

УДК 614.841:536.46

[0000-0001-9082-0771] **Н. М. Козяр**, канд. техн. наук,  
e-mail: nazarkozyar@ukr.net

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

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ЗОВНІШНІХ ЧИННИКІВ НА ШВИДКІСТЬ ТА ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНІ РЕЖИМИ ГОРІННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ НІТРАТНО-МЕТАЛІЗОВАНИХ СУМІШЕЙ З ДОБАВКАМИ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН

Проведено експериментальні дослідження з визначення закономірностей впливу технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів) і зовнішніх умов (підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків) на швидкість і вибухонебезпечні режими горіння ущільнених сумішей із порошків металевих палив (магнію, алюмінію), нітратовмісного окиснювача (нітрату натрію) та добавок органічних речовин, що використовуються у піротехнічному виробництві (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, метальдегіду, каніфолі, ідитолу). В результаті проведених експериментальних досліджень впливу основних параметрів зовнішніх термодій (температури нагріву, зовнішні тиски) для використовуваних на практиці діапазонів зміни технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача, відносного вмісту добавки органічних речовини, дисперсності металевого пального) на швидкість та режими горіння сумішей встановлено концентраційні межі горіння. За ступенем зменшення швидкості та стабілізації процесу горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій (підвищені температури нагріву та зовнішні тиски) добавки органічних речовин можна розташувати у такий ряд: ідитол > каніфоль > антрацен > уротропін > стеарин > метальдегід > нафталін > парафін. На практиці отримані результати досліджень можуть бути використані на стадії виготовлення зарядів сумішей шляхом регулювання природи та величини добавок органічних речовин для зменшення їх чутливості до можливих термічних дій.

**Ключові слова:** пожежна безпека, піротехнічні суміші, процеси горіння, швидкість горіння, органічні речовини, металеві палі.

**Вступ.** З кожним роком в Україні та в усьому світі зростає кількість пожеж і вибухів в умовах зберігання, транспортування та застосування піротехнічних виробів на основі багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей різного призначення (освітлювальних, сигнальних і трасувальних засобів, спалахувальних і запалювальних патронів та снарядів, ІЧ-виробів, елементів ракетно-космічної техніки та ін.) [2, 12]. Аналіз зазначених випадків показує, що загорянню та подальшому пожежонебезпечному руйнуванню виробів, як правило, передують зовнішні термічні дії, яким вони піддаються (наприклад, при пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, в умовах їх транспортування при займанні близько розташованих об'єктів, а також в умовах термоударних впливів при їх запусках та ін.). Це призводить до передчасного займання та розвитку горіння зарядів сумішей, що входять до складу виробів, та подальших вибухонебезпечних руйнувань виробів з утворенням високотемператур-

них (до 3000...4000 К) продуктів (конденсовані продукти згоряння, уламки металевих корпусів виробів та ін.), що є пожежонебезпечними для навколишніх об'єктів (дерев'яні будови, паливно-мастильні матеріали, пускові установки з обслуговуючим персоналом та ін.). При цьому у багатьох випадках передчасні вибухонебезпечні спрацювання піротехнічних виробів мали катастрофічні наслідки, оскільки процес горіння піротехнічних зарядів, що почався, неможливо ефективно ліквідувати сучасними засобами пожежогасіння. Тому суттєвого практичного значення набуває запобігання можливим пожежовибухонебезпечним руйнуванням виробів у зазначених умовах. Для цього необхідно мати керовану базу даних зі швидкості розвитку горіння сумішей в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків, за допомогою якої можна оперативно визначати умови виникнення вибухонебезпечних режимів горіння сумішей при їх вимушеному спрацюванні.

Нині достатньо повно проведено дослідження процесів горіння двокомпонентних ущільнених сумішей з порошків металевих палих (Mg, Al, Ti, Zr, алюмінієво-магнієвих сплавів (ПАМ) та ін.) та нітратовмісних окиснювачів ( $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  та ін.) за різних зовнішніх умов [1-3, 13-17]: встановлено діапазони зміни технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача, дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення суміші, діаметра заряду суміші, матеріалу оболонки та ін.), в межах яких не спостерігається різкого збільшення швидкості горіння, а у низці випадків швидкість горіння може навіть зменшуватись, що стабілізує процес горіння сумішей, роблячи його більш стійким до зовнішніх термічних дій. Що стосується трьох та більше компонентних сумішей з технологічними добавками різних речовин, то сьогодні є лише кілька робіт [6, 7, 9] з впливу добавок органічних речовин на швидкість горіння двокомпонентних сумішей тільки за нормальних зовнішніх умов: встановлено перелік добавок, що зменшують швидкість і стабілізують процес горіння сумішей для різних значень їх технологічних параметрів; встановлено, що деякі добавки призводять до зростання швидкості горіння та роблять процес горіння більш чутливим до зовнішніх термічних дій. При цьому аналогічні дослідження з впливу низки практично важливих добавок органічних речовин (наприклад уротропіну, парафіну, стеарину, метальдегіду, каніфолі, ідитолу) на швидкість розвитку процесу горіння досліджуваних сумішей в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків, притаманних термічним впливам, відсутні.

**Мета та задачі досліджень.** *Мета роботи:* отримання бази даних з визначення закономірностей впливу добавок органічних речовин, що використовуються у піротехнічному виробництві, у склад двокомпонентних піротехнічних сумішей з порошків металевих палих (магнію, алюмінію) та нітратовмісного окиснювача (нітрату натрію) на швидкість розвитку процесу їх горіння в умовах підвищених температур нагріву (до 800 К) та зовнішніх тисків (до  $10^7$  Па).

Задачами досліджень є:

– визначення закономірностей впливу добавок органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, метальдегіду, каніфолі та ідитолу) у склад сумішей на залежності швидкості їх горіння від підвищених температур нагріву;

– визначення закономірностей впливу підвищених зовнішніх тисків на залежності швидкості горіння сумішей від вмісту у них зазначених добавок органічних речовин.

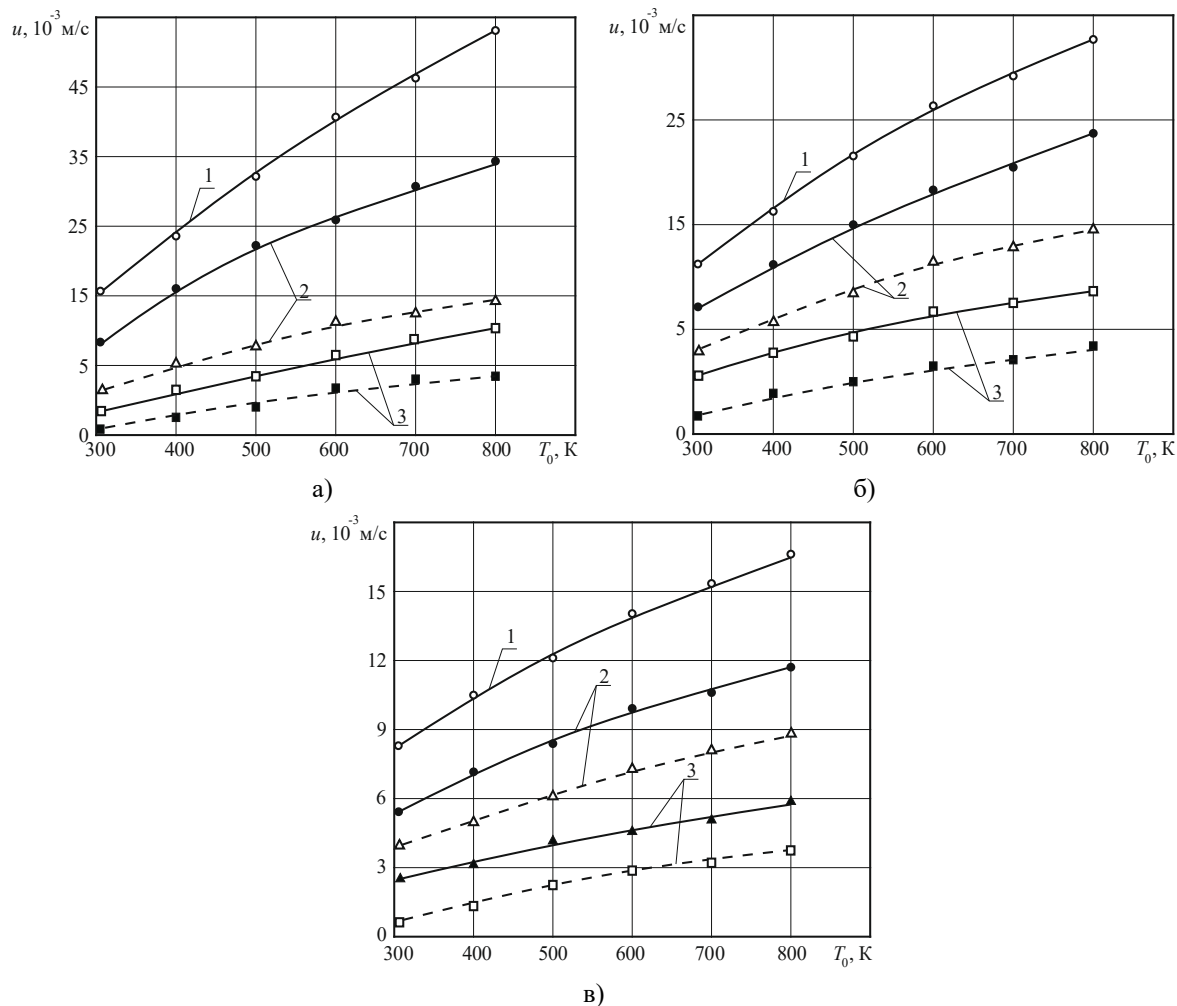
**Виклад основного матеріалу.** Зразки піротехнічних сумішей виготовлялись з використанням стандартних методів пресування порошків металевих палих (Mg, Al) та нітратовмісного окиснювача ( $\text{NaNO}_3$ ) з добавками органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, метальдегіду, каніфолі та ідитолу) [4, 5]. Для моделювання впливу основних параметрів зовнішніх термічних дій на виробу використовувалося стандартне піротехнічне обладнання, що дозволяє вимірювати швидкість розвитку горіння сумішей при підвищених температурах нагріву (до 800 К) і зовнішніх тисках (до  $10^7$  Па) [4, 6]. Середнє значення швидкості горіння сумішей визначалося за прийнятою у піротехніці формулою [7, 8]  $u = h/\tau$  ( $h$  – висота зразка, м;  $\tau$  – середній час згорання зразка, с); при цьому відносна похибка вимірювання швидкості горіння сумішей не перевищувала 7...9%. Експериментальні криві будувалися з використанням сучасних методів регресійного та кореляційного аналізів [4]. Коефіцієнт ущільнення зразків сумішей становив  $K_y = 0,95...0,96$ , тобто зразки, які використовувались, мали гранично допустимі значення  $K_y$  та були фактично газонепроникними. Для дослідження впливу температури нагріву і зовнішнього тиску на швидкість горіння сумішей порошки компонентів запресовувались у металеві корпуси діаметром  $2 \cdot 10^{-2}$  м і товщиною оболонки  $2,5 \cdot 10^{-3}$  м. Для забезпечення стійких режимів горіння зразків сумішей висота запресувань у зазначеному діаметрі становила  $3...4 \cdot 10^{-2}$  м.

В результаті проведених експериментальних досліджень для робочих діапазонів зміни технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача  $\alpha$ , відносного вмісту органічних речовин  $\varepsilon$ , дисперсності (середнього розміру частинок порошків металевого пального  $d_m$  (мкм) та окиснювача  $d_{ок}$  (мкм)) компонентів) та зовнішніх чинників (температури нагріву  $T_0$  (К), зовнішнього тиску  $P$  (Па)) для сумішей були визначені їх концентраційні межі горіння  $\alpha_{ВМГ}$  та  $\alpha_{НМГ}$  ( $\alpha_{ВМГ}$  – верхня концентраційна межа горіння (максимально припустимий вміст металевого пального в суміші, при якому процес горіння ще має стійкий характер),  $\alpha_{НМГ}$  – нижня концентраційна межа горіння (максимальний вміст

окиснювача в суміші, при якому процес горіння ще не затухає)): для сумішей магній + нітрат натрію + органічна добавка –  $\alpha_{ВМГ} = 0,2...0,3$  та  $\alpha_{НМГ} = 3,0...3,2$ ; для сумішей алюміній + нітрат натрію + органічна добавка –  $\alpha_{ВМГ} = 0,25...0,35$  та  $\alpha_{НМГ} = 1,5...1,6$ .

**Результати досліджень.** З метою дослідження загального характеру поведінки залежностей  $u(T_0, P)$  для сумішей при

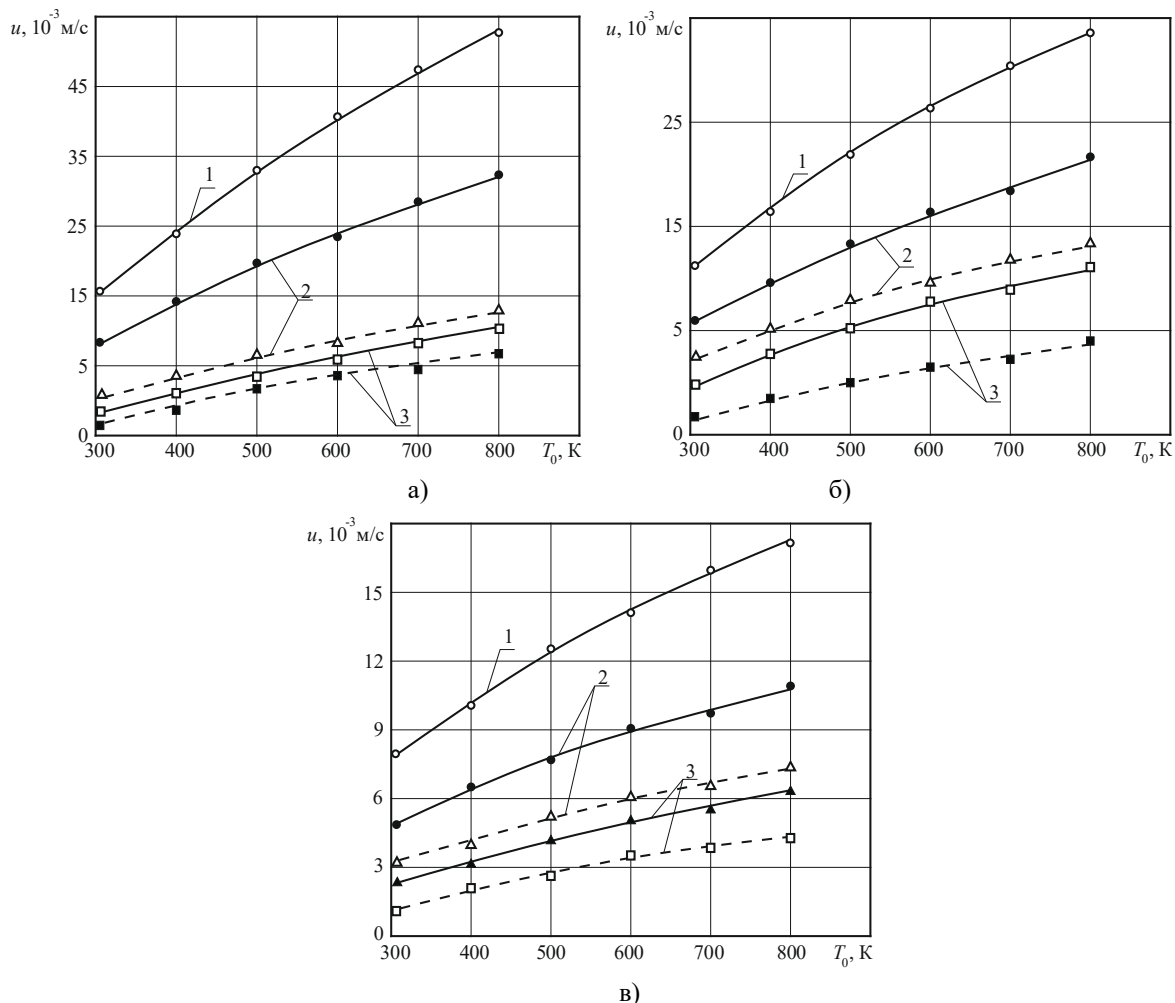
досліджуваних значеннях технологічних параметрів і зовнішніх чинників зазначені залежності досліджувалися в діапазоні зміни  $\alpha$ :  $\alpha_{ВМГ} < \alpha < \alpha_{НМГ}$  (рисунки 1-9). Це було обумовлено тим, що на практиці суміші зі значеннями  $\alpha$ , які близькі до  $\alpha_{ВМГ}$  або  $\alpha_{НМГ}$ , не застосовують через їх явну нестабільність в умовах зовнішніх термодій.



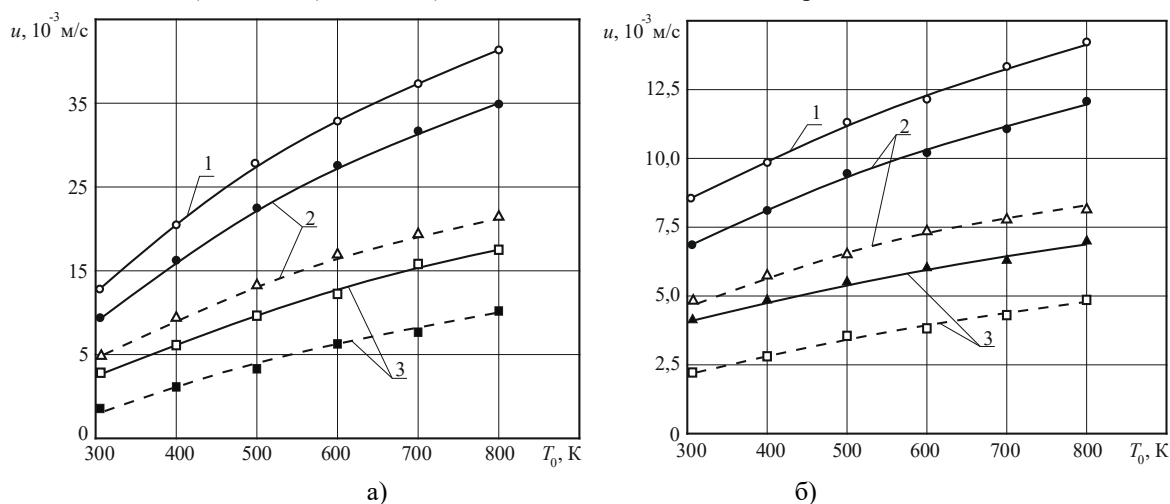
**Рисунок 1.** Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача  $\alpha$  на залежність швидкості горіння сумішей  $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$  з добавками парафіну (2) та стеарину (3) від температури нагріву ( $d_m = 74,5$  мкм,  $d_{ок} = 106$  мкм,  $P = 10^5$  Па): 1 – суміш без добавки; — — —  $\varepsilon = 0,05$ ; - - - -  $\varepsilon = 0,20$ ; а)  $\alpha = 0,5$ ; б)  $\alpha = 1,0$ ; в)  $\alpha = 1,6$ ;  $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle, \blacksquare$  – експериментальні дані

**Обговорення результатів.** Для сумішей  $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$  + органічна добавка з даних, представлених на рисунках 1-5, впливає, що збільшення  $T_0$  від 293 К до 800 К призводить до зростання швидкості горіння в 1,7...3,8 разу; при цьому зі зростанням  $T_0$  залежність  $u(T_0)$  підсилюється в 1,3...1,6 разу. Крім цього, збільшення коефіцієнта надлишку окиснювача призводить до зменшення швидкості горіння та помітного послаблення залежності  $u(T_0)$ : зростання  $\alpha$  від 0,5 до 2,5 призводить до

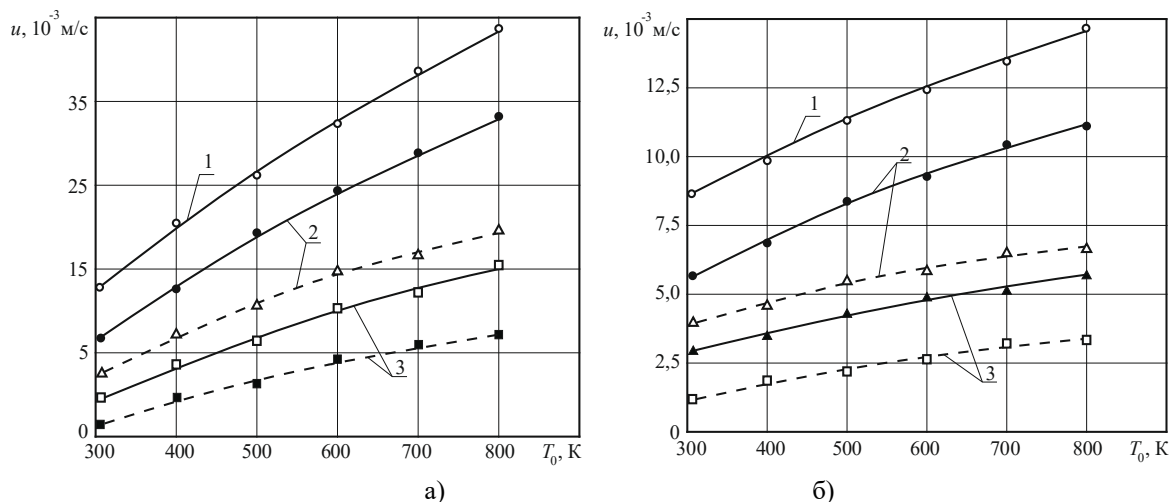
послаблення залежності  $u(T_0)$  у 2,1...2,3 разу. Зменшення дисперсності порошку металевого пального призводить до зростання швидкості горіння та зменшення величини швидкості горіння у 3,8...4,2 разу та підсилення залежності  $u(T_0)$ : зменшення значень  $d_m$  від 305 мкм до 74,5 мкм призводить до збільшення швидкості горіння в 1,9...2,8 разу та підсилення залежності  $u(T_0)$  в 1,2...1,9 разу. Для дослідженого діапазону  $0,5 < \alpha < 2,5$  величина  $d_{ок}$  не впливає на залежність  $u(T_0)$ .



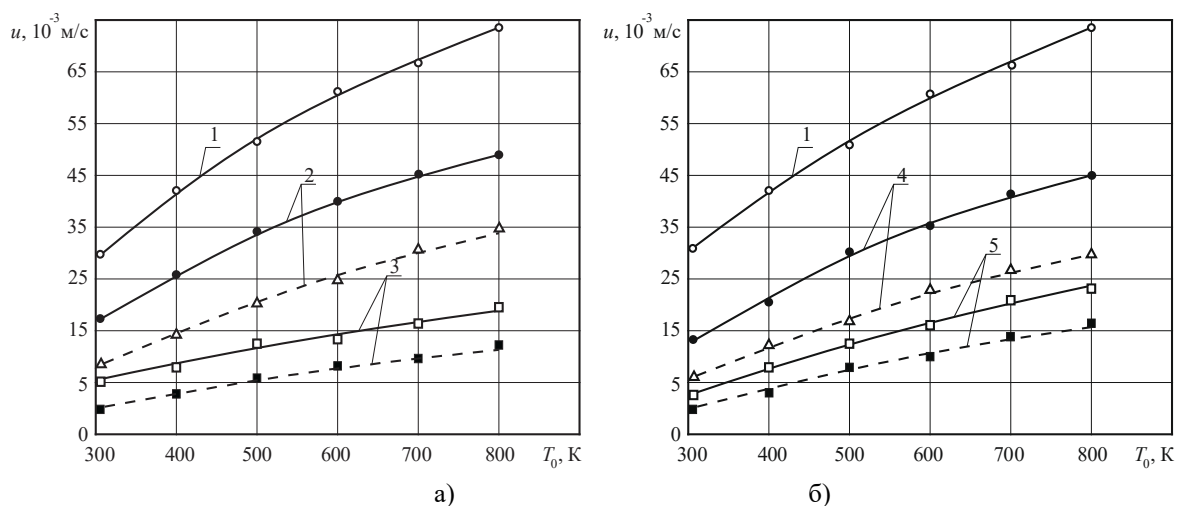
**Рисунок 2.** Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача  $\alpha$  на залежність швидкості горіння сумішей  $Mg + NaNO_3$  з добавками уротропіну (2) та метальдегіду (3) від температури нагріву ( $d_M = 74,5$  мкм,  $d_{ок} = 106$  мкм,  $P = 10^5$  Па): 1 – суміш без добавки; — —  $\varepsilon = 0,02$ ; - - - -  $\varepsilon = 0,10$ ;  
 а)  $\alpha = 0,5$ ; б)  $\alpha = 1,0$ ; в)  $\alpha = 1,6$ ;  $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle, \blacksquare$  – експериментальні дані



**Рисунок 3.** Вплив дисперсності порошку металевого пального на залежність швидкості горіння сумішей  $Mg + NaNO_3$  з добавками нафталіну (2) та антрацену (3) від температури нагріву ( $\alpha = 1,0$ ;  $d_{ок} = 106$  мкм,  $P = 10^5$  Па): 1 – суміш без добавки; — —  $\varepsilon = 0,05$ ; - - - -  $\varepsilon = 0,20$ ;  
 а)  $d_M = 74,5$  мкм; б)  $d_M = 182$  мкм;  $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle, \blacksquare$  – експериментальні дані



**Рисунок 4.** Вплив дисперсності порошку металевого пального на залежність швидкості горіння сумішей  $Mg + NaNO_3$  з добавками каніфолі (2) та ідитолу (3) від температури нагріву ( $\alpha = 1,0$ ;  $d_{ок} = 106$  мкм,  $P = 10^5$  Па): 1 – суміш без добавки; —  $\varepsilon = 0,02$ ; - - -  $\varepsilon = 0,10$ ; а)  $d_m = 74,5$  мкм; б)  $d_m = 182$  мкм;  $\circ$ ,  $\bullet$ ,  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$  – експериментальні дані



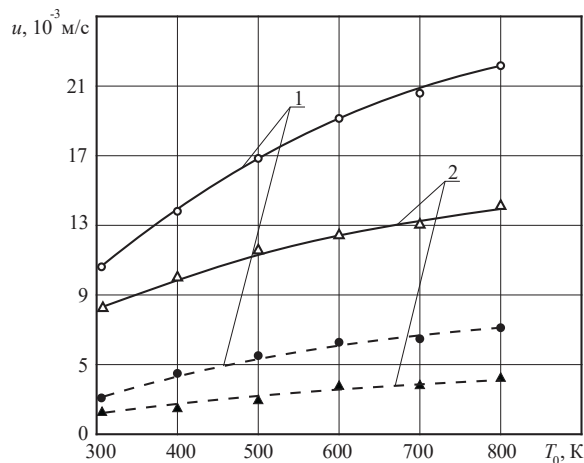
**Рисунок 5.** Вплив зовнішнього тиску на залежність швидкості горіння сумішей  $Mg + NaNO_3$  з добавками органічних речовин від температури нагріву ( $\alpha = 1,0$ ;  $d_{ок} = 106$  мкм,  $d_m = 74,5$  мкм,  $P = 10^7$  Па): 1 – суміш без добавки; —  $\varepsilon = 0,05$ ; - - -  $\varepsilon = 0,20$ ; а) суміш з добавками парафіну (2) та стеарину (3); б) суміш з добавками уротропіну (4) та метальдегіду (5);  $\circ$ ,  $\bullet$ ,  $\Delta$ ,  $\blacksquare$  – експериментальні дані

Збільшення зовнішнього тиску призводить до значного зростання швидкості горіння та підсилення залежності  $u(T_0)$  для усіх досліджуваних діапазонів зміни  $\alpha$  та  $d_m$ ; зміна зовнішнього тиску від  $10^5$  Па до  $10^7$  Па призводить до збільшення швидкості горіння у 2,7...3,1 разу та підсилення залежності  $u(T_0)$  в 1,8...2,3 разу. Введення в суміш добавок органічних речовин у кількості до  $\varepsilon = 0,20$  (для парафіну, стеарину, нафталану, антрацену) та  $\varepsilon = 0,10$  (для уротропіну, метальдегіду, каніфолі, ідитолу) призводить до значного змен-

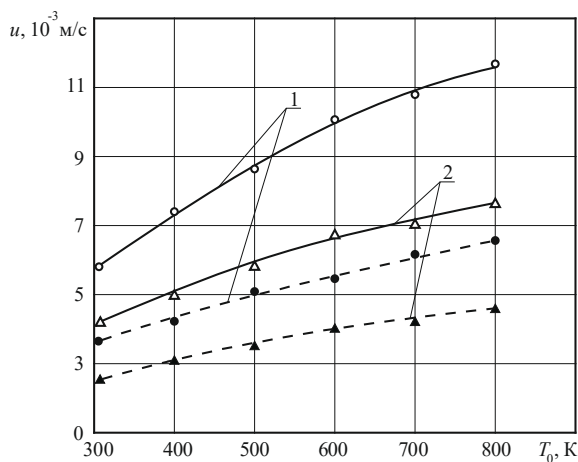
шення швидкості і послаблення залежності  $u(T_0)$ : у 5,5 разу для добавки ідитолу, у 3,9 разу для добавки каніфолі, у 3,2 разу для добавки антрацену, у 2,7 разу для добавки уротропіну, в 1,9 разу для добавки стеарину, в 1,5 разу для добавки метальдегіду, в 1,3 разу для добавки нафталіну та в 1,2 разу для добавки парафіну, а також до послаблення залежності  $u(T_0)$  для усіх досліджуваних добавок – в 1,3...1,4 разу.

Для сумішей  $Al + NaNO_3 +$  органічна добавка результати проведених досліджень

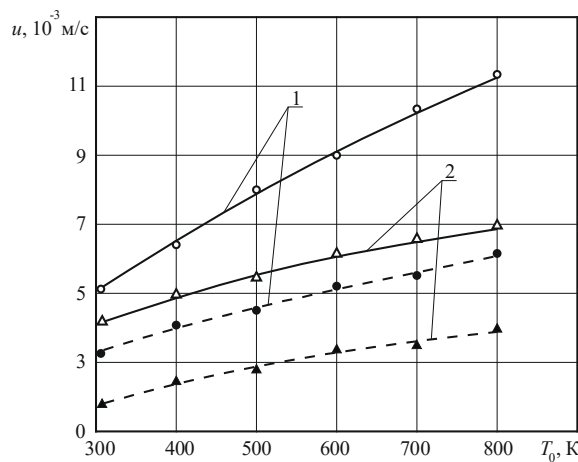
показують, що характер впливу коефіцієнта надлишку окиснювача, дисперсності компонентів, зовнішнього тиску та величини добавки на залежність  $u(T_0)$  такий же, як і для досліджених вище сумішей. На рисунках 6-9 представлено експериментальні дані, які кількісно найбільш суттєво відрізняються від аналогічних даних для зазначених вище сумішей. З цих даних випливає, що при збільшенні  $T_0$  від 293 К до 800 К швидкість горіння зростає в 1,5...2,7 разу; при цьому вплив  $\alpha$  на характер залежності  $u(T_0)$  при зростанні  $T_0$  виявляється менш суттєвим (приблизно в 1,6...2,1 разу), ніж для попередніх сумішей. Зменшення дисперсності порошку металевого пального також призводить до зменшення швидкості горіння та послаблення залежності  $u(T_0)$ , але вже меншою мірою: збільшення значень  $d_m$  від 56 мкм до 306 мкм призводить до зменшення швидкості горіння у 2,3...2,5 разу та послаблення залежності  $u(T_0)$  в 1,4...1,7 разу. Дисперсність окиснювача в межах досліджених діапазонів зміни величини  $\alpha$  також не впливає на залежність  $u(T_0)$ .



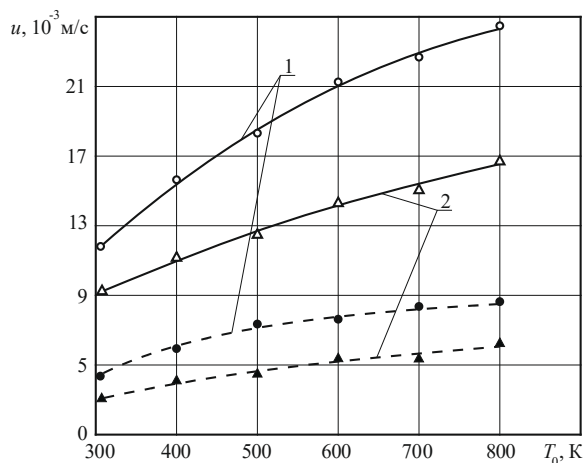
**Рисунок 7. Вплив добавок стеарину на залежність швидкості горіння сумішей Al + NaNO<sub>3</sub> від температури нагріву ( $\alpha = 1,0$ ,  $d_{ок} = 106$  мкм,  $P = 10^7$  Па):**  
 1 –  $d_m = 56$  мкм;  
 2 –  $d_m = 179$  мкм;  
 — суміш без добавки;  
 - - -  $\varepsilon = 0,10$ ;  
 ○, ●, Δ, ▲ – експериментальні дані



**Рисунок 6. Вплив добавок парафіну на залежність швидкості горіння сумішей Al + NaNO<sub>3</sub> від температури нагріву ( $\alpha = 1,0$ ,  $d_{ок} = 106$  мкм,  $P = 10^5$  Па):**  
 1 –  $d_m = 56$  мкм;  
 2 –  $d_m = 179$  мкм;  
 — суміш без добавки;  
 - - -  $\varepsilon = 0,20$ ;  
 ○, ●, Δ, ▲ – експериментальні дані



**Рисунок 8. Вплив добавок уротропіну на залежність швидкості горіння сумішей Al + NaNO<sub>3</sub> від температури нагріву ( $\alpha = 1,0$ ,  $d_{ок} = 106$  мкм,  $P = 10^5$  Па):**  
 1 –  $d_m = 56$  мкм;  
 2 –  $d_m = 179$  мкм;  
 — суміш без добавки;  
 - - -  $\varepsilon = 0,10$ ;  
 ○, ●, Δ, ▲ – експериментальні дані



**Рисунок 9.** Вплив добавок металевих палив на залежність швидкості горіння сумішей  $Al + NaNO_3$  від температури нагріву ( $\alpha = 1,0, d_{ок} = 106 \text{ мкм}, P = 10^7 \text{ Па}$ ):

1 –  $d_m = 56 \text{ мкм}$ ;

2 –  $d_m = 179 \text{ мкм}$ ;

— – суміш без добавки;

----  $\varepsilon = 0,10$ ;

○, ●, Δ, ▲ – експериментальні дані

Збільшення зовнішнього тиску призводить вже до меншого зростання швидкості горіння та підсилення залежності  $u(T_0)$  для досліджуваних значень  $\alpha$  та  $d_m$ : зростання зовнішнього тиску від  $10^5 \text{ Па}$  до  $10^7 \text{ Па}$  призводить до збільшення швидкості горіння в 1,7...2,5 рази та підсилення залежності  $u(T_0)$  в 1,7...1,9 рази. Введення у суміш органічних добавок у кількості до  $\varepsilon = 0,20$  (для парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену) та  $\varepsilon = 0,10$  (для уротропіну, металевих палив, каніфолі, ідиолу) призводить до зменшення швидкості горіння в 1,1...3,2 рази та послаблення залежності  $u(T_0)$  в 1,15...1,2 рази: наприклад, зростання величини добавки від  $\varepsilon = 0,05$  до  $\varepsilon = 0,20$  призводить до зниження швидкості горіння у 2,9 рази для добавки антрацену, в 1,7 рази для добавки стеарину, в 1,2 рази для добавки нафталіну та в 1,1 рази для добавки парафіну; зростання величини добавки від  $\varepsilon = 0,02$  до  $\varepsilon = 0,10$  призводить до зниження швидкості горіння у 5,2 рази для добавки ідиолу, у 3,4 рази для добавки каніфолі, у 2,5 рази для добавки уротропіну та в 1,3 рази для добавки металевих палив.

Таким чином, за ступенем зменшення швидкості та стабілізації процесу горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій (підвищені температури нагріву та зовнішні тиски) добавки органічних речовин можна

розташувати у такий ряд: ідиол > каніфоль > антрацен > уротропін > стеарин > металеві палива > нафталін > парафін.

На практиці отримані результати досліджень можуть бути використані на стадії виготовлення зарядів сумішей шляхом регулювання природи та величини добавок органічних речовин для зменшення їх чутливості до можливих термічних дій при зберіганні, транспортуванні та застосуванні піротехнічних виробів на їх основі.

#### Висновки:

1. В результаті проведених експериментальних досліджень впливу основних параметрів зовнішніх термодій (температури нагріву  $T_0$  – до 800 К, зовнішні тиски  $P$  – до  $10^7 \text{ Па}$ ) для використовуваних на практиці діапазонів зміни технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача  $\alpha$ , відносного вмісту добавки органічних речовин  $\varepsilon$ , дисперсності металевих палив  $d_m$  (мкм)) на швидкість та режими горіння сумішей встановлено концентраційні межі горіння ( $\alpha_{ВМГ}$  (верхня концентраційна межа горіння (максимально допустимий вміст металевих палив у суміші, при якому процес горіння ще має стійкий, не вибухонебезпечний характер)) та  $\alpha_{НМГ}$  (нижня концентраційна межа горіння (максимальний вміст окиснювача у суміші, при якому процес горіння ще стабільний без різкого затухання)): для сумішей  $Mg + NaNO_3 +$  органічна добавка  $\alpha_{ВМГ} = 0,2...0,3$  та  $\alpha_{НМГ} = 3,0...3,2$ ; для сумішей  $Al + NaNO_3 +$  органічна добавка  $\alpha_{ВМГ} = 0,25...0,35$  та  $\alpha_{НМГ} = 1,5...1,6$ .

2. Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити, що зростання  $T_0$  від 293 К до 800 К призводить до збільшення швидкості горіння сумішей в 1,5...3,8 рази та підсилення залежності  $u(T_0)$  в 1,3...1,6 рази; при цьому збільшення вмісту окиснювача від  $\alpha = 0,5$  до  $\alpha = 2,5$  призводить до зменшення швидкості горіння в 1,7...4,2 рази та послаблення залежності  $u(T_0)$  в 1,7...2,3 рази. Отримано, що зменшення середнього розміру частинок металевих палив призводить до збільшення швидкості горіння в 1,9...2,8 рази та підсилення залежності  $u(T_0)$  в 1,7...2,5 рази. Встановлено, що збільшення зовнішнього тиску призводить до зростання швидкості горіння в 1,8...3,1 рази та підсилення залежності  $u(T_0)$  в 1,8...2,3 рази. Отримано, що введення у суміш добавок парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, ідиолу, каніфолі, уро-

тропіну та метальдегіду у кількості  $\varepsilon = 0,02 \dots 0,20$  призводить до зменшення швидкості горіння в 1,2...5,5 разу та послаблення залежності  $u(T_0)$  в 1,15...1,4 разу.

3. З отриманих експериментальних даних випливає, що за ступенем зменшення швидкості та стабілізації процесу горіння в умовах зовнішніх термічних дій (підвищені температури нагріву та зовнішні тиски) піротехнічні нітратно-металізовані суміші можна розташувати у такі ряди залежно від природи металевого пального та добавки органічної речовини:  $Al + NaNO_3 + \text{органічна добавка} < Mg + NaNO_3 + \text{органічна добавка}; \text{металеве пальне} + NaNO_3 + \text{парафін} < \text{металеве пальне} + NaNO_3 + \text{нафталін} < \text{металеве пальне} + NaNO_3 + \text{метальдегід} < \text{металеве пальне} + NaNO_3 + \text{стеарин} < \text{металеве пальне} + NaNO_3 + \text{уротропін} < \text{металеве пальне} + NaNO_3 + \text{антрацен} < \text{металеве пальне} + NaNO_3 + \text{каніфоль} < \text{металеве пальне} + NaNO_3 + \text{ідитол}.$

#### Перспективи подальших досліджень.

Надалі планується проведення досліджень з визначення закономірностей впливу параметрів зовнішніх термічних дій (підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків) на швидкість і вибухонебезпечні режими горіння піротехнічних нітратно-металізованих сумішей з добавками неорганічних речовин (фторидів металів ( $LiF, NaF, NiF_2, BaF_2, SiF_2$ ) та оксидів металів ( $CuO, Cu_2O, Sb_2O_3, NiO$ )).

#### Список використаних джерел

- [1] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, О. С. Барановський, та В. В. Цибулін, "Визначення вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згорання піротехнічних нітратно-металевих сумішей при підвищених зовнішніх тисках", *Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр.*, вип. 19, с. 323-332, 2018.
- [2] 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.
- [3] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, та В. В. Цибулін, "Дослідження впливу міцності зарядів піротехнічних нітратно-металевих сумішей на пожежну безпеку виробів на їх основі", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, с. 56-67, 2019.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Є. Кириченко, "Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металоксидні вироби в умовах пострілу та польоту", *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України "Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація"*, т. 5, № 2, с. 37-51, 2021.
- [7] 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.
- [8] Є. Кириченко, В. Гвоздь, В. Ващенко, О. Кириченко, О. Дядюшенко, та В. Мельник, "Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру займання та час згорання частинок магнію та алюмінію в продуктах розкладання оксидів металів", *Цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (12), с. 111-121, 2021.
- [9] Є. Кириченко, "Дослідження процесів займання та розвитку горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів при підвищених температурах нагріву та зовнішніх тисках", *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національ-*



- ного університету цивільного захисту України "Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація", т. 6, № 1, с. 29-42, 2022.
- [10] Є. Кириченко, В. Гвоздь, В. Ващенко, О. Кириченко, та О. Дядюшенко, "Попередження передчасного спрацьовування піротехнічних виробів на основі сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів в умовах зовнішніх термічних дій", *Цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (12), с. 122-130, 2022.
- [11] Є. П. Кириченко, "Методика визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах експлуатації", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 53-63, 2022.
- [12] В. М. Фатєєв, Ю. П. Приходько, та Л. І. Таборов, *Піротехніка*. Київ: Наук. думка, 2017.
- [13] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrychuk, 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.
- [14] "Дослідження тенденцій і закономірностей динаміки основних показників статистики пожеж в Україні за територіальним принципом": звіт про наук.-досл. роботу. Київ: УкрНДІЦЗ, 2018.
- [15] 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>
- [16] 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. [Online]. Available: <http://www.inter-nauka.com>
- [17] 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 пожеж. безпеки ім. Героїв Чорнобиля, 2020.

## References

- [1] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrychuk, O. C. Baanovsky, and V. V. Tsybulin, "Determination of the content of high-temperature condensate in the combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures at elevated external pressures", *Nauka ta vyrobnytstvo: interuniv. thematic coll. of sci. papers*, iss. 19, pp. 323-332, 2018 [in Ukrainian].
- [2] 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.
- [3] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrychuk, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, and V. V. Tsybulin, "Study of the influence of the strength of charges of pyrotechnic nitrate-metal mixtures on the fire safety of products based on them", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 3, pp. 56-67, 2019 [in Ukrainian].
- [4] 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.
- [5] R. B. Motrychuk, O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, T. I. Butenko, Y. P. Kyrychenko, 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].
- [6] Ye. Kyrychenko, "Study of the processes of external thermal shock effects on pyrotechnic metal oxide products under the conditions of a shot and flight", *Zbirnyk naukovykh prats Cherkaskoho instytutu pozhehzhnoyi bezpeky im. Heroyiv*

- Chornobylyia Natsionalnoho universytetu tsyvilnoho zakhystu Ukrainy "Nadzvychnyi sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya"*, vol. 5, no. 2, pp. 37-51, 2021 [in Ukrainian].
- [7] Ye. P. Kyrychenko, V. V. Kovalyshyn, V. M. Gvozd, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinco, and V. V. Tsybulin, "Study of the mechanism and development of a model of the development of the combustion process of pyrotechnic mixtures of metal fuel + metal oxide under external thermal effects", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 4, pp. 68-82, 2021 [in Ukrainian].
- [8] Ye. Kyrychenko, V. Gvozd, V. Vashchenko, O. Kyrychenko, O. Dyadushenko, and V. Melnyk, "Patterns of 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. 111-121, 2021 [in Ukrainian].
- [9] Ye. Kyrychenko, "Investigation of ignition processes and the development of combustion of two-component pyrotechnic mixtures made of magnesium, aluminum and metal oxide powders at elevated heating temperatures and external pressures", *Zbirnyk naukovykh prats Cherkaskoho instytutu pozhezhnoyi bezpeky im. Heroyiv Chornobylyia Natsionalnoho universytetu tsyvilnoho zakhystu Ukrainy "Nadzvychnyi sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya"*, vol. 6, no. 1, pp. 29-42, 2022 [in Ukrainian].
- [10] Ye. Kyrychenko, V. Gvozd, V. Vashchenko, O. Kyrychenko, and O. Dyadushenko, "Prevention of premature triggering of pyrotechnic products based on mixtures of magnesium, aluminum powders and metal oxides under conditions of external thermal effects", *Tsyvilnyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, no. 2 (12), pp. 122-130, 2022 [in Ukrainian].
- [11] Ye. P. Kyrychenko, "Methodology for determining the critical values of the parameters of external thermal effects on pyrotechnic metal oxide products under operating conditions", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 2, pp. 53-63, 2022 [in Ukrainian].
- [12] V. M. Fateev, Yu. P. Prikhodko, and L. I. Taborov, *Pyrotechnics*. Kyiv: Nauk. dumka, 2017 [in Ukrainian].
- [13] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, and S. O. Kolinco, "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.
- [14] "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].
- [15] O. S. Dibrova, O. V. Kyrychenko, R. B. Motrichuk, and V. A. Vashchenko, "Improvement of fire safety of pyrotechnic nitrate-metal mixtures in the conditions of external thermal actions", *Internauka*, no. 5/5799, 2020. [Online]. Available: <http://www.inter-nauka.com> [in Ukrainian].
- [16] O. S. Dibrova, O. V. Kyrychenko, 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", *Internauka*, no. 5/5798, 2020. [Online]. Available: <http://www.inter-nauka.com> [in Ukrainian].
- [17] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, and R. B. Motrichuk, "Influence of technological parameters on the dependence of the rate of development of the combustion process of pyrotechnic mixtures", in *Proc. XI Int. Sci. and Pract. Conf. Theory and practice of extinguishing fires and eliminating emergency situations*, Cherkasy: Cherkas. in-t pozhezh. bezpeky im. Heroyiv Chornobylyia, 2020 [in Ukrainian].

N. M. Kozyar, *Cand. Tech. Sc.*

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl  
of the National University of Civil Defense of Ukraine  
Onoprienko st., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

## REGULARITIES OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS AND EXTERNAL FACTORS ON THE SPEED AND EXPLOSIVELY UNSAFE COMBUSTION MODES OF PYROTECHNIC NITRATE-METALLIZED MIXTURES WITH ADDITIVES OF ORGANIC SUBSTANCES

*Prevention of possible fire-explosive destruction of products in the conditions of external thermal actions is of significant practical importance. For this, it is necessary to have a controlled database on the rate of development of combustion of mixtures under conditions of elevated heating temperatures and external pressures, with the help of which it is possible to quickly determine the conditions for the occurrence of explosive modes of combustion of mixtures during their forced activation.*

*There are no studies on the effect of a number of practically important additives of organic substances (for example, urotropin, paraffin, stearin, metaldehyde, rosin, iditol) on the rate of development of the combustion process of mixtures under conditions of elevated heating temperatures and external pressures inherent in thermal effects.*

*The purpose of the work is to obtain a database for determining the regularities of the influence of additives of organic substances used in pyrotechnic production in the composition of two-component pyrotechnic mixtures of metal fuel powders (magnesium, aluminum) and a nitrate-containing oxidizer (sodium nitrate) on the rate of development of the process of their combustion under conditions of increased heating temperatures (up to 800 K) and external pressures (up to  $10^7$  Pa).*

*Experimental studies have been conducted to determine the regularities of influence of technological parameters (ratio and dispersion of components) and external conditions (elevated heating temperatures and external pressures) on the speed and explosive modes of combustion of compacted mixtures of metal fuel powders (magnesium, aluminum), nitrate-containing oxidizer (sodium nitrate) and additives of organic substances used in pyrotechnic production (paraffin, stearin, naphthalene, anthracene, urotropine, metaldehyde, rosin, iditol). As a result of experimental studies of the influence of the main parameters of external thermal actions (heating temperatures, external pressures) for the ranges of changes in technological parameters used in practice (coefficient of excess oxidant, relative content of organic matter additive, dispersion of metallic fuel) on the rate and modes of combustion of mixtures, concentration limits of combustion are established. The conducted experimental studies make it possible to establish that an increase in  $T_0$  from 293 K to 800 K leads to an increase in the burning rate of mixtures by 1,5...3,8 times and a strengthening of the  $u(T_0)$  dependence by 1,3...1,6 times; an increase in the oxidant content from  $\alpha = 0,5$  to  $\alpha = 2,5$  leads to a decrease in the burning rate by 1,7...4,2 times and a weakening of the  $u(T_0)$  dependence by 1,7...2,3 times; a decrease in the average size of metal fuel particles leads to an increase in the burning rate by 1,9...2,8 times and a strengthening of the  $u(T_0)$  dependence by 1,7...2,5 times; an increase in external pressure leads to an increase in the burning rate by 1,8...3,1 times and a strengthening of the  $u(T_0)$  dependence by 1,8...2,3 times. According to the degree of reduction in the speed and stabilization of the combustion process of mixtures under conditions of external thermal effects (increased heating temperatures and external pressures), additives of organic substances can be arranged in the following series: iditol > rosin > anthracene > urotropin > stearin > metaldehyde > naphthalene > paraffin. In practice, the obtained research results can be used at the stage of manufacturing of mixture charges by adjusting the nature and amount of organic substance additives to reduce their sensitivity to possible thermal effects.*

**Keywords:** fire safety, pyrotechnic mixtures, combustion processes, burning speed, organic substances, metallic fuels.

Стаття надійшла 27.03.2023

Прийнято 05.04.2023