

УДК 614.841:536.46

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1.29-42>

*Євгеній Кириченко (ORCID: 0000-0001-7638-0722)*

*Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАЙМАННЯ ТА РОЗВИТКУ ГОРІННЯ ДВОКОМПОНЕНТНИХ ПІРОТЕХНІЧНИХ СУМІШЕЙ З ПОРОШКІВ МАГНІЮ, АЛЮМІНІЮ ТА ОКСИДІВ МЕТАЛІВ ПРИ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ НАГРІВУ ТА ЗОВНІШНІХ ТИСКАХ**

*Проведено експериментальні дослідження та розроблено експериментально-статистичні моделі комплексного впливу технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів, природи металевого пального та окиснювача) та зовнішніх умов (температури та тиску навколишнього середовища) на швидкість та концентраційні межі горіння двокомпонентних ущільнених сумішей з порошків магнію та алюмінію з оксидами металів.*

***Ключові слова:** піротехнічні суміші, пожежна безпека, процеси займання та горіння піротехнічних металовмісних сумішей.*

**Постановка проблеми.** Нині в народному господарстві та військовій техніці широко використовуються піротехнічні вироби різного призначення (спалахувальні та запалювальні засоби, освітлювальні та трасувальні патрони та снаряди, елементи ракетно-космічної техніки тощо) на основі механічно ущільнених сумішей порошків металевих палих (магнію, алюмінію, титану, цирконію та ін.) та кисневмісних окиснювачів (нітратів лужних та лужноземельних металів та ін.) [1 – 7]. Вказані суміші, як й інші піротехнічні суміші, при практичному використанні часто піддаються різним зовнішнім термовпливам (наприклад, при пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються піротехнічні вироби, в умовах їх пострілу та польоту, коли металеві корпуси виробів піддаються ударним термовпливам в умовах їх надзвукового обдуву потоком повітря тощо), що призводить до передчасного спрацьовування зарядів сумішей та розвитку процесу їх горіння в умовах замкненого об'єму при зростанні температури нагріву та зовнішнього тиску [8 – 15]. В результаті відбувається руйнування піротехнічних виробів з утворенням високотемпературних продуктів згорання, які розлітаються у різні боки та мають пожежну небезпеку для навколишніх об'єктів.

Для попередження вказаних передчасних пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів необхідно мати керовану базу даних з розвитку горіння сумішей, і, в першу чергу, по їх швидкостям горіння в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків, за допомогою якої оперативно прогнозувати умови виникнення вибухонебезпечних режимів горіння сумішей при їх вимушеному спрацьовуванні.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** На даний момент найбільш докладно досліджено процеси горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей (ущільнених сумішей з порошків металевих палих (Mg, Al, Ti, Zr та ін.) та нітратовмісних окиснювачів (NaNO<sub>3</sub>, KNO<sub>3</sub>, Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> та ін.) у вказаних зовнішніх умовах [16 – 27]. Було встановлено закономірності впливу технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення суміші, величини та природи добавки органічних речовин, діаметра заряду суміші та ін.) на залежності швидкості горіння сумішей від підвищених температур нагріву (до 800 K) та зовнішніх тисків (до 10<sup>7</sup> Па) [16 – 20]. Розроблено моделі їх горіння у цих умовах для визначення критичних параметрів зовнішніх термічних дій, перевищення яких призводить до вибухового розвитку горіння сумішей та пожежонебезпечного руйнування виробів [21 – 24].

На базі проведених досліджень було розроблено методи попередження вказаних руйнувань виробів шляхом регулювання технологічних параметрів на стадії виготовлення сумішей, що дозволяє збільшувати часи спрацьовування виробів у екстремальних умовах експлуатації [25 – 27].

**Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття.** Що стосується піротехнічних сумішей з порошків металевих пальних та оксидів металів, що розглядаються, то нині аналогічні дослідження для них відсутні.

**Постановка задачі та її розв'язання.** Метою даної роботи є отримання бази даних по швидкостям горіння сумішей в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків для різних значень технологічних параметрів, яка дозволяє оцінювати її допустимі діапазони зміни.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів.** Для проведення досліджень використовувались стандартні у піротехніці методи фізико-хімічного аналізу та сучасні методи експериментально-статистичного моделювання [2 – 4, 6, 28, 29]. Для моделювання впливу основних параметрів зовнішніх термічних дій на металеві корпуси виробів використовувалось стандартне піротехнічне обладнання, що дозволяє вимірювати швидкість та межі горіння сумішей при підвищених температурах нагріву (до 1000 К) та зовнішніх тисках (до  $3 \cdot 10^7$  Па) з відносною похибкою 7...9 % [4, 6, 18].

Як зразки сумішей використовувались ущільнені двокомпонентні суміші з порошків металевих пальних (магнію, алюмінію) та оксидів металів (CuO, Cu<sub>2</sub>O, Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та NiO), які виготовлялись різними методами ущільненого формування, головним чином, пресуванням [3, 4, 6]. Щодо вивчення впливу дисперсності порошків металевих пальних та окиснювачів на процес горіння сумішей використовували стандартні порошки, які випускаються промисловістю [2, 4]. Коефіцієнт ущільнення для зразків складав 0,95...0,96, тобто зразки сумішей, які використовувались, мали гранично допустимі значення  $K_V$  та були фактично газонепроникними. Для дослідження впливу температури нагріву та зовнішнього тиску на швидкість та межі горіння сумішей порошки компонентів запресовувались у металеві корпуси з 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 вказаному діаметрі складала  $(3...4) \cdot 10^{-2}$  м.

Залежність швидкості горіння від технологічних параметрів. Велике практичне значення при виготовленні зарядів сумішей для піротехнічних виробів різного призначення, що розглядаються, мають діапазони зміни співвідношення компонентів у них (наприклад, відносний вміст металевого пального  $\xi_m$ ), де можуть здійснюватися стійкі невибухонебезпечні режими їх горіння (рис. 1, 2). При цьому межі цих діапазонів відповідають концентраційним межам горіння сумішей ( $(\xi_m)_{ВМГ}$  – верхня концентраційна межа горіння (надлишок металевого пального);  $(\xi_m)_{НМГ}$  – нижня концентраційна межа горіння (надлишок окиснювача)). Для таких сумішей значення вказаних меж горіння представлено у табл. 1, 2.

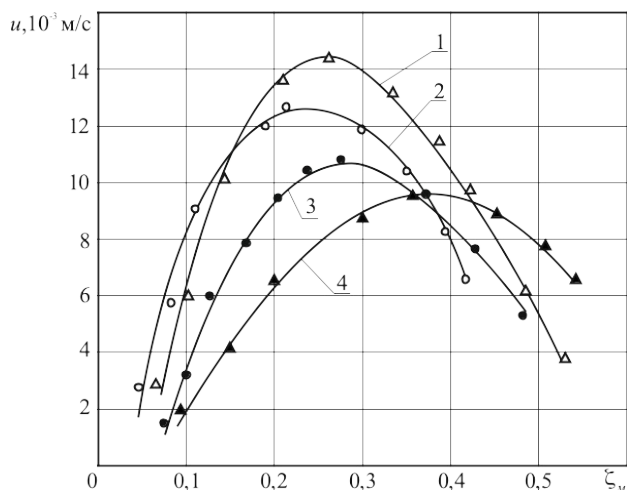


Рисунок 1 – Залежність швидкості горіння сумішей магній + оксиди металів від вмісту у них металевого пального ( $d_m = 100$  мкм;  $d_{ок} = 50$  мкм;  $T_0 = 293$  К;  $P = 10^5$  Па): 1 – Mg + Cu<sub>2</sub>O; 2 – Mg + Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3 – Mg + CuO; 4 – Mg + NiO; ○, ●, Δ, ▲ – експериментальні дані.

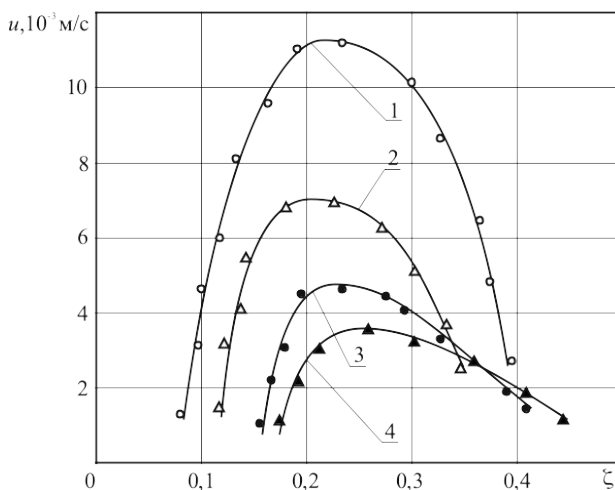


Рисунок 2 – Залежність швидкості горіння сумішей алюміній + оксиди металів від вмісту у них металевого пального ( $d_m = 150$  мкм;  $d_{ок} = 50$  мкм;  $T_0 = 293$  К;  $P = 10^5$  Па): 1 – Al + Cu<sub>2</sub>O; 2 – Al + Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3 – Al + CuO; 4 – Al + NiO; ○, ●, Δ, ▲ – експериментальні дані.

Таблиця 1 – Параметри меж горіння сумішей магній + оксиди металів

Оксиди	CuO	Cu <sub>2</sub> O	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO
Параметр				
$(\zeta_m)_{НМГ}$	0,06	0,07	0,04	0,09
$(\zeta_m)_{ВМГ}$	0,49	0,51	0,43	0,53
$u _{\zeta_m=НМГ}, 10^{-3}$ м/с	0,9	2,1	1,9	1,2
$u _{\zeta_m=ВМГ}, 10^{-3}$ м/с	4,8	3,5	7,2	6,3
$(\zeta_m)_{u_{max}}$	0,25	0,16	0,21	0,39
$u _{(\zeta_m)_{u_{max}}}, 10^{-3}$ м/с	11,2	14,3	12,3	8,7

Примітка. Прийнято наступні позначення:  $u|_{\zeta_m=НМГ}$ ,  $u|_{\zeta_m=ВМГ}$  – значення швидкості горіння сумішей відповідно на нижній та верхній межах горіння;  $(\zeta_m)_{u_{max}}$ ,  $u|_{(\zeta_m)_{u_{max}}}$  – значення відносного вмісту металевого пального у суміші, що відповідає максимальній швидкості горіння суміші  $u_{max}$ , та її значення відповідно ( $d_m = 100$  мкм;  $d_{ок} = 50$  мкм;  $T_0 = 293$  К;  $P = 10^5$  Па).

Таблиця 2 – Параметри меж горіння сумішей алюміній + оксиди металів

Оксиди	CuO	Cu <sub>2</sub> O	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO
Параметр				
$(\zeta_m)_{НМГ}$	0,15	0,09	0,12	0,17
$(\zeta_m)_{ВМГ}$	0,42	0,39	0,35	0,45
$u _{\zeta_m=НМГ}, 10^{-3}$ м/с	0,7	1,2	1,05	0,49
$u _{\zeta_m=ВМГ}, 10^{-3}$ м/с	1,8	2,4	2,7	1,5
$(\zeta_m)_{u_{max}}$	0,21	0,23	0,19	0,26
$u _{(\zeta_m)_{u_{max}}}, 10^{-3}$ м/с	4,6	11,8	6,9	3,8

Примітка. Розмір частинок металевого пального  $d_m = 150$  мкм; розмір частинок окиснювача  $d_{ок} = 50$  мкм;  $T_0 = 293$  К;  $P = 10^5$  Па.

З даних табл. 1, 2 випливає, що для сумішей Mg + оксиди металів стійке стабільне горіння спостерігається при зміні вмісту металевого пального у суміші  $0,04 < \zeta_m < 0,51$ , а для

сумішей Al + оксиди металів –  $0,15 < \xi_m < 0,35$ . При  $\xi_m > 0,51$  (для Mg) та при  $\xi_m > 0,35$  (для Al) процес горіння швидко прискорюється, стає нестійким та вибухонебезпечним, а при  $\xi_m < 0,04$  (для Mg) та при  $\xi_m < 0,15$  (для Al) процес горіння швидко затухає. Крім цього, значення швидкості горіння при співвідношеннях компонентів, які близькі до  $(\xi_m)_{ВМГ}$ , перевищують її значення при співвідношеннях компонентів, які близькі до  $(\xi_m)_{НМГ}$ , у 1,7...4,9 рази (для сумішей Mg + оксиди металів) та у 2,2...2,6 рази (для сумішей Al + оксиди металів). При цьому максимальна швидкість горіння сумішей  $u_{max}$  досягається при співвідношеннях компонентів  $(\xi_m)_{u_{max}}$ , значення яких змінюються у діапазонах:  $u_{max} = 8,7 \cdot 10^{-3} \dots 14,3 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $(\xi_m)_{u_{max}} = 0,13 \dots 0,39$  (для сумішей Mg + оксиди металів) та  $u_{max} = 3,8 \cdot 10^{-3} \dots 11,8 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $(\xi_m)_{u_{max}} = 0,19 \dots 0,26$  (для сумішей Al + оксиди металів). Також встановлено, що для усіх досліджуваних діапазонів зміни вмісту металевого пального у суміші швидкість горіння сумішей Mg + оксиди металів перевищує швидкість горіння сумішей Al + оксиди металів: для  $u|_{\xi_m=ВМГ} -$  у 1,7...4,9 рази; для  $u_{max} -$  у 1,5...2,3 рази; для  $u|_{\xi_m=НМГ} -$  у 1,3...2,4 рази.

Таким чином, незалежно від природи металевого пального та окиснювача, загальний екстремальний характер залежності  $u(\xi_m)$  зберігається. Разом з тим заміна одного металу на інший (або одного окиснювача на інший) приводить у ряді випадків до суттєвого зміщення положення максимуму на кривій  $u(\xi_m)$ . Наприклад, для сумішей Mg + оксиди металів заміна  $Cu_2O$  на  $NiO$  призводить до зміщення положення  $u_{max}$  у бік збільшення вмісту магнію у 2,4 рази, а для сумішей Al + оксиди металів заміна  $Sb_2O_3$  на  $NiO$  – у 1,7 рази. Крім цього, наприклад, для суміші Mg +  $Cu_2O$  заміна магнію на алюміній також призводить до збільшення величини  $(\xi_m)_{u_{max}}$  у 1,5 рази.

Залежність швидкості горіння сумішей від температури нагріву ( $u(T_0)$ ). При дослідженні залежностей  $u(T_0)$  найбільш докладно були розглянуті ущільнені суміші Mg +  $CuO$ , Mg +  $NiO$ , Al +  $CuO$  та Al +  $NiO$ , які нині найбільш широко використовуються у сумішах для піротехнічних виробів різного призначення.

Суміш Mg +  $CuO$ . З даних, представлених на рис. 3 – 6 випливає, що збільшення  $T_0$  від 300 К до 1000 К призводить до зростання швидкості горіння у 1,5...3,6 рази; при цьому із зростанням  $T_0$  залежність  $u(T_0)$  підсилюється у 1,3...1,7 рази. Крім цього, збільшення  $\xi_m$  призводить до зменшення швидкості горіння та помітного послаблення залежності  $u(T_0)$ : зростання  $\xi_m$  від 0,25 до 0,50 призводить до зменшення швидкості горіння у 3,3...3,7 рази та послаблення залежності  $u(T_0)$  у 2,1...2,3 рази. Зменшення дисперсності порошку металевого пального призводить до зростання швидкості горіння та підсилення залежності  $u(T_0)$ : зменшення значень  $d_m$  від 310 мкм до 54 мкм призводить до збільшення швидкості горіння у 2,3...2,5 рази та підсилення залежності  $u(T_0)$  у 1,7...1,9 рази.

Зміна дисперсності порошку окиснювача також впливає на швидкість горіння та характер залежності  $u(T_0)$ : збільшення величини  $d_{ок}$  від 30 мкм до 50 мкм призводить до зменшення швидкості горіння у 1,5...1,7 рази та послаблення залежності  $u(T_0)$  у 1,2...1,4 рази. Збільшення зовнішнього тиску призводить до зростання швидкості горіння та підсилення залежності  $u(T_0)$  для усіх досліджуваних діапазонів зміни  $\xi_m$ ,  $d_m$  та  $d_{ок}$ : зміна зовнішнього тиску від  $10^5$  Па до  $3 \cdot 10^7$  Па призводить до збільшення швидкості горіння у 1,7...2,3 рази та підсилення залежності  $u(T_0)$  у 1,5...2,1 рази.

Суміш Mg +  $NiO$ . Результати проведених досліджень показують, що характер впливу співвідношення та дисперсності компонентів, зовнішнього тиску на залежність  $u(T_0)$  такий же, як й для розглянутих вище сумішей. На рис. 7, 8 представлено експериментальні дані, які кількісно найбільш суттєво відрізняються від аналогічних даних для вказаних вище сумішей. З цих даних випливає, що при збільшенні  $T_0$  від 300 К до 1000 К швидкість горіння зростає у 1,3...1,7 рази; при цьому вплив  $\xi_m$  на характер залежності  $u(T_0)$  при зростанні  $T_0$  виявляється менш суттєвим (приблизно у 1,1...1,2 разу), ніж для попередніх сумішей. Зменшення дисперсності порошку металевого пального також призводить до зменшення швидкості горіння та послаблення залежності  $u(T_0)$ , але вже у меншому ступеню: збільшення

значень  $d_m$  від 56 мкм до 305 мкм призводить до зменшення швидкості горіння у 1,6...1,9 разу та послаблення залежності  $u(T_0)$  у 1,2...1,4 рази. Збільшення дисперсності порошку окиснювача для діапазону зміни  $\xi_m$ , що розглядається, надає такий самий вплив як на швидкість горіння, так і на характер залежності  $u(T_0)$ . Збільшення зовнішнього тиску призводить вже до меншого зростання швидкості горіння та підсилення залежності  $u(T_0)$  для значень  $\xi_m$ ,  $d_m$  та  $d_{ок}$ , що розглядаються: зростання зовнішнього тиску від  $10^5$  Па до  $3 \cdot 10^7$  Па призводить до збільшення швидкості горіння у 1,8...2,1 рази та підсилення залежності  $u(T_0)$  у 1,3...1,4 рази.

Суміш Al + CuO. Для сумішей, що розглядаються, на рис. 9, 10 представлено результати експериментальних досліджень, які кількісно помітно відрізняються від аналогічних результатів для вказаних вище сумішей; при цьому, що стосується якісного впливу як технологічних параметрів, так й зовнішніх параметрів на характер залежності  $u(T_0)$ , то він однаковий для усіх сумішей. Встановлено, що при збільшенні  $T_0$  від 300 К до 1000 К швидкість горіння збільшується у 1,9...2,3 рази, а залежність  $u(T_0)$  підсилюється у 1,4...1,6 рази. Збільшення дисперсності порошку металевого пального призводить до більш слабкого зменшення швидкості горіння та послаблення залежності  $u(T_0)$ : збільшення значень  $d_m$  від 35,8 мкм до 385 мкм призводить до зменшення швидкості горіння тільки у 1,3...1,4 рази та послаблення залежності  $u(T_0)$  у 1,1...1,3 рази. Збільшення зовнішнього тиску від  $10^5$  Па до  $3 \cdot 10^7$  Па призводить до зростання швидкості горіння лише у 1,6...1,9 рази та підсилення залежності  $u(T_0)$  у 1,2...1,3 рази.

Суміш Al + NiO. Результати проведених досліджень показують, що характер впливу співвідношення та дисперсності компонентів, зовнішнього тиску на залежність  $u(T_0)$  такий же, як й для розглянутих вище сумішей. На рис. 11, 12 представлено експериментальні дані, які кількісно найбільш суттєво відрізняються від аналогічних даних для вказаних вище сумішей. З цих даних випливає, що при збільшенні  $T_0$  від 300 К до 1000 К швидкість горіння зростає у 1,2...1,4 рази; при цьому вплив  $\xi_m$  на характер залежності  $u(T_0)$  при зростанні  $T_0$  виявляється менш суттєвим (приблизно у 1,3...1,5 рази), ніж для попередніх сумішей. Зменшення дисперсності порошку металевого пального також призводить до зменшення швидкості горіння та послаблення залежності  $u(T_0)$ , але вже у меншому ступені: збільшення значень  $d_m$  від 54 мкм до 310 мкм призводить до зменшення швидкості горіння у 1,5...1,9 рази та послаблення залежності  $u(T_0)$  у 1,2...1,3 рази. Збільшення дисперсності порошку окиснювача для діапазону зміни  $\xi_m$ , що розглядається, надає такого ж впливу як на швидкість горіння, так й на характер залежності  $u(T_0)$ . Збільшення зовнішнього тиску призводить вже до меншого зростання швидкості горіння та підсилення залежності  $u(T_0)$  для значень  $\xi_m$ ,  $d_m$  та  $d_{ок}$ , що розглядаються: зростання зовнішнього тиску від  $10^5$  Па до  $3 \cdot 10^7$  Па призводить до збільшення швидкості горіння у 1,5...2,0 рази та підсилення залежності  $u(T_0)$  у 1,3...1,4 рази.

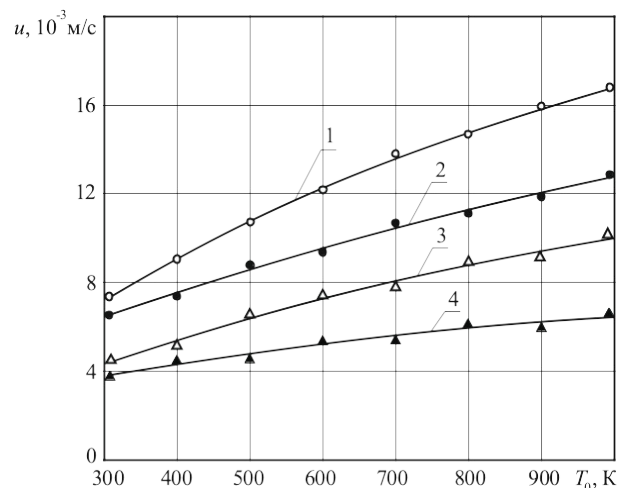
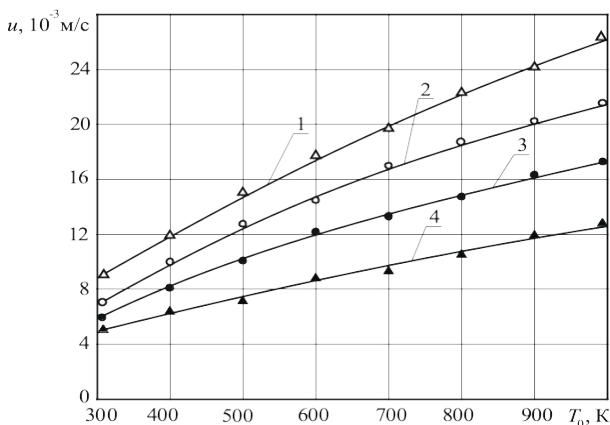


Рисунок 3 – Вплив відносного вмісту магнію

на залежність швидкості горіння сумішей Mg + CuO від температури нагріву ( $d_m = 56$  мкм;  $d_{ок} = 50$  мкм;  $P = 10^5$  Па): 1 –  $\xi_m = 0,25$ ; 2 –  $\xi_m = 0,35$ ; 3 –  $\xi_m = 0,45$ ; 4 –  $\xi_m = 0,50$ ;  $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle$  – експериментальні дані.

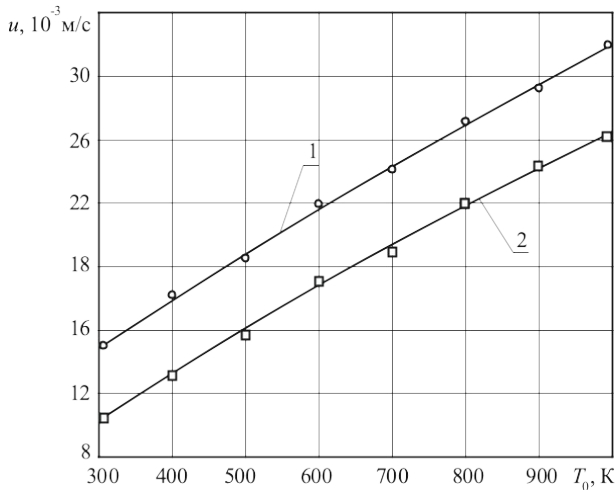


Рисунок 5 – Вплив дисперсності порошку окиснювача на залежність швидкості горіння сумішей Mg + CuO від температури нагріву ( $\xi_m = 0,30$ ;  $d_m = 56$  мкм;  $P = 10^5$  Па): 1 –  $d_{ок} = 30$  мкм; 2 –  $d_{ок} = 50$  мкм;  $\circ, \square$  – експериментальні дані.

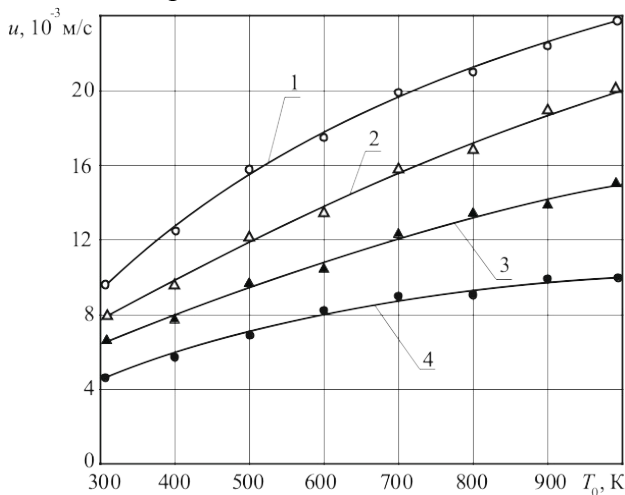


Рисунок 7 – Вплив дисперсності порошку магнію на залежність швидкості горіння сумішей Mg + NiO від температури нагріву при зовнішньому тиску  $P = 10^5$  Па ( $\xi_m = 0,40$ ;  $d_{ок} = 50$  мкм): 1 –  $d_m = 56$  мкм; 2 –  $d_m = 100$  мкм; 3 –  $d_m = 280$  мкм; 4 –  $d_m = 305$  мкм;  $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle$  – експериментальні дані.

Рисунок 4 – Вплив дисперсності порошку магнію на залежність швидкості горіння сумішей Mg + CuO від температури нагріву ( $\xi_m = 0,45$ ;  $d_{ок} = 50$  мкм;  $P = 10^5$  Па): 1 –  $d_m = 56$  мкм; 2 –  $d_m = 100$  мкм; 3 –  $d_m = 190$  мкм; 4 –  $d_m = 305$  мкм;  $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle$  – експериментальні дані.

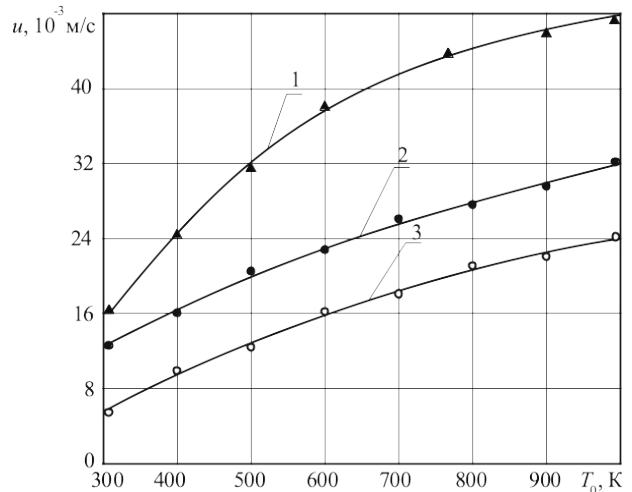


Рисунок 6 – Вплив зовнішнього тиску на залежність швидкості горіння сумішей Mg + CuO від температури нагріву ( $\xi_m = 0,35$ ;  $d_m = 56$  мкм;  $d_{ок} = 50$  мкм): 1 –  $P = 3 \cdot 10^7$  Па; 2 –  $P = 10^6$  Па; 3 –  $P = 10^5$  Па;  $\circ, \bullet, \blacktriangle$  – експериментальні дані.

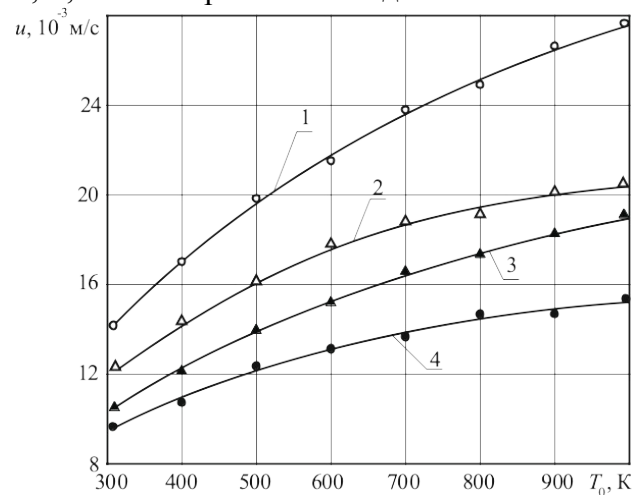


Рисунок 8 – Вплив дисперсності порошку металевого пального на залежність швидкості горіння сумішей Mg + NiO від температури нагріву при зовнішньому тиску  $P = 3 \cdot 10^7$  Па ( $\xi_m = 0,40$ ;  $d_{ок} = 50$  мкм): 1 –  $d_m = 56$  мкм; 2 –  $d_m = 100$  мкм; 3 –  $d_m = 280$  мкм; 4 –  $d_m = 305$  мкм;  $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle$  – експериментальні дані.

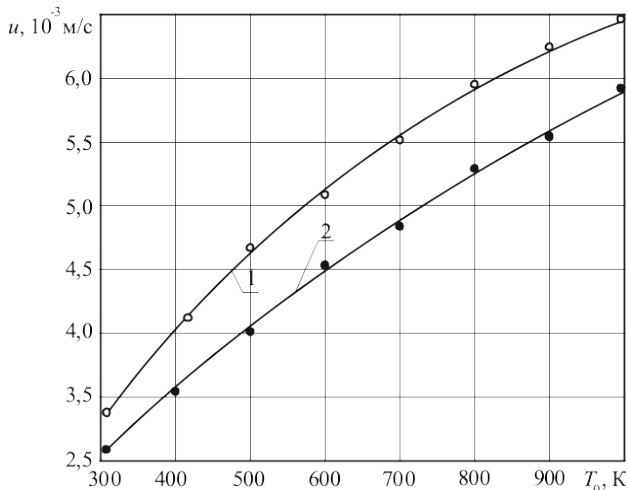


Рисунок 9 – Вплив дисперсності порошку алюмінію на залежність швидкості горіння сумішей Al + CuO від температури нагріву при зовнішньому тиску  $P = 10^5$  Па ( $\xi_m = 0,25$ ;  $d_{ок} = 50$  мкм): 1 –  $d_m = 54$  мкм; 2 –  $d_m = 310$  мкм;  $\circ$ ,  $\bullet$  – експериментальні дані.

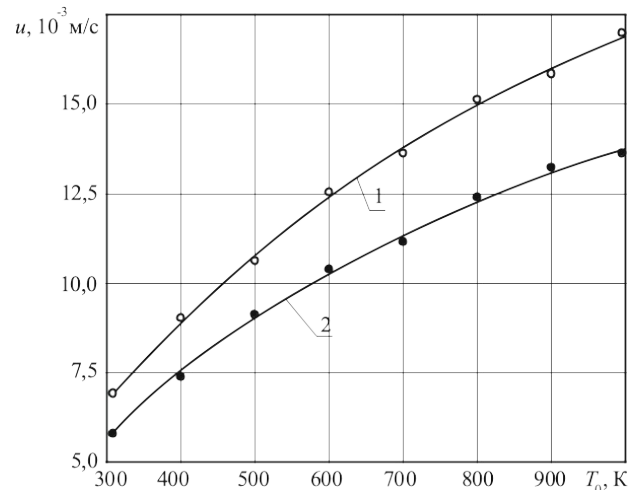


Рисунок 10 – Вплив дисперсності порошку алюмінію на залежність швидкості горіння сумішей Al + CuO від температури нагріву при зовнішньому тиску  $P = 10^7$  Па ( $\xi_m = 0,25$ ;  $d_{ок} = 50$  мкм): 1 –  $d_m = 54$  мкм; 2 –  $d_m = 310$  мкм;  $\circ$ ,  $\bullet$  – експериментальні дані.

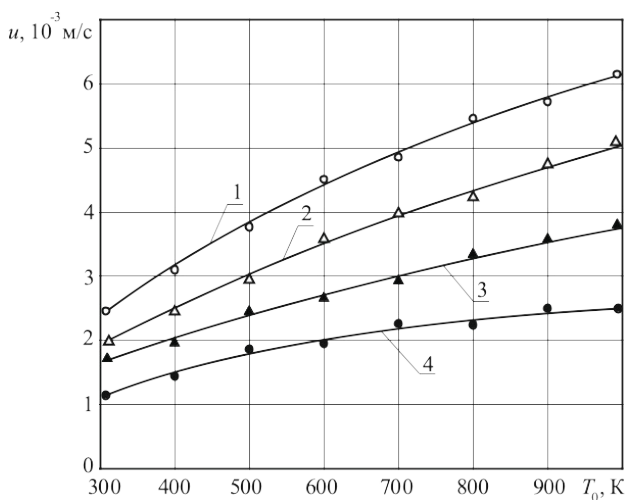


Рисунок 11 – Вплив дисперсності порошку алюмінію на залежність швидкості горіння сумішей Al + NiO від температури нагріву при зовнішньому тиску  $P = 10^5$  Па ( $\xi_m = 0,30$ ;  $d_{ок} = 50$  мкм): 1 –  $d_m = 54$  мкм; 2 –  $d_m = 100$  мкм; 3 –  $d_m = 190$  мкм; 4 –  $d_m = 310$  мкм;  $\circ$ ,  $\bullet$ ,  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$  – експериментальні дані.

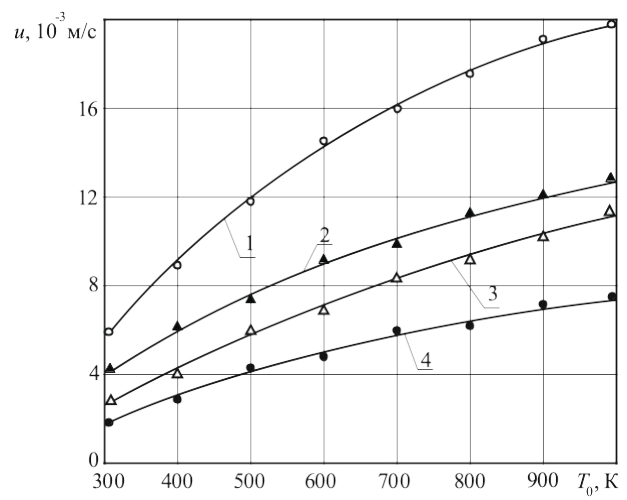


Рисунок 12 – Вплив дисперсності порошку алюмінію на залежність швидкості горіння сумішей Al + NiO від температури нагріву при зовнішньому тиску  $P = 3 \cdot 10^7$  Па ( $\xi_m = 0,30$ ;  $d_{ок} = 50$  мкм): 1 –  $d_m = 54$  мкм; 2 –  $d_m = 100$  мкм; 3 –  $d_m = 190$  мкм; 4 –  $d_m = 310$  мкм;  $\circ$ ,  $\bullet$ ,  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$  – експериментальні дані.

Експериментально-статистичні моделі для отримання бази даних щодо швидкості та вибухонебезпечних режимів горіння сумішей в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків. Для практичного використання отриманих вище результатів щодо горіння сумішей, що розглядаються, необхідно створити базу даних, зручну для оцінок пожежонебезпечних властивостей піротехнічних виробів на їх основі в умовах зовнішніх термічних дій, основними параметрами яких є підвищені температури нагріву та зовнішні тиски. Для отримання такої бази даних необхідно систематизувати дані щодо горіння

сумішей, що розглядаються, і, в першу чергу, щодо швидкості горіння сумішей, у вигляді нескладних експериментально-статистичних моделей, зручних для практичних оцінок.

Для розв'язання цієї задачі були використані відомі методи експериментально-статистичного моделювання [28, 29] та стандартне програмне забезпечення у вигляді пакетів прикладних програм по сучасним чисельним методам [4, 6], які дозволяють у діалоговому режимі на ПК за отриманими моделями розраховувати діапазони зміни швидкості горіння сумішей, що характеризують їх здатність до прискорення процесу горіння в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків.

Згідно з отриманими даними було розроблено нові експериментально-статистичні моделі (відносна похибка 7...9 %):

$$u(T_0, P) = C_0 + C_1 P + C_2 T_0 + C_3 P^2 + C_4 T_0^2 + C_5 P^3 + C_6 P T_0 + C_7 P T_0^2 + C_8 P^2 T_0 + C_9 P^2 T_0^2 + C_{10} P^3 T_0 + C_{11} P^3 T_0^2 \quad (1)$$

де  $C_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, 11$ ) – емпіричні коефіцієнти, які отримані для значень  $(\zeta_m)_{u_{max}}$ , при яких швидкість горіння сумішей стає максимальною  $u_{max}$  (див. табл. 1, 2), а процес горіння дуже швидко та у більшості випадків в умовах зовнішніх термічних дій закінчується вибухом (табл. 3).

Отримані експериментально-статистичні моделі (1) дозволяють за допомогою стандартного комп'ютерного програмного забезпечення [4, 6] в діалоговому режимі формувати керованому базу даних щодо швидкостей розвитку процесу горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій (рис. 13).

Таблиця 3 – Значення емпіричних коефіцієнтів у формулі (1) для сумішей Mg, Al + оксиди металів ( $(\zeta_m)_{u_{max}} = 0,16 \dots 0,39$  – для Mg;  $(\zeta_m)_{u_{max}} = 0,19 \dots 0,26$  – для Al)

Коефіцієнт Суміш	Mg + CuO	Mg + NiO	Al + CuO	Al + NiO
$C_0$	-12,21	-9,73	-18,51	-24,43
$C_1$	$0,67 \cdot 10^{-6}$	$0,87 \cdot 10^{-6}$	$0,41 \cdot 10^{-6}$	$0,31 \cdot 10^{-6}$
$C_2$	$4,7 \cdot 10^{-2}$	$6,83 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$
$C_3$	$1,71 \cdot 10^{-12}$	$1,93 \cdot 10^{-12}$	$1,06 \cdot 10^{-12}$	$0,43 \cdot 10^{-12}$
$C_4$	$-6,51 \cdot 10^{-5}$	$-4,47 \cdot 10^{-5}$	$-10,23 \cdot 10^{-5}$	$-12,27 \cdot 10^{-5}$
$C_5$	$-8,32 \cdot 10^{-19}$	$-6,74 \cdot 10^{-19}$	$-12,12 \cdot 10^{-19}$	$-16,21 \cdot 10^{-19}$
$C_6$	$4,75 \cdot 10^{-8}$	$3,89 \cdot 10^{-8}$	$2,71 \cdot 10^{-8}$	$2,73 \cdot 10^{-8}$
$C_7$	$-16,71 \cdot 10^{-11}$	$-12,91 \cdot 10^{-11}$	$-23,81 \cdot 10^{-11}$	$-32,05 \cdot 10^{-11}$
$C_8$	$-4,75 \cdot 10^{-14}$	$-3,83 \cdot 10^{-14}$	$-7,32 \cdot 10^{-14}$	$-9,23 \cdot 10^{-14}$
$C_9$	$0,73 \cdot 10^{-17}$	$0,85 \cdot 10^{-17}$	$0,41 \cdot 10^{-17}$	$0,37 \cdot 10^{-17}$
$C_{10}$	$0,68 \cdot 10^{-21}$	$0,79 \cdot 10^{-21}$	$0,38 \cdot 10^{-21}$	$0,41 \cdot 10^{-21}$
$C_{11}$	$-3,54 \cdot 10^{-24}$	$-2,51 \cdot 10^{-24}$	$-5,23 \cdot 10^{-24}$	$-7,35 \cdot 10^{-24}$



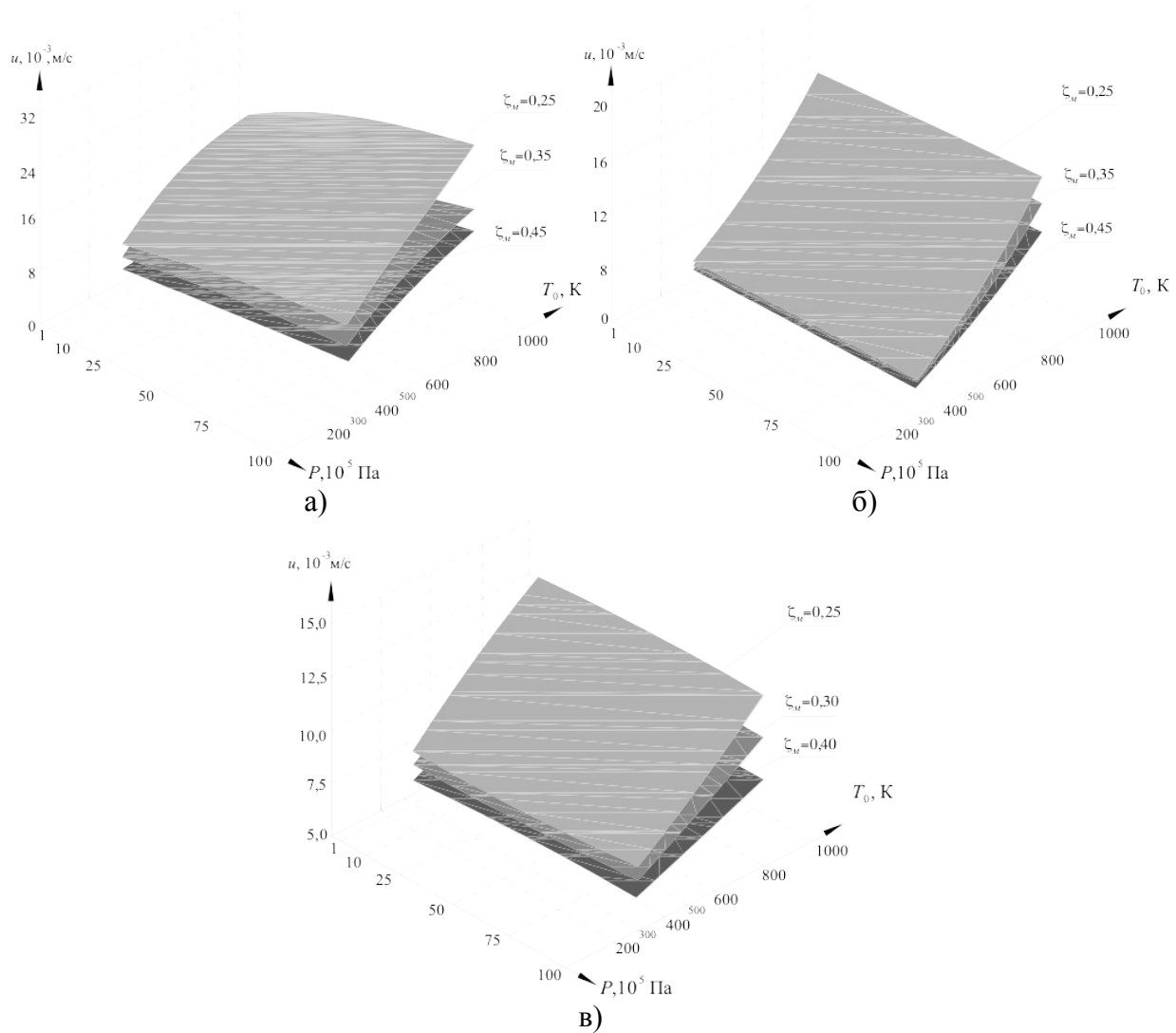


Рис. 13. Тривимірне зображення залежностей швидкості горіння сумішей від температури нагріву та зовнішнього тиску для різних значень співвідношення компонентів у суміші: а) – суміш Mg + CuO ( $d_m = 56$  мкм;  $d_{ок} = 30$  мкм); б) – суміш Mg + NiO ( $d_m = 56$  мкм;  $d_{ок} = 50$  мкм); в) – суміш Al + CuO ( $d_m = 54$  мкм;  $d_{ок} = 30$  мкм).

Слід відзначити, що отримані результати експериментальних досліджень та розроблені експериментально-статистичні моделі можуть бути використані для формування в режимі діалогу та реального часу за допомогою комп'ютерного забезпечення бази даних по допустимим діапазнам зміни технологічних параметрів та параметрів зовнішніх термічних дій, в межах яких спостерігається невибухонебезпечний розвиток процесу горіння сумішей, що розглядаються, при передчасному ініціюванні виробів на їх основі. Це дозволяє на стадії виготовлення піротехнічних виробів на основі сумішей, а також при їх зберіганні, транспортуванні та застосуванні підвищувати пожежну безпеку виробів з врахуванням впливу екстремальних зовнішніх умов.

#### Висновки.

1. Вперше показано, що для робочих діапазонів зміни технологічних параметрів ( $\zeta_m = 0,1 \dots 0,5$ ;  $K_V = 0,95 \dots 0,96$ ;  $d_m = 54 \dots 310$  мкм;  $d_{ок} = 30 \dots 50$  мкм) та параметрів навколишнього середовища ( $T_0 = 300 \dots 1000$  К;  $P = 10^5 \dots 3 \cdot 10^7$  Па) процеси займання та горіння сумішей протікають стабільно та не носять вибухонебезпечного характеру.

2. Встановлено нові закономірності зміни швидкості та меж горіння сумішей: визначено концентраційні межі горіння ( $\zeta_m$ )<sub>НМГ</sub> (нижній, надлишок окиснювача) та ( $\zeta_m$ )<sub>ВМГ</sub> (верхній, надлишок металевого пального) – ( $\zeta_m$ )<sub>НМГ</sub> = 0,04...0,09 та ( $\zeta_m$ )<sub>ВМГ</sub> = 0,43...0,53 (для сумішей магній + оксиди металів), ( $\zeta_m$ )<sub>НМГ</sub> = 0,09...0,17 та ( $\zeta_m$ )<sub>ВМГ</sub> = 0,35...0,45 (для сумішей

алюміній + оксиди металів); значення швидкості горіння при  $\xi_m = (\xi_m)_{ВМГ}$  перевищують її значення при  $\xi_m = (\xi_m)_{НМГ}$  у 1,7...1,9 рази (для сумішей магній + оксиди металів) та у 2,2...2,6 рази (для сумішей алюміній + оксиди металів); максимальні значення швидкості горіння  $u_{max}$  досягаються при співвідношеннях компонентів  $(\zeta_m)_{u_{max}}$ , які знаходяться у діапазонах:  $u_{max} = 2,7 \cdot 10^{-3} \dots 14,3 \cdot 10^{-3}$  м/с та  $(\zeta_m)_{u_{max}} = 0,13 \dots 0,39$  (для сумішей магній + оксиди металів),  $u_{max} = 3,8 \cdot 10^{-3} \dots 11,8 \cdot 10^{-3}$  м/с та  $(\zeta_m)_{u_{max}} = 0,19 \dots 0,26$  (для сумішей алюміній + оксиди металів); для усіх досліджуваних діапазонів зміни  $\xi_m$  швидкість горіння сумішей магній + оксиди металів перевищує швидкість горіння сумішей алюміній + оксиди металів: для  $u|_{\xi_m=НМГ}$  – у 1,3...2,4 рази, для  $u_{max}$  – у 1,5...2,3 рази та для  $u|_{\xi_m=ВМГ}$  – у 1,7...4,9 рази.

3. Встановлено нові закономірності впливу підвищених температур нагріву  $T_0$  та зовнішніх тисків  $P$  на швидкість розвитку процесу горіння сумішей  $u$  для робочих діапазонів зміни технологічних параметрів (відносного вмісту металевого пального  $\xi_m = 0,25 \dots 0,50$ , що розглядаються; коефіцієнта ущільнення суміші  $K_V = 0,95 \dots 0,96$ ; дисперсності металевого пального  $d_m = 54 \dots 310$  мкм та дисперсності окиснювача  $d_{ок} = 30 \dots 50$  мкм): збільшення  $T_0$  від 300 К до 1000 К призводить до зростання швидкості горіння у 1,3...1,7 рази та підсилення залежності  $u(T_0)$  у 1,3...1,7 рази; збільшення  $\xi_m$  від 0,25 до 0,50 призводить до зменшення швидкості горіння у 3,3...3,7 рази та послаблення залежності  $u(T_0)$  у 2,1...2,3 рази; збільшення  $d_m$  від 54 мкм до 310 мкм призводить до зменшення швидкості горіння у 2,3...2,5 рази та підсилення залежності  $u(T_0)$  у 1,7...1,9 рази; зменшення величини  $d_{ок}$  від 50 мкм до 30 мкм призводить до збільшення швидкості горіння у 1,5...1,7 рази та послаблення залежності  $u(T_0)$  у 1,2...1,4 рази; збільшення  $P$  від  $10^5$  Па до  $3 \cdot 10^7$  Па приводить до зростання швидкості горіння у 1,7...2,3 рази та послаблення залежності  $u(T_0)$  у 1,5...2,1 рази для усіх досліджуваних діапазонів зміни  $\xi_m$ ,  $d_m$  та  $d_{ок}$ .

4. Розроблено нові експериментально-статистичні моделі, які дозволяють в режимі діалогу та реального часу проводити розрахунки (відносна похибка 7...9 %) рівнів швидкості горіння сумішей, що характеризують їх здатність до прискорення процесу горіння в умовах зовнішніх термодій (підвищені температури нагріву та тиски навколишнього середовища), що дає змогу сформуванню бази даних по вибухонебезпечним режимам горіння сумішей у вказаних умовах.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Шидловский А. А. Пиротехника в народном хозяйстве / А. А. Шидловский, А. И. Сидоров, Н. А. Силин. – М.: Машиностроение, 1978. – 231 с.
2. Силин Н. А. Окислители гетерогенных конденсированных систем / Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Н. И. Зарипов и др. – М.: Машиностроение, 1978. – 456 с.
3. Силин Н. А. Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем / Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Л. Я. Кашпоров и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 232 с.
4. Ващенко В. А. Процессы горения металлизированных конденсированных систем / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. И. Заика, И. В. Яценко, В. В. Цыбулин. – К.: Наукова думка, 2008 – 745 с.
5. Кириченко О. В. Моделирование предельных, неустойчивых режимов горения пиротехнических нитратных систем с учетом агломерации металлического горючего / О. В. Кириченко // Науковий вісник УкрНДІПБ, 2008. – № 1(17). – С. 78 – 86.
6. Кириченко О. В. Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратовмісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів. Монографія / О. В. Кириченко, П. С. Пашковський, В. А. Ващенко, Ю. Г. Лега. – К.: Наукова думка, 2012. – 318 с.
7. Діброва О. С. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій / О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко // International Scientific Journal “Intenauka” <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5799.
8. Вогман Л. П. Требования пожарной безопасности к пиротехническим изделиям бытового назначения / Л. П. Вогман, В. В. Лепесий // Пожаровзрывобезопасность. – 1998. – № 4. – С. 51 – 57.
9. ГОСТ Р 51271 – 99. Изделия пиротехнические. Методы сертификационных испытаний.
10. ДСТУ 4316 – 2004. Вироби піротехнічні побутового призначення. Вимоги пожежної безпеки і методи випробувань. Затверджено наказом Держстандарту України від 05. 07. 2004 р., № 130.
11. Кириллов Г. Н. Требования пожарной безопасности при обращении пиротехнической продукции. Обзорно-аналитический материал / Г. Н. Кириллов, Ю. И. Дешевых, А. Н. Гилетич, Л. П. Вогман, В. А. Зуйков, А. Н. Нестругин, А. М. Пшеничников. – М.: ВНИИПО и ДНД МЧС России, 2010. – 19 с.
12. Кириченко О. В. Пожежонебезпечні термовпливи на поверхню металевих корпусів піротехнічних виробів в умовах пострілу та польоту / О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, В. В. Цыбулін // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: НУГЗУ, 2012. – № 32. – С. 98 – 112.
13. Вибухи на складах боеприпасів в Україні. Історія катастроф. URL: <https://gordonua.com/ukr/publications/vibuhi-na-skladah-bojepripasiv-v-ukrajini-istorija-katastrof-179716.html>.
14. Schmalfuß H. Magnesium erschwert Löscharbeiten an Pkw / H. Schmalfuß // Feuerwehr-Magazin, 2016. – # 5. – S. 8.
15. Schlüsslmayr Ch. Druckgießerei in Flammen – Feuerwehr kämpft vier Tage gegen Magnesiumbrand / Ch. Schlüsslmayr // Blaulicht, 2016. – № 3. – S. 4 – 8.
16. Ващенко В. А. Зависимости скорости горения пиротехнических нитратных систем от соотношения компонентов, нахождение концентрационных пределов горения в условиях повышенных скоростей обдува потоком воздуха / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, В. Д. Акиншин, В. В. Цыбулин, И. В. Яценко // Вісник Приазовського державного технічного університету, 2008. – Вип. 18. – С. 257 – 261.
17. Кириченко О. В. Влияние повышенных температур нагрева и внешних давлений на режимы горения пиротехнических нитратных систем / О. В. Кириченко, П. И. Заика, В. В. Цыбулин, И. В. Яценко, В. А. Ващенко // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2008. – № 3. – С. 172 – 176.

18. Ващенко В. А. Комплекс испытательных установок, моделирующих реальные условия применения пиротехнических нитратосодержащих изделий / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, В. Д. Акиншин, В. В. Цыбулин, И. В. Яценко // Науковий вісник УкрНДІПБ, 2009. – № 1(19). – С. 127 – 137.

19. Кириченко О. В. Створення бази даних по швидкостям та вибухонебезпечним режимам горіння пиротехнічних нітратно-металевих сумішей / О. В. Кириченко // Вісник ЧДТУ, 2012. – № 3. – С. 88 – 90.

20. Кириченко О. В. Вплив температури нагріву на швидкість та вибухонебезпечні режими горіння пиротехнічних нітратно-металевих сумішей / О. В. Кириченко, Г. В. Налева // Сб. “Труды Одесского национального политехнического университета”, 2012. – Вып. 2(39). – С. 143 – 147.

21. Кириченко О. В. Экспериментально-статические модели для прогнозирования влияния внешних термовоздействий на скорость горения пиротехнических смесей / О. В. Кириченко // Вестник КИИ. – Минск: КИИ МЧС РБ, 2013. – № 2(18). – С. 35 – 41.

22. Кириченко О. В. Швидкість та межі горіння пиротехнічних нітратно-магнієвих сумішей в умовах зовнішніх термовпливів / О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін, В. М. Тупицький // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: НУГЗУ, 2013. – № 34. – С. 73 – 95.

23. Кириченко О. В. Скорость и предельные режимы горения трехкомпонентных пиротехнических смесей в условиях внешних термовоздействий / О. В. Кириченко // Международный научно-практический журнал “Пожаровзрывобезопасность”. Россия. – М.: Пожнаука, 2013. – № 5. – С. 20 – 25.

24. Кириченко О. В. Влияние повышенных температур нагрева и внешних давлений на скорость и предельные режимы горения пиротехнических нитратно-алюминиевых смесей / О. В. Кириченко // Международный научно-практический журнал “Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность”. Россия. – Краснодар: Кубанский социально-экономический институт, 2013. – № 2. – С. 18 – 23.

25. Діброва О. С. Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку пиротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій / О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко // International Scientific Journal “Intenauka” <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5798.

26. Кириченко О. В. Визначення критичних режимів розвитку процесів горіння пиротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій / О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, Т. І. Бутенко, В. В. Цибулін // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2020. – № 2. – С. 123 – 133.

27. Виленкин С. Я. Статистическая обработка результатов исследования случайных величин / С. Я. Виленкин. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.

28. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 831 с.

## REFERENCES

1. Shidlovsky A. A. Pyrotechnics in the national household / A. A. Shidlovsky, A. I. Sidorov, N. A. Silyn. – М.: Mashinostroenie, 1978. – 231 p.

2. N. A. Silyn Oxidizers of heterogeneous condensed systems / N. A. Silyn, V. A. Vashchenko, N. I. Zaripov et al. – М.: Mashinostroenie, 1978. – 456 p.

3. N. A. Silin, Combustion of Metallized Heterogeneous Condensed Systems / N. A. Silin, V. A. Vashchenko, L. Ya. Kashporov, etc. – М.: Mashinostroenie, 1982. – 232 p.

4. V. A. Vashchenko. Combustion processes of metallized condensed systems / V. A. Vashchenko, O. V. Kurychenko, Y. G. Lega, P. I. Zaika, I. V. Yatsenko, V. V. Tsybulin. – К.: Naukova dumka, 2008 – 745 p.

5. O. V. Kyrychenko Modeling of limiting, unstable combustion regimes of pyrotechnic nitrate systems taking into account the agglomeration of metallic fuel / O. V. Kyrychenko // Scientific Bulletin of UkrNDIPB, 2008. – No. 1(17). – P. 78 – 86.
6. Kyrychenko O. V. Basics of fire safety of pyrotechnic nitrate-containing products in conditions of external thermal influences. Monograph / O. V. Kyrychenko, P. S. Pashkovskiy, V. A. Vashchenko, Yu. G. Lega. – K.: Naukova dumka, 2012. – 318 p.
7. O. S. Dibrova, Increasing the fire safety of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under conditions of external thermal effects / O. S. Dibrova, O. B. Kyrychenko, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko // International Scientific Journal "Intenauka" <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – No. 5/5799.
8. Vogman L.P. Requirements for fire safety for pyrotechnic products of household goods / L.P. Vogman, V.V. Lepesy // Pozharovzryvobezopasnost. – 1998. – No. 4. – P. 51 – 57.
9. GOST R 51271 – 99. Pyrotechnic products. Methods of certification tests.
10. DSTU 4316 – 2004. Pyrotechnic products for household use. Fire safety requirements and test methods. Approved by the order of the State Standard of Ukraine dated July 5, 2004, No. 130.
11. Kirillov G.N. Fire safety requirements for the circulation of pyrotechnic products. Review and analytical material / G. N. Kirillov, Y. I. Deshevych, A. N. Hyletich, L. P. Vogman, V. A. Zuykov, A. N. Nestrugin, A. M. Pshenychnikov. – M.: VNIPO and DND of the Ministry of Emergencies of Russia, 2010. – 19 p.
12. O. V. Kyrychenko Fire-hazardous thermal effects on the surface of metal casings of pyrotechnic products under the conditions of a shot and flight / O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, V. V. Tsybulin // Problemy pozharnoi bezopasnosti. – Kharkiv: NUGZU, 2012. – No. 32. – P. 98 – 112.
13. Explosions at ammunition warehouses in Ukraine. History of disasters. URL: <https://gordonua.com/ukr/publications/vibuhi-na-skladah-bojepripasiv-v-ukrajini-istorija-katastrof-179716.html>.
14. Schmalfuß H. Magnesium erschwert Löscharbeiten an Pkw / H. Schmalfuß // Feuerwehr-Magazin, 2016. – # 5. – S. 8.
15. Schlüsslmayr Ch. Druckgießerei in Flammen – Feuerwehr combat vier Tage gegen Magnesiumbrand / Ch. Schlüsslmayr // Blaulicht, 2016. – No. 3. – S. 4 – 8.
16. V. A. Vashchenko, V. A. Vashchenko, O. V. Kyrychenko, V. D. Akinshin, V. V. Tsybulin, I. V. Yatsenko // Bulletin of Pryazovsky State Technical University, 2008. – Vol. 18. – P. 257 – 261.
17. O. V. Kyrychenko, Influence of elevated heating temperatures and external pressures on combustion regimes of pyrotechnic nitrate systems / O. V. Kyrychenko, P. I. Zaika, V. V. Tsybulin, I. V. Yatsenko, V. A. Vashchenko // Bulletin of the Cherkasy State Technological University, 2008. – No. 3. – P. 172 – 176.
18. V. A. Vashchenko Complex of test installations modeling real conditions of application of pyrotechnic nitrate-containing products / V. A. Vashchenko, O. V. Kyrychenko, V. D. Akinshin, V. V. Tsybulin, I. V. Yatsenko // Scientific Bulletin of UkrNDIPB, 2009. – No. 1(19). – P. 127 – 137.
19. O. V. Kyrychenko Creation of a database on velocities and explosive modes of combustion of pyrotechnic nitrate-metal mixtures / O. V. Kyrychenko // Bulletin of ChDTU, 2012. – No. 3. – P. 88 – 90.
20. O. V. Kyrychenko, Effect of heating temperature on the speed and explosive modes of combustion of pyrotechnic nitrate-metal mixtures / O. V. Kyrychenko, G. V. Naleva // Sat. "Proceedings of the Odessa National Polytechnic University", 2012. – Vol. 2(39). – P. 143 – 147.
21. O. V. Kyrychenko Experimental static models for forecasting the influence of external thermal effects on the burning rate of pyrotechnic mixtures / O. V. Kyrychenko // Vestnik KII. – Minsk: KII Ministry of Emergencies of the Republic of Belarus, 2013. – No. 2(18). – P. 35 – 41.
22. O. V. Kyrychenko Speed and limits of combustion of pyrotechnic nitrate-magnesium mixtures under conditions of external thermal influences / O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, V. V. Tsybulin, V. M. Tupytsky // Problems of fire safety. – Kharkiv: NUGZU, 2013. – No. 34. – P. 73 – 95.

23. O. V. Kyrychenko Speed and limit modes of combustion of three-component pyrotechnic mixtures in the conditions of external thermal effects / O. V. Kyrychenko // International Scientific and Practical Journal "Pozharovzryvobezopasnost". Russia. – M.: Pozhnauka, 2013. – No. 5. – P. 20-25.

24. O. V. Kyrychenko, Influence of elevated heating temperatures and external pressures on the speed and limit modes of combustion of pyrotechnic nitrate-aluminum mixtures / O. V. Kyrychenko // International Scientific and Practical Journal "Emergency Situations: Industrial and Environmental Safety". Russia. – Krasnodar: Kuban socio-economic institute, 2013. – No. 2. – pp. 18-23.

25. Dibrova, O.S. Patterns of influence of technological parameters on the fire safety of non-pyrotechnical nitrate-titanium mixtures under conditions of external thermal effects / O.S. Dibrova, O.V. Kyrychenko, R.B. Motrichuk, V.A. Vashchenko // International Scientific Journal "Intenauka" <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – No. 5/5798.

26. O. V. Kyrychenko. Determination of critical modes of development of combustion processes of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under conditions of external thermal effects / O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, T. I. Butenko, V. V. Tsybulin // Herald of the Cherkasy State Technological University, 2020. – No. 2. – P. 123 – 133.

27. S. Ya. Vilenkin Statistical processing of results of research of random values / S. Ya. Vilenkin. – M.: Energy, 1979. – 320 p.

28. Korn H. Reference book on mathematics for scientific workers and engineers. Definitions, theorems, formulas / H. Korn, T. Korn. – M.: Nauka, 1984. – 831 p.

***Yevhenii Kyrychenko,***

*Cherkassy Institute of Fire Safety Named after Chernobyl Heroes  
of National University of Civil Defense in Ukraine*

**STUDY OF THE PROCESSES OF IGNITION AND DEVELOPMENT OF COMBUSTION  
OF TWO-COMPONENT PYROTECHNIC MIXTURES FROM MAGNESIUM,  
ALUMINUM POWDER AND METAL OXIDES AT ELEVATED HEATING  
TEMPERATURES AND EXTERNAL PRESSURES**

*Experimental studies were conducted and experimental statistical models were developed of the complex influence of technological parameters (the ratio and dispersion of components, the nature of the metal fuel and oxidizer) and external conditions (temperature and ambient pressure) on the speed and concentration limits of combustion of two-component compacted mixtures of magnesium and aluminum powders with metal oxides.*

**Key words:** *pyrotechnic mixtures, fire safety, processes of ignition and combustion of pyrotechnic metal-containing mixtures.*