічні параметри зарядів сумішей: $K_V = 0,95...0,96$; $d_m = 54...310$ мкм; $d_{ок} = 30...50$ мкм; $h = 3 \cdot 10^{-2}...4 \cdot 10^{-2}$ м; $d = 1,5 \cdot 10^{-2}...2 \cdot 10^{-2}$ м

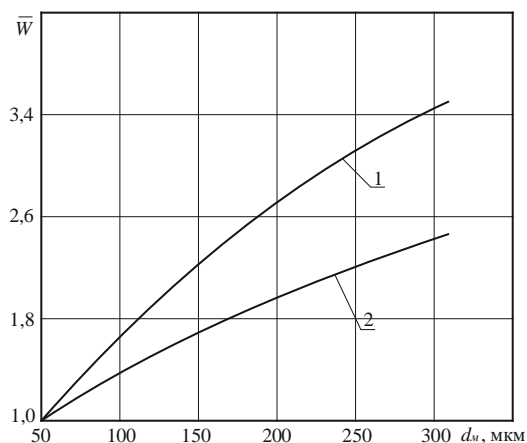


Рисунок 6 – Залежність відносної вірогідності \bar{W} ($\bar{W} = \frac{W}{W_{Mg}^*}$, де W_{Mg}^* – значення вірогідності для мінімального розміру частинок порошків магнію з використовуваних на практиці діапазонів його зміни [18, 19]) пожежонебезпечного руйнування піротехнічних виробів на основі сумішей магній + оксиди металів від дисперсності порошку металевого пального: 1 – вироби на основі сумішей Mg + CuO; 2 – вироби на основі сумішей Mg + Cu₂O (див. таблицю 1)

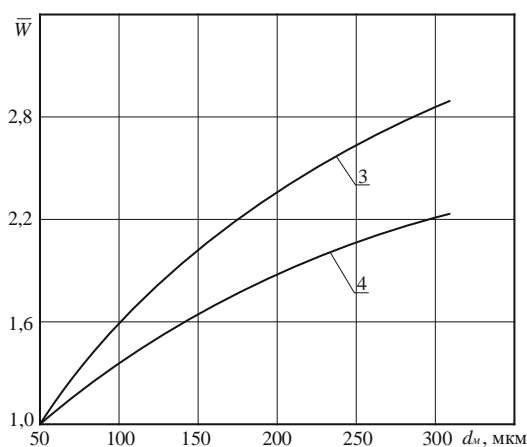


Рисунок 7 – Залежність відносної вірогідності \bar{W} ($\bar{W} = \frac{W}{W_{Al}^*}$, де W_{Al}^* – значення вірогідності для мінімального розміру частинок порошків алюмінію з використовуваних на практиці діапазонів його зміни [18, 19]) пожежонебезпечного руйнування піротехнічних виробів на основі сумішей алюміній + оксиди металів від дисперсності порошку металевого пального: 3 – вироби на основі сумішей Al + CuO; 4 – вироби на основі сумішей Al + Cu₂O (див. таблицю 1)

Висновки:

1. Сформовано спеціалізований програмний комплекс, що дозволяє в автоматизованому режимі вирішувати типові інженерно-технологічні задачі пожежної безпеки різних піротехнічних сумішей.

2. Розроблено нову науково обґрунтовану методику, що базується на отриманих математичних, експериментально-статистичних моделях та спеціалізованому програмному комплексі, яка дає можливість створювати базу даних по критичних діапазонах зміни параметрів зовнішніх термічних впливів та керованих технологічних параметрах зарядів сумішей, перевищення яких призводить до пожежонебезпечних руйнувань виробів.

3. Показано, що практичне використання розробленої методики у вигляді засобів контролю та технологічних рекомендацій дозволяє знижувати пожежну небезпеку піротехнічних виробів (освітлювальних, сигнальних, трасувальних патронів та снарядів, запалювальних засобів тощо) в умовах зовнішніх термічних дій у 2...3 рази.

Перспективи подальших досліджень.

Перспективним напрямом є подальше практичне застосування отриманих результатів, що полягає у розробці та впровадженні:

- науково обґрунтованої методики визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів і технологічних характеристик зарядів піротехнічних сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів, перевищення яких призводить до їх передчасного спрацьовування та пожежонебезпечного руйнування виробів;

- засобів контролю і технологічних рекомендацій, що дозволяють знизити вірогідність пожежонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів при зберіганні та транспортуванні з урахуванням зовнішніх термічних впливів у 2...3 рази.

Список використаних джерел

- [1] V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, and O. L. Mirus, "Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5 (95), pp. 68-76, 2018.

- [2] В. М. Фатєєв, Ю. П. Приходько, та Л. І. Таборов, *Піротехніка*. Київ, Україна: Наукова думка, 2017.
- [3] ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. Чинний від 01.01.2020. Київ: ДП УкрНДНЦ, 2019.
- [4] ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. Чинний від 01.01.2020. Київ: ДП УкрНДНЦ, 2019.
- [5] В. М. Баланюк, Н. М. Козяр, та О. І. Гарасим'юк, "Застосування газоаерозольно-порошкових вогнегасних сумішей для захисту від запалювальних сумішей", *Science Rise*, № 2 (22), с. 11-14, 2016.
- [6] В. М. Марич, В. В. Ковалишин, та Я. Б. Кирилів, "Оптимізація складу вогнегасних порошків для гасіння магнію", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*. Черкаси, 2018.
- [7] В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Т. М. Войтович, та Б. М. Гусар, "Використання екологічно прийнятних вогнегасних речовин", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи*. ДУБЖД, 2018.
- [8] В. М. Марич, В. В. Ковалишин, та Я. Б. Кирилів, "Дослідження хімічних речовин як складників вогнегасних порошків для гасіння магнію та його сплавів", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*. Черкаси, 2017.
- [9] Дослідження тенденцій і закономірностей динаміки основних показників статистики пожеж в Україні за територіальним принципом: звіт про наук.-дослідну роботу. Київ: УкрНДНЦ, 2018.
- [10] O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, and V. Melnyk, "Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions", *Technology audit and production reserves*, no. 1/1 (51), pp. 44-49, 2020.
- [11] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, Т. І. Бутенко, та В. В. Цибулін, "Визначення критичних режимів розвитку процесів горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 123-133, 2020.
- [12] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, and S. O. Kolinko, "Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels", *Scientific Bulletin Civil Protection and Fire Safety*, no. 2 (8), pp. 81-85, 2019.
- [13] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, С. О. Тищенко, та В. В. Цибулін, "Визначення допустимих режимів нагріву піротехнічних сумішей при їх експлуатації", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 5-11, 2018.
- [14] О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, та В. А. Ващенко, "Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій", *Internauka*, № 5/5799, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.inter-nauka.com>.
- [15] О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, та В. А. Ващенко, "Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій", *Internauka*, № 5/5798, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.inter-nauka.com>.
- [16] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, та Р. Б. Мотрічук, "Вплив технологічних параметрів на залежності швидкості розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей", на *XI Міжнар. наук.-практ. конф. "Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій"*. Черкаси: Черкас. ін-т пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля, 2020.
- [17] Р. Б. Мотрічук, О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, Т. І. Бутенко, Є. П. Кириченко, та В. В. Цибулін, "Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру та склад продуктів згорання піротехнічних нітратно-металевих сумішей", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 131-142, 2020.
- [18] Є. П. Кириченко, В. М. Гвоздь, В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, О. О. Дядюшенко, та В. П. Мельник, "Закономірності

- впливу технологічних параметрів і зовнішніх чинників на температуру займання та час згоряння частинок магнію та алюмінію в продуктах розкладання оксидів металів", *Цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (12), с. 112-122, 2021.
- [19] Є. П. Кириченко, "Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах пострілу та польоту", *Пожежна безпека: теорія і практика: зб. наук. пр. ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля*, т. 5, № 2, с. 87-102, 2021.
- [20] Є. П. Кириченко, В. В. Ковалишин, В. М. Гвоздь, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, та В. В. Цибулін, "Дослідження механізму та розробка моделі розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей металеве пальне+оксид металу при зовнішніх термічних діях", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 68-82, 2021.
- ### References
- [1] V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskiy, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, and O. L. Mirus, "Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5 (95), pp. 68-76, 2018.
- [2] V. M. Fateev, Y. P. Prikhodko, and L. I. Taborov, *Pyrotechnics*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 2017 [in Ukrainian].
- [3] DSTU 8828:2019. Fire Security. Terms. Effective from 2020, Jan. 01. Kyiv: UkrNDNC, 2019 [in Ukrainian].
- [4] DSTU 8829:2019. Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indicators and methods of their definition. Classification. Effective from 2020, Jan. 01. Kyiv: UkrNDNC, 2019 [in Ukrainian].
- [5] V. M. Balanyuk, N. M. Kozyar, and O. I. Garasimiyuk, "Application of aerosol-powder fire-extinguishing mixtures for protection against incendiary mixtures", *Science Rise*, no. 2 (22), pp. 11-14, 2016 [in Ukrainian].
- [6] V. M. Marich, V. V. Kovalishin, and Ya. B. Kirillov, "Optimization of fire extinguishing powders for magnesium extinguishing", in *Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. Theory and practice of firefighting and emergency response*. Cherkasy, 2018 [in Ukrainian].
- [7] V. V. Kovalyshyn, V. M. Marich, T. M. Voitovych, and B. M. Husar, "Use of environmentally friendly fire extinguishers", in *Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. Environmental security as a basis for sustainable development of society. European experience and prospects*. DUBZD, 2018 [in Ukrainian].
- [8] V. M. Marich, V. V. Kovalyshyn, and Ya. B. Kirillov, "Investigation of chemicals as components of fire-extinguishing powders for extinguishing magnesium and its alloys", in *Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. Theory and practice of firefighting and emergency response*. Cherkasy, 2017 [in Ukrainian].
- [9] Study of trends and patterns of dynamics of the main indicators of fire statistics in Ukraine on a territorial basis: Report on research work. Kyiv: UkrNDICZ, 2018 [in Ukrainian].
- [10] O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, and V. Melnyk, "Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions", *Technology audit and production reserves*, no. 1/1 (51), pp. 44-49, 2020.
- [11] O. V. Kirichenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, T. I. Butenko, and V. V. Tsybulin, "Determination of critical modes of development of combustion processes of pyrotechnic nitrate-metal mixtures in the conditions of external thermal actions", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, no. 2, pp. 123-133, 2020 [in Ukrainian].
- [12] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, and S. O. Kolinko, "Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels", *Scientific Bulletin Civil Protection and Fire Safety*, no. 2 (8), pp. 81-85, 2019.
- [13] O. V. Kirichenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, E. O. Tishchenko, and V. V. Tsybulin, "Determination of permissible modes of heating of pyrotechnic mixtures during their operation", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, no. 2, pp. 5-11, 2018 [in Ukrainian].
- [14] O. S. Dibrova, O. V. Kirichenko, R. B. Motrichuk, and V. A. Vashchenko, "Improving

- fire safety of pyrotechnic nitrate-metal mixtures in the conditions of external thermal actions", *Intenauka*, no. 5/5799, 2020. [Online]. Available: <http://www.intenauka.com> [in Ukrainian].
- [15] O. S. Dibrova, O. V. Kirichenko, R. B. Motrichuk, and V. A. Vashchenko, "Regularities of influence of technological parameters on fire safety of pyrotechnic nitrate-titanium mixtures in the conditions of external thermal actions", *Intenauka*, no. 5/5798, 2020. [Online]. Available: <http://www.intenauka.com> [in Ukrainian].
- [16] O. V. Kirichenko, O. S. Dibrova, and R. B. Motrichuk, "Influence of technological parameters on the dependences of the rate of development of the combustion process of pyrotechnic mixtures", in *Proc. XI Int. Sci.-Pract. Conf. Theory and practice of firefighting and emergency response*. Cherkasy: Cherkas. in-t pozhezhnoyi bezpeky im. Heroyiv Chornobylya, 2020 [in Ukrainian].
- [17] R. B. Motrichuk, O. V. Kirichenko, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, T. I. Butenko, E. P. Kirichenko, and V. V. Tsybulin, "Regularities of influence of technological parameters and external factors on temperature and composition of combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 4, pp. 131-142, 2020 [in Ukrainian].
- [18] E. P. Kirichenko, V. M. Gvozd, V. A. Vashchenko, O. V. Kirichenko, O. O. Dyadyushenko, and V. P. Melnik, "Regularities of the influence of technological parameters and external factors on the ignition temperature and combustion time of magnesium and aluminum particles in the decomposition products of metal oxides", *Tsyvilnyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, no. 2 (12), pp. 112-122, 2021 [in Ukrainian].
- [19] E. P. Kirichenko, "Research of processes of external thermal shock actions on pyrotechnic metal oxide products in the conditions of a shot and flight", *Pozhezhna bezpeka: teoriya i praktyka*: coll. of sci. papers of Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes, vol. 5, no. 2, pp. 87-102, 2021 [in Ukrainian].
- [20] E. P. Kirichenko, V. V. Kovalishin, V. M. Gvozd, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, and V. V. Tsybulin, "Research of the mechanism and development of the model of development of burning process of pyrotechnic mixes metal fuel + metal oxide at external thermal actions", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 4, pp. 68-82, 2021 [in Ukrainian].

E. P. Kirichenko

Cherkasy Institute of Fire Safety,
Onoprienko st., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

TECHNIQUE FOR DETERMINATION OF CRITICAL VALUES OF PARAMETERS OF EXTERNAL THERMAL ACTIONS ON PYROTECHNICAL METAL OXIDE PRODUCTS IN OPERATING CONDITIONS

Ignition and subsequent fire and explosion destruction of products are preceded by external thermal actions to which they are exposed. This leads to premature ignition and explosive development of combustion of mixtures that are part of the products, and their subsequent flammable destruction. Therefore, techniques of prevention of forced premature fire-hazardous destruction of products in case of external thermal actions are of practical importance. They should be based on scientifically sound methods for determining critical values of thermal effects on products and technological parameters of mixtures, exceeding which leads to premature fire-hazardous destruction of products.

The aim of the work is to develop a technique for determining the critical values of external thermal influences and controlled technological parameters of mixtures, which lead to premature ignition and explosive combustion of pyrotechnic mixtures of magnesium, aluminum and metal oxides, and ultimately to flammable destruction of products.

A specialized software package of four standard packages of applications is formed. It consists of 80 individual software modules on modern numerical methods (nonlinear thermal conductivity

and diffusion, thermo-gas dynamics, chemical kinetics, mathematical processing of experimental data, etc.), which are focused on the personal computer that allows to solve in the mode of dialogue and real time typical engineering and technological problems of fire safety of various pyrotechnic mixtures.

A new scientifically sound technique based on the obtained mathematical, experimental and statistical models and specialized software in the form of four standard application packages has been developed. It allows in dialogue and real-time modes on the PC to form the necessary for practical use database of critical ranges of changes in the parameters of external thermal actions and controlled technological parameters of charges of mixtures, exceeding which leads to flammable destruction of products.

It is shown that practical use of the developed technique in the form of means of control and technological recommendations allows to increase fire safety of pyrotechnic products (lighting, signal, tracer cartridges and shells, incendiary means, etc.) in the conditions of external thermal actions in 2... 3 times.

Keywords: fire safety, pyrotechnic mixtures, ignition and combustion processes, powders of metal fuels and metal oxides.

Стаття надійшла 19.05.2022

Прийнято 18.06.2022