

УДК 614.841:536.46

[0000-0002-9479-669X] **В. О. Ковбаса**

e-mail: victory101@ukr.net

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

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ЗОВНІШНІХ УМОВ НА ШВИДКІСТЬ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ МЕТАЛІЗОВАНИХ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ ФТОРОПЛАСТІВ

Встановлено закономірності впливу технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення суміші, діаметра її зразка, коефіцієнта теплопровідності його оболонки) та зовнішніх умов (підвищені температури нагріву та зовнішні тиски) на швидкість розвитку процесу горіння ущільнених сумішей з металевих паливних, фторопластів і добавок органічних та неорганічних речовин. Знайдено концентраційні межі горіння сумішей, в яких процес їх горіння протікає стабільно та є стійким. Встановлено широкий клас органічних та неорганічних речовин, введення яких у вигляді невеликих добавок (до 10...13 %) у склад сумішей приводить до зменшення швидкості горіння та підвищення стійкості процесу їх горіння до зовнішніх впливів для різних діапазонів зміни технологічних параметрів сумішей. Виявлено також неорганічні речовини, добавки яких, навпаки, призводять до різкого зростання швидкості розвитку процесу горіння сумішей і зниження його стійкості, особливо в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків. Вперше показано, що шляхом регулювання технологічних параметрів сумішей (співвідношення і природи компонентів, дисперсності металевих паливних, коефіцієнта ущільнення, діаметра зразків сумішей та коефіцієнта теплопровідності оболонок) на стадії їх виготовлення, не змінюючи тактико-технічні показники піротехнічних виробів на основі металізованих фторопластовмісних сумішей, за допомогою керованої зміни швидкості горіння сумішей (або часу дії виробів в умовах їх бойового застосування) можна попереджати нестійкі, вибухонебезпечні режими його розвитку в умовах зовнішніх термічних впливів, що призводять до передчасного пожежонебезпечного руйнування виробів.

Ключові слова: пожежна безпека, піротехнічні суміші, органічні та неорганічні речовини, швидкість горіння, стійкість процесу горіння, зовнішні впливи.

Вступ. У народному господарстві та військовій техніці України широко використовуються піротехнічні вироби різного призначення (освітлювальні, сигнальні, трасувальні патрони та снаряди, фейерверочні засоби, елементи ракетно-комічної техніки та ін.) на основі механічно ущільнених сумішей з порошків металевих паливних (Mg, Al, Ti, Zr та ін.) і фторопластів (Ф-3, Ф-4 та ін.) з добавками органічних (парафін, тіокол, уротропін, стеарин, ЕД-5, СКН-10-1 та ін.) і неорганічних (MnO_2 , Ni_2O_3 , $KMnO_4$, V_2O_5 , CuO , Cr_2O_3 та ін.) речовин [1-3].

Зазначені 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 тер-

мовпливам в умовах надзвукового обдуву потоком повітря тощо), що призводить до передчасного займання зарядів сумішей і розвитку процесу їх горіння в умовах зростання температури нагріву та зовнішнього тиску [4-14]. В результаті відбувається руйнування піротехнічних виробів з утворенням високо-температурних продуктів згоряння, які розлітаються у різні боки і мають пожежну небезпеку для навколишніх об'єктів (рисунк 1).

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

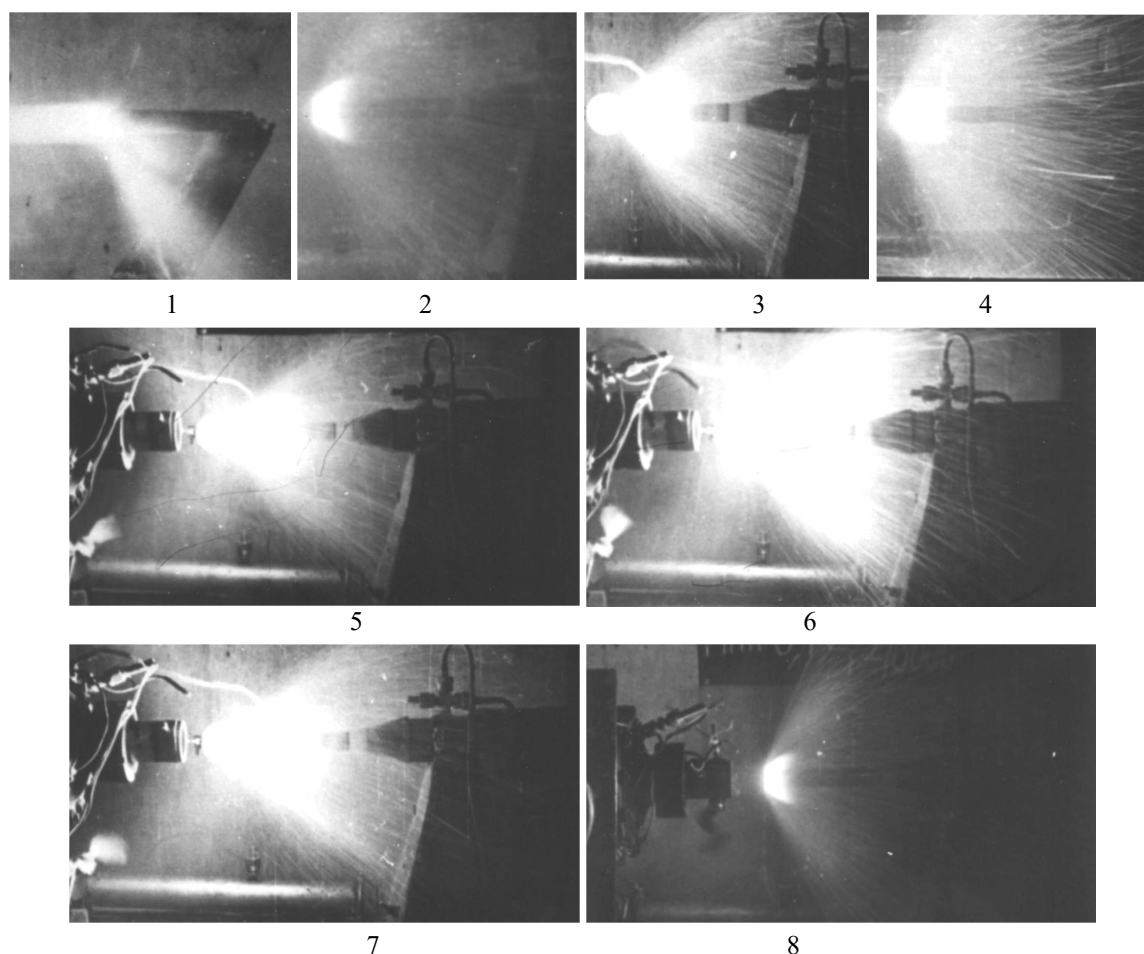


Рисунок 1. Кінокадри загальної картини вимушених пожежонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів в умовах інтенсивних зовнішніх термодій на їх поверхні, отриманих на стандартному піротехнічному обладнанні [2, 19]: 1, 2, 3, 4 – локальні джерела тепла (використовувався ІЧ-нагрів виробів кварцовими лампами типу КГМ-220-1000-1 з застосуванням керованих термодатчиків РИФ-101 для контролю температури на поверхні виробів в діапазоні 300...1000 К); 5, 6, 7, 8 – поздовжній надзвуковий обдув потоком повітря поверхні виробів зі швидкостями до $2,0 \cdot 10^3 \dots 2,5 \cdot 10^3$ м/с, що моделює умови запуску та польоту виробів

На цей момент найбільш докладно досліджено процеси горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей (ущільних сумішей з порошків металевих палих (Mg, Al, Ti, Zr та ін.) і нітратовмісних окиснювачів (NaNO_3 , $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, KNO_3 та ін.) у вказаних зовнішніх умовах [15, 17-26]: встановлено закономірності впливу технологічних параметрів (співвідношення і дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення, величини та природи добавки органічних речовин, діаметра заряду суміші та ін.) на залежності швидкості горіння сумішей від підвищених температур нагріву (до 800 К) та зовнішніх тисків (до 10^7 Па); розроблено моделі їх горіння у цих умовах для визначення критичних параметрів зовнішніх термічних дій, перевищення яких призводить до вибухового розвитку горіння сумішей і пожежонебезпечного

руйнування виробів; на базі проведених досліджень було розроблено методи попередження цих руйнувань виробів шляхом регулювання технологічних параметрів на стадії виготовлення зарядів сумішей, що дозволяє збільшувати часи спрацювання виробів в екстремальних умовах експлуатації.

Що стосується досліджуваних піротехнічних сумішей з порошків металевих палих і фторопластів з добавками органічних та неорганічних речовин, то нині аналогічні дослідження для них відсутні.

Мета та задачі досліджень. *Мета роботи:* отримання бази даних по швидкостях горіння сумішей в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків для різних значень технологічних параметрів, яка дозволяє оцінювати її допустимі діапазони зміни.

Задачами досліджень є:

- дослідження впливу технологічних параметрів на швидкість розвитку процесу горіння піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів;
- дослідження впливу зовнішніх умов на швидкість розвитку горіння піротехнічних сумішей з порошків металевих палих, фторопластів та добавок органічних речовин.

Виклад основного матеріалу. Зразки піротехнічних сумішей виготовлялись з використанням стандартних методів пресування порошків окиснювачів (фторопласти (Ф-3 та ін.)), металевих палих (Mg, Al та ін.) з добавками органічних та неорганічних речовин (парафін, тіокол, уротропін, стеарин, ЕД-5, СКН-10-1, MnO_2 , Ni_2O_3 , KMnO_4 , V_2O_5 , CuO , Cr_2O_3 та ін.) [15, 16]. На практиці співвідношення компонентів у сумішах кількісно оцінюється коефіцієнтом надлишку окиснювача, який характеризує ступінь відхилення даної суміші від суміші стехіометричного складу:

$$\alpha = \frac{\xi_{\text{ок}}}{\xi_{\text{м}} \cdot l_c}, \quad (1)$$

де $\xi_{\text{м}}$, $\xi_{\text{ок}}$ – відносні масові вмісти у суміші відповідно металевих палих та окиснювача; l_c – стехіометричний коефіцієнт (наприклад, для суміші $\text{Mg} + \text{Ф-3}$ – $l_c \approx 0,59$, а для суміші $\text{Al} + \text{Ф-3}$ – $l_c \approx 2,2$ [15, 16]). При цьому суміші з $\alpha < 1$ вважаються перезбагаченими металевим палим, при $\alpha > 1$ – перезбагаченими окиснювачем, а у випадку $\alpha = 1$ суміш є стехіометричною. Густина сумішей характеризується коефіцієнтом ущільнення K_v , а дисперсність використовуваних промисловістю порошків окиснювачів та металевих палих – середніми розмірами частинок окиснювачів $d_{\text{ок}}$ (мкм) та металевих палих $d_{\text{м}}$ (мкм), які розраховувались за прийнятими у піротехнічній промисловості методиками [1-3]. Використовувались зразки сумішей різного діаметра D (м) без оболонок і з оболонками з різних матеріалів (мідь, сталь 12Х18Н10Т, папір). При цьому товщина оболонок становила $\Delta = 1,5 \cdot 10^{-3} \dots 2,0 \cdot 10^{-3}$ м, висота зразків $h = (1,5 \dots 2,0) \cdot D$.

Дослідження процесів займання і горіння зразків сумішей проводились на стандартному піротехнічному обладнанні [16, 25, 26].

Згідно з проведеними дослідженнями по займанню та горінню піротехнічних сумішей [16, 26] для запалювання зразків сумішей використовувались ніхромові спіралі двох видів,

циліндричні та плоскі, а також навішування зерненого спалахного складу, поміщені у спалахній камері пірогенного типу, сопло якої направлено на поверхню зразка, або розташовані у перкалевому мішечку безпосередньо біля торця зразка. Як зернене навішування використовувались спеціальний піротехнічний склад, димний порошок ДРП або гвинтівковий порошок ВТ. При цьому час запалювання та розповсюдження полум'я по всій поверхні зразка при підпалі спіралями у 1...3 рази вищий, ніж при використанні зерненого навішування.

Швидкість горіння u (лінійна швидкість, м/с) зразків сумішей вимірювалась за допомогою безконтактних методів, що широко використовуються у піротехніці [17, 26], з використанням стандартних датчиків оптичного та теплового випромінювання, які дозволяють реєструвати початок та закінчення горіння зразка заввишки h . Тоді середні значення швидкості горіння зразка визначаються за формулою $u = \frac{h}{\tau}$, де τ – середній час згоряння зразка. Відносна похибка вимірювання u не перевищувала 5...7 %.

В результаті проведених експериментальних досліджень для робочих діапазонів зміни технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача α , відносного вмісту органічних та неорганічних речовин ε , середнього розміру частинок порошків металевих палих $d_{\text{м}}$ (мкм) та окиснювача $d_{\text{ок}}$ (мкм), коефіцієнта ущільнення K_v , D (м) та матеріалу оболонки), а також зовнішніх чинників (температури нагріву T_0 (К), зовнішнього тиску P (Па)) для сумішей були визначені їх концентраційні межі горіння $\alpha_{\text{ВМГ}}$ та $\alpha_{\text{НМГ}}$ ($\alpha_{\text{ВМГ}}$ – верхня концентраційна межа горіння (максимально припустимий вміст металевих палих у суміші, при якому процес горіння має стійкий характер), $\alpha_{\text{НМГ}}$ – нижня концентраційна межа горіння (максимальний вміст окиснювача у суміші, при якому процес горіння не затухає)).

Результати досліджень. Для знаходження концентраційних меж горіння (меж горіння по α): верхніх концентраційних меж горіння $\alpha_{\text{ВМГ}}$ і нижніх концентраційних меж горіння $\alpha_{\text{НМГ}}$ ($\alpha_{\text{ВМГ}} < \alpha < \alpha_{\text{НМГ}}$) використовувались перехідні суміші, що складаються з тих самих компонентів, що й основні, але з меншим надлишком металевих палих (при знаходженні $\alpha_{\text{ВМГ}}$) або з його великим вмістом (при знаходженні $\alpha_{\text{НМГ}}$). При цьому

для визначення $\alpha_{BMГ}$ (аналогічно α_{HMG}) використовувалась формула [2, 20]

$$\xi_{BMГ} = \frac{\xi_{M1} + \xi_{M2}}{2}, \quad (2)$$

де ξ_{M1} – відносний масовий вміст металевого пального, при якому вже не горить жоден з узятих для дослідження зразків; ξ_{M2} – відносний масовий вміст металевого пального, при якому ще згоряють усі зразки; $\xi_{BMГ}$ – відносний масовий вміст металевого пального у системі, відповідний $\alpha_{BMГ}$.

З метою дослідження загального характеру поведінки залежностей $u(\alpha, d_m, d_{ок})$ (мкм), K_y, D (м), матеріал оболонки та $u(\varepsilon, T_0, P)$ для сумішей при досліджуваних значеннях технологічних параметрів та зовнішніх чинників зазначені залежності досліджувались в діапазоні зміни α : $\alpha_{BMГ} < \alpha < \alpha_{HMG}$ (рисунки 2-9), що забезпечувало стабільність процесу горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій.

Експериментальні криві будувалися з використанням сучасних методів регресійного та кореляційного аналізів.

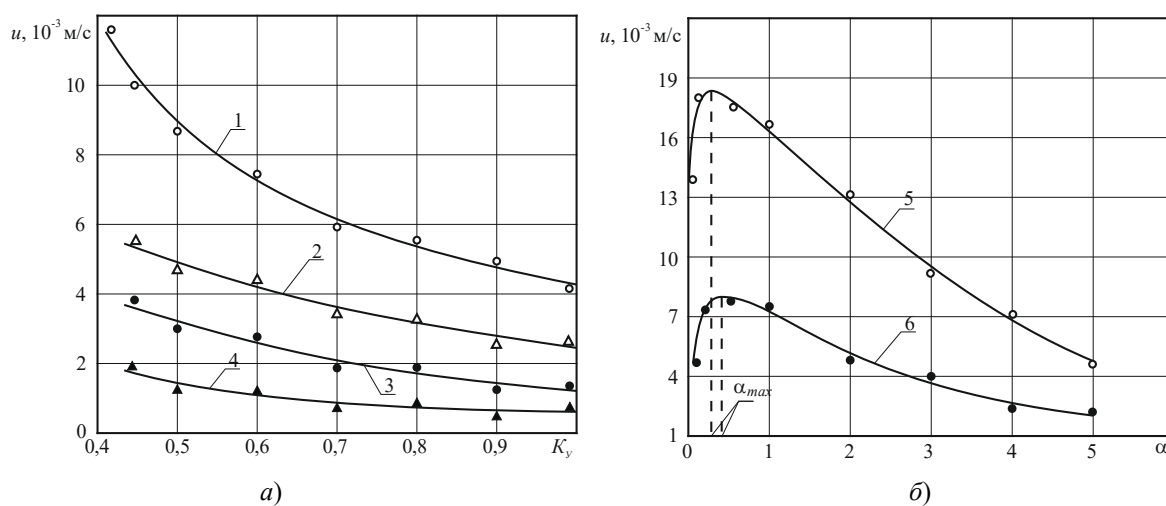


Рисунок 2. Залежності швидкості горіння сумішей Mg + Ф-3 від коефіцієнта ущільнення (α) та коефіцієнта надлишку окиснювача (δ) ($d_{ок} = 110...180$ мкм; $D = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м; оболонка паперова; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па): а) $d_m = 135$ мкм; 1 – $\alpha = 0,6$; 2 – $\alpha = 1,0$; 3 – $\alpha = 1,7$; 4 – $\alpha = 3,0$; б) – $K_y = 0,95...0,96$; 5 – $d_m = 74,5$ мкм; $\alpha_{max} = 0,21$; 6 – $d_m = 135$ мкм; $\alpha_{max} = 0,32$; $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle$ – експериментальні дані

Обговорення результатів. В результаті проведених експериментальних досліджень впливу коефіцієнта надлишку окиснювача, дисперсності металевого пального, коефіцієнта ущільнення, діаметра та матеріалу оболонки зразка суміші на швидкість горіння встановлено наступні закономірності.

Суміш Mg + Ф-3. При збільшенні K_y від 0,45 до 0,98 швидкість горіння сумішей зменшується у 2,0...2,5 разу. Зростання α від 0,6 до 3,0 приводить до зменшення швидкості горіння сумішей у 3,2...4,3 разу та послаблення залежності $u(K_y)$ у 1,4...1,5 разу (рисунок 2, а).

Встановлено такі концентраційні межі горіння сумішей: $\alpha_{BMГ} = 0,15$ (верхня концентраційна межа горіння – граничний вміст металевого пального у суміші) та $\alpha_{HMG} = 5,0$ (нижня концентраційна межа горіння – граничний вміст окиснювача у суміші), в межах яких ($\alpha_{BMГ} < \alpha < \alpha_{HMG}$, $\alpha_{BMГ} < 1$ та $\alpha_{HMG} > 1$) здійснюється стійкий, невибухонебезпечний роз-

виток процесу горіння сумішей (рисунки 2, б, 3, а, 3, б). Криві $u(\alpha)$ мають максимум u_{max} при $\alpha = \alpha_{max}$, положення якого суттєво залежить від таких важливих технологічних параметрів, як дисперсність металевого пального, діаметр зразка суміші та матеріал його оболонки. Так, при збільшенні d_m від 74,5 мкм до 135 мкм значення α_{max} зростають від 0,21 до 0,32 (у бік надлишку окиснювача); при цьому швидкість горіння суміші зменшується у 2,3...2,5 разу, а процес горіння стає більш стабільним, стійким до зовнішніх впливів. Зменшення D від $2,8 \cdot 10^{-2}$ м до $2,3 \cdot 10^{-2}$ м призводить вже до зменшення α_{max} від 0,32 до 0,18 (у бік надлишку металевого пального) та зростання швидкості горіння суміші в 1,7...1,9 разу, що дестабілізує процес горіння та робить його нестійким при деяких критичних значеннях D^* : суміші, які запресовані у картонні оболонки з діаметром, меншим $(1,8...2,0) \cdot 10^{-2}$ м, не горять (тиск атмосферний,

$d_{ок} < 180...200$ мкм). Перехід від менш теплопровідної оболонки до більш теплопровідної призводить до помітного збільшення α_{max} і u_{max} : $\alpha_{max} = 0,32$ і $u_{max} = 7,8 \cdot 10^{-3}$ м/с (оболонка паперова); $\alpha_{max} = 0,45$ і $u_{max} = 8,9 \cdot 10^{-3}$ м/с (оболонка сталевая (сталь 12Х18Н10Т)); $\alpha_{max} = 0,51$ і $u_{max} = 10,3 \cdot 10^{-3}$ м/с (оболонка мідна); $\alpha_{max} = 0,63$ і $u_{max} = 12,3 \cdot 10^{-3}$ м/с (без оболонки), тобто суттєве зміщення α_{max} відбувається у бік надлиш-

ку окиснювача (більш ніж в 1,5...2 рази), а швидкість горіння суміші збільшується в 1,4...1,7 рази, отже, заміна оболонки на більш теплопровідну (наприклад, паперову на мідну) і, тим більше, відсутність оболонки у зразків сумішей призводить як до суттєвого збільшення швидкості горіння суміші, так і до нестійкості, вибухонебезпечного розвитку процесу її горіння.

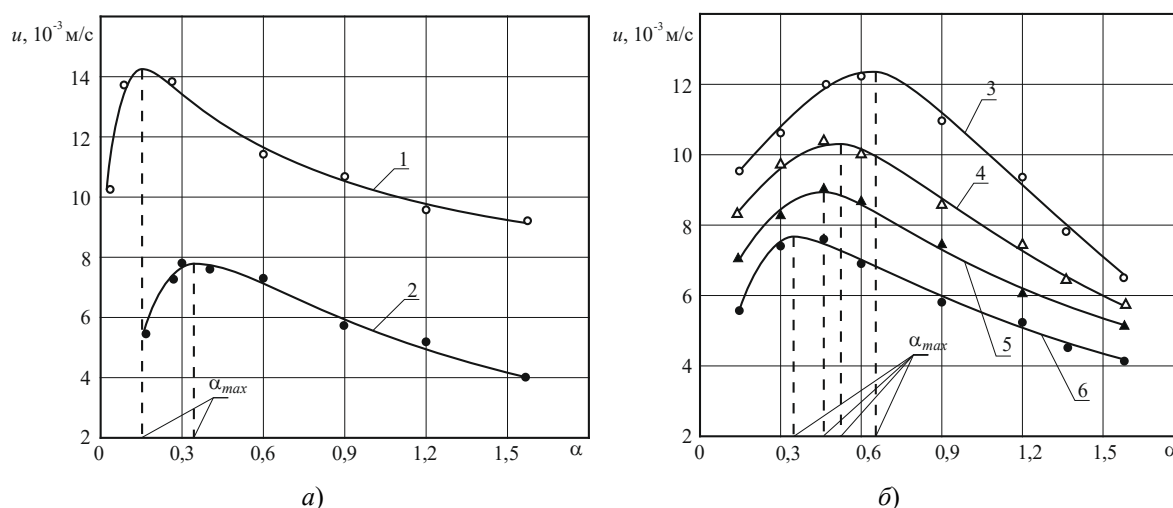


Рисунок 3. Вплив діаметра (а) та матеріалу оболонки (б) зразка суміші Mg + Ф-3 на залежність швидкості її горіння від коефіцієнта надлишку окиснювача ($d_m = 135$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_y = 0,95...0,96$; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па): а) оболонка паперова; 1 – $D = 2,3 \cdot 10^{-2}$ м; $\alpha_{max} = 0,18$; 2 – $D = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м; $\alpha_{max} = 0,32$; б) $D = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м; 3 – зразок без оболонки; $\alpha_{max} = 0,63$; 4 – зразок з мідною оболонкою; $\alpha_{max} = 0,51$; 5 – зразок зі сталевую оболонкою (сталь 12Х18Н10Т); $\alpha_{max} = 0,45$; 6 – зразок з паперовою оболонкою; $\alpha_{max} = 0,32$; $\circ$, $\bullet$, Δ , $\blacktriangle$ – експериментальні дані

Суміш Al + Ф-3. При зростанні K_y від 0,45 до 0,98 швидкість горіння сумішей убавляє в 1,6...1,9 рази, а збільшення d_m від 56 мкм до 179 мкм приводить до зменшення швидкості горіння у 2,5...3,2 рази та послаблення залежності $u(K_y)$ у 1,2...1,3 рази (рисунок 4, а).

Отримано такі концентраційні межі горіння сумішей: $\alpha_{ВМГ} = 0,26$ і $\alpha_{НМГ} = 1,4$, в межах яких ($\alpha_{ВМГ} < \alpha < \alpha_{НМГ}$) здійснюється стійкий, стабільний розвиток процесу горіння сумішей (рисунки 4, б, 5, а, 5, б). Залежності $u(\alpha)$ також мають максимум u_{max} при $\alpha = \alpha_{max}$, положення якого суттєво залежить від таких технологічних параметрів: дисперсності металевго пального, діаметра зразка суміші та матеріалу його оболонки. Встановлено, що при збільшенні d_m від 56 мкм до 179 мкм значення α_{max} зростають від 0,28 до 0,35 (у бік надлишку окиснювача), а швидкість горіння суміші зменшується у 2,1...2,4 рази, при цьому процес горіння стає більш стабільним і стійким. Зменшення D від $2,8 \cdot 10^{-2}$ м до $2,3 \cdot 10^{-2}$ м

призводить до зменшення α_{max} від 0,35 до 0,23 (у бік надлишку металевго пального) і збільшення швидкості горіння суміші в 1,5...1,7 рази, що зменшує стабільність та стійкість її процесу горіння. Встановлено також критичні значення $D^* = (1,5...1,7) \cdot 10^{-2}$ м (оболонка паперова; $P = 10^5$ Па; $d_{ок} < 180...200$ мкм), при менших значеннях D суміші не горять. Отримано, що заміна менш теплопровідної оболонки на більш теплопровідну призводить до збільшення α_{max} та u_{max} : $\alpha_{max} = 0,35$ і $u_{max} = 1,9 \cdot 10^{-3}$ м/с (оболонка паперова); $\alpha_{max} = 0,49$ і $u_{max} = 2,1 \cdot 10^{-3}$ м/с (оболонка сталевая (сталь 12Х18Н10Т)); $\alpha_{max} = 0,57$ та $u_{max} = 2,4 \cdot 10^{-3}$ м/с (оболонка мідна); $\alpha_{max} = 0,69$ і $u_{max} = 2,9 \cdot 10^{-3}$ м/с (без оболонки). Таким чином, при переході до більш теплопровідної оболонки (наприклад, від паперової до мідної) або взагалі за відсутності оболонки значення α_{max} зростають у бік надлишку окиснювача в 1,3...1,8 рази, а швидкість горіння сумішей збільшується в 1,3...1,5 рази, що призводить

до зниження стабільності та підвищення чутливості процесу їх горіння до різного роду

зовнішніх впливів (підвищених температур нагріву, зовнішніх тисків та ін.).

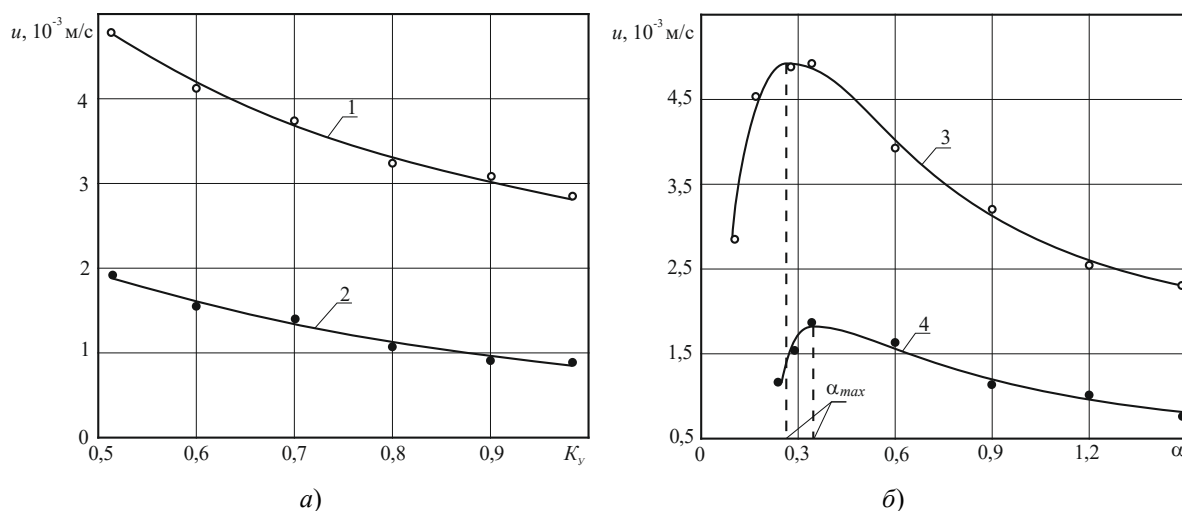


Рисунок 4. Залежності швидкості горіння сумішей Al + Ф-3 від коефіцієнта ущільнення (а) та коефіцієнта надлишку окиснювача (б) ($d_{ок} = 110...180$ мкм; $D = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м; оболонка паперова; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па): а) $\alpha = 1,2$; 1 – $d_m = 56$ мкм; 2 – $d_m = 179$ мкм; б) $K_y = 0,95...0,96$; 3 – $d_m = 56$ мкм; $\alpha_{max} = 0,28$; 4 – $d_m = 179$ мкм; $\alpha_{max} = 0,35$; $\circ$, $\bullet$ – експериментальні дані

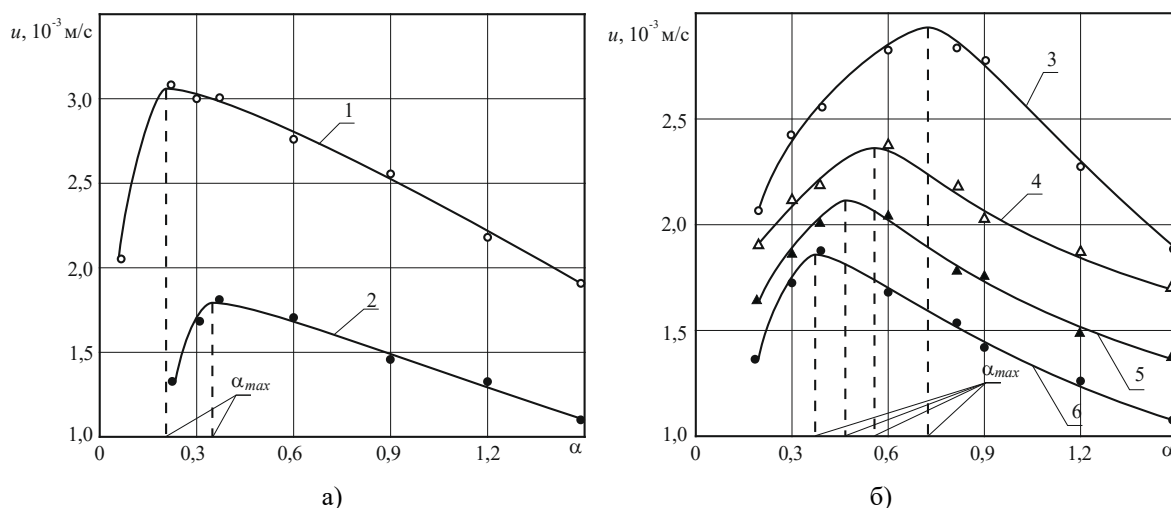


Рисунок 5. Вплив діаметра (а) та матеріалу оболонки (б) зразка суміші Al + Ф-3 на залежність швидкості її горіння від коефіцієнта надлишку окиснювача ($d_m = 179$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_y = 0,95...0,96$; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па): а) оболонка паперова; 1 – $D = 2,3 \cdot 10^{-2}$ м; $\alpha_{max} = 0,23$; 2 – $D = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м; $\alpha_{max} = 0,35$; б) $D = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м; 3 – зразок без оболонки; $\alpha_{max} = 0,69$; 4 – зразок з мідною оболонкою; $\alpha_{max} = 0,57$; 5 – зразок зі сталеву оболонкою (сталь 12Х18Н10Т); $\alpha_{max} = 0,49$; 6 – зразок з паперовою оболонкою; $\alpha_{max} = 0,35$; $\circ$, $\bullet$, Δ , $\blacktriangle$ – експериментальні дані

В результаті проведених досліджень впливу підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків на швидкість горіння сумішей Mg, Al + Ф-3 для різних значень коефіцієнта надлишку окиснювача, а також на залежності швидкості горіння сумішей Mg, Al + Ф-3 + добавка від величини та природи органічної або неорганічної речовини встановлено наступні закономірності.

Суміш Mg + Ф-3. При підвищенні T_0 від 293 К до 873 К швидкість горіння сумішей зростає в 1,8...2,7 разу (рисунок 6, а). При цьому зі збільшенням α від 0,6 до 2,5 швидкість горіння сумішей зменшується в 1,6...2 рази, а залежність $u(T_0)$ підсилюється в 1,3...1,5 разу (таблиця 1).

При зростанні P від 10^5 Па до 10^7 Па швидкість горіння сумішей збільшується у

2,5...3 рази (рисунк 6, б). Зі збільшенням α від 0,6 до 2,5 швидкість горіння сумішей зменшується вже у 2,1...3 рази, а залежність $u(P)$ підсилюється в 1,4...1,6 разу (таблиця 2).

Суміш Mg + Ф-3 + добавка органічної речовини. Збільшення відносного вмісту добавки ε від 0,02 до 0,13 при $T_0 = 293$ К ($P = 10^5$ Па) приводить до зменшення швид-

кості горіння сумішей в 1,4...3,6 разу (рисунк 7, а): у 3,4...3,6 разу (для добавок СКН-10-1); у 2,5...2,8 разу (для добавок ЕД-5); у 2,0...2,2 разу (для добавок стеарину); в 1,7...1,9 разу (для добавок уротропіну); в 1,5...1,6 разу (для добавок тіоколу); в 1,3...1,4 разу (для добавок парафіну).

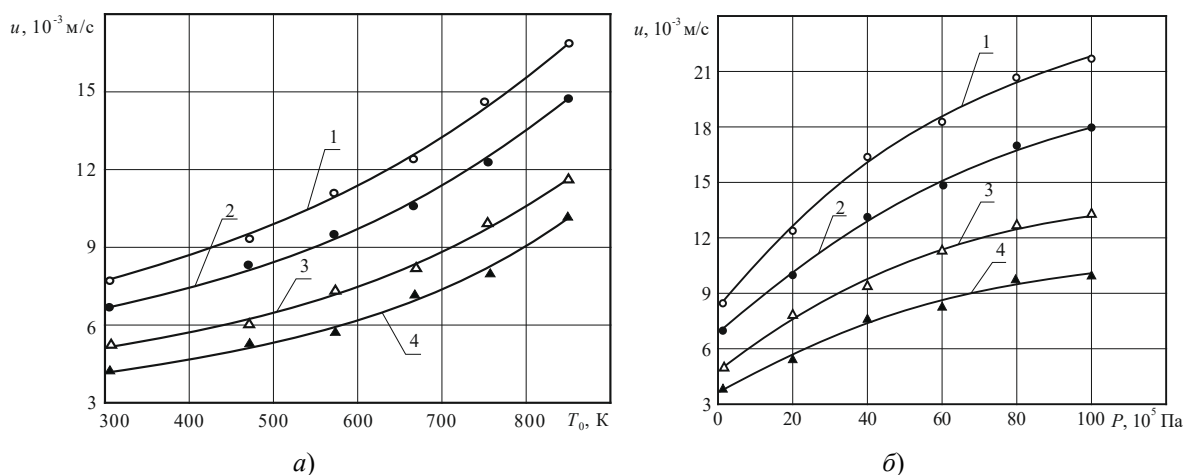


Рисунок 6. Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача на залежності швидкості горіння сумішей Mg + Ф-3 від температури нагріву (а) та зовнішнього тиску (б) ($d_m = 135$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_y = 0,95...0,96$): 1 – $\alpha = 0,6$; 2 – $\alpha = 1,2$; 3 – $\alpha = 2,0$; 4 – $\alpha = 2,5$; а) $P = 10^5$ Па; б) $T_0 = 293$ К;

○, ●, △, ▲ – експериментальні дані

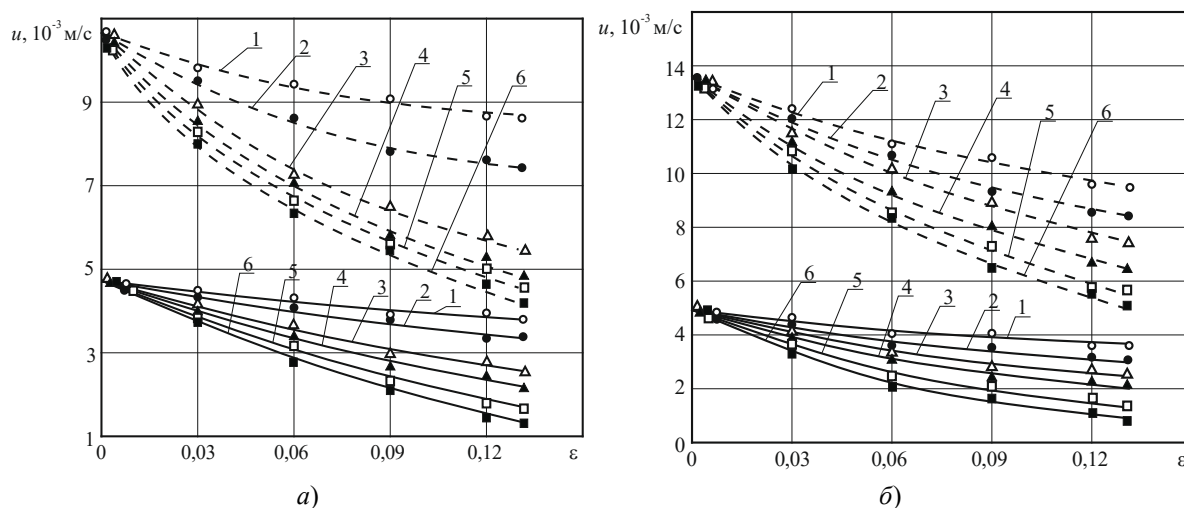


Рисунок 7. Вплив підвищених температур нагріву (а) та зовнішніх тисків (б) на залежності швидкості горіння сумішей Mg + Ф-3 від величини добавок органічних речовин ($\alpha = 2,0$; $d_m = 135$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_y = 0,95...0,96$): 1 – парафін; 2 – тіокол; 3 – уротропін; 4 – стеарин; 5 – ЕД-5; 6 – СКН-10-1; а) $P = 10^5$ Па; — — — $T_0 = 293$ К; — — — — $T_0 = 873$ К; б) $T_0 = 293$ К; — — — — $P = 10^5$ Па; — — — — $P = 10^7$ Па; ○, ●, △, ▲, ■, □ – експериментальні дані

При підвищенні T_0 (до 873 К) при $P = 10^5$ Па швидкість горіння сумішей зменшується вже в 1,3...3,5 разу: у 3,2...3,5 разу (для добавок СКН-10-1); у 2,3...2,7 разу (для добавок ЕД-5); в 1,9...2,1 разу (для добавок

стеарину); в 1,6...1,8 разу (для добавок уротропіну); в 1,4...1,5 разу (для добавок тіоколу); в 1,2...1,3 разу (для добавок парафіну). При зростанні P (до 10^7 Па) при $T_0 = 293$ К швидкість горіння сумішей зі збільшенням ε

(до $\varepsilon = 0,13$) також зменшується у 2,3...5,7 разу (рисунк 7, б): у 5,3...5,7 разу (для добавок СКН-10-1); у 4,2...4,5 разу (для добавок ЕД-5); у 3,4...3,8 разу (для добавок стеарину); у 3,1...3,3 разу (для добавок уротропіну); у 2,7...2,9 разу (для добавок тіоколу); у 2,3...2,5 разу (для добавок парафіну).

Таблиця 1. Залежність відносної швидкості горіння $\bar{u}$ суміші Mg + Ф-3 від коефіцієнта надлишку окиснювача ($d_m = 135$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_y = 0,95...0,96$; $P = 10^5$ Па)

α	0,6	1,2	2,0	2,5
$\bar{u}$	1,8	2,1	2,4	2,7

Примітка. Відносна швидкість горіння $\bar{u} = \frac{u|_{T_0=873\text{ К}}}{u|_{T_0=293\text{ К}}}$, де $u|_{T_0=293\text{ К}}$ – швидкість горіння при $T_0 = 293$ К; $u|_{T_0=873\text{ К}}$ – швидкість горіння при $T_0 = 873$ К

Таблиця 2. Залежність відносної швидкості горіння $\bar{u}$ суміші Mg + Ф-3 від коефіцієнта надлишку окиснювача ($d_m = 135$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_y = 0,95...0,96$; $T_0 = 293$ К)

α	0,6	1,2	2,0	2,5
$\bar{u}$	2,1	2,5	2,7	3,0

Примітка. Відносна швидкість горіння $\bar{u} = \frac{u|_{P=10^7\text{ Па}}}{u|_{P=10^5\text{ Па}}}$, де $u|_{P=10^5\text{ Па}}$ – швидкість горіння при $P = 10^5$ Па; $u|_{P=10^7\text{ Па}}$ – швидкість горіння при $P = 10^7$ Па

Вплив досліджуваних добавок органічних речовин у суміш Mg + Ф-3 на залежність $u(\varepsilon)$ при підвищених P (до 10^7 Па) в 1,5...1,9 разу сильніший, ніж при підвищених T_0 (до 873 К). Крім цього, при підвищених T_0 залежність $u(\varepsilon)$ послаблюється в 1,3...1,4 разу, а при підвищених P залежність $u(\varepsilon)$ вже підсилюється в 1,5...1,8 разу.

Таким чином, як при нормальних зовнішніх умовах ($T_0 = 293$ К, $P = 10^5$ Па), так і при підвищених T_0 (до 873 К) та P (до 10^7 Па) органічні речовини за ступенем їх впливу на швидкість горіння сумішей Mg + Ф-3 розташовуються у вигляді такої послідовності:

СКН-10-1 > ЕД-5 > стеарин > уротропін > тіокол > парафін. (3)

Суміш Al + Ф-3. При зростанні T_0 від 293 К до 873 К швидкість горіння сумішей збільшується в 1,7...2,3 разу (рисунк 8, а). Зі

збільшенням α від 0,6 до 1,4 швидкість горіння сумішей зменшується в 1,4...1,8 разу, а залежність $u(T_0)$ підсилюється в 1,3...1,4 разу (таблиця 3).

Таблиця 3. Залежність відносної швидкості горіння $\bar{u}$ суміші Al + Ф-3 від коефіцієнта надлишку окиснювача ($d_m = 179$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_y = 0,95...0,96$; $P = 10^5$ Па)

α	0,6	0,9	1,2	1,4
$\bar{u}$	1,6	1,9	2,1	2,3

При збільшенні P від 10^5 Па до 10^7 Па швидкість горіння сумішей зростає в 1,9...2,5 разу (рисунк 8, б). Зі зростанням α від 0,6 до 1,4 швидкість горіння сумішей зменшується в 1,5...1,9 разу, а залежність $u(P)$ підсилюється в 1,5...1,6 разу (таблиця 4).

Таблиця 4. Залежність відносної швидкості горіння $\bar{u}$ суміші Al + Ф-3 від коефіцієнта надлишку окиснювача ($d_m = 179$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_y = 0,95...0,96$; $T_0 = 293$ К)

α	0,6	0,9	1,2	1,4
$\bar{u}$	1,9	2,1	2,3	2,4

Суміш Al + Ф-3 + добавка неорганічної речовини. Збільшення відносного вмісту добавки ε від 0,02 до 0,10 при $T_0 = 293$ К ($P = 10^5$ Па) призводить як до зменшення швидкості горіння сумішей (для добавок CuO та Cr_2O_3), так і до її збільшення (для добавок MnO_2 , Ni_2O_3 , KMnO_4 та V_2O_5) (рисунк 9, а): в 1,2 разу (для добавок CuO); в 1,4 разу (для добавок Cr_2O_3); в 1,2 разу (для добавок V_2O_5); в 1,3 разу (для добавок KMnO_4); в 1,5 разу (для добавок Ni_2O_3); в 1,7 разу (для добавок MnO_2). Зростання T_0 (до 873 К) при $P = 10^5$ Па та $\varepsilon = 0,02...0,10$ призводить до таких змін швидкості горіння сумішей: до зменшення швидкості горіння в 1,3 разу (для добавок CuO) та в 1,5 разу (для добавок Cr_2O_3); до збільшення швидкості горіння в 1,3 разу (для добавок V_2O_5); в 1,4 разу (для добавок KMnO_4); в 1,6 разу (для добавок Ni_2O_3) та в 1,8 разу (для добавок MnO_2).

При збільшенні P (до 10^7 Па) при $T_0 = 293$ К швидкість горіння сумішей зі зростанням ε (до $\varepsilon = 0,10$) також змінюється (рисунк 9, б): зменшується в 1,15 разу (для до-

бавок CuO) та в 1,2 разу (для добавок Cr_2O_3); збільшується в 1,1 разу (для добавок V_2O_5); в

1,2 разу (для добавок KMnO_4); в 1,4 разу (для добавок Ni_2O_3) і в 1,6 разу (для добавок MnO_2).

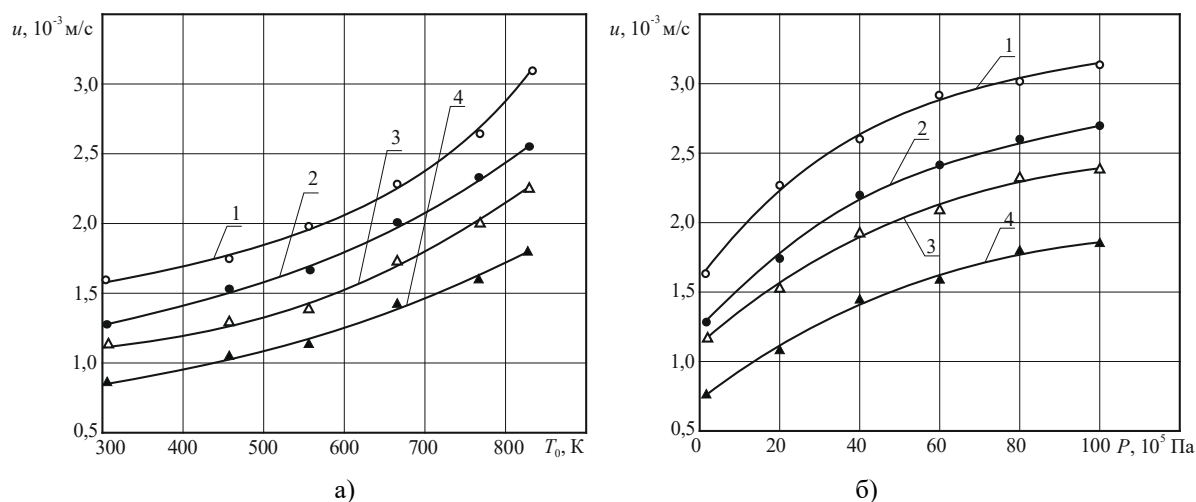


Рисунок 8. Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача на залежності швидкості горіння сумішей $\text{Al} + \Phi\text{-3}$ від температури нагріву (а) та зовнішнього тиску (б) ($d_m = 179$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_y = 0,95...0,96$): 1 – $\alpha = 0,6$; 2 – $\alpha = 0,9$; 3 – $\alpha = 1,2$; 4 – $\alpha = 1,4$; а) $P = 10^5$ Па; б) $T_0 = 293$ К; $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle$ – експериментальні дані

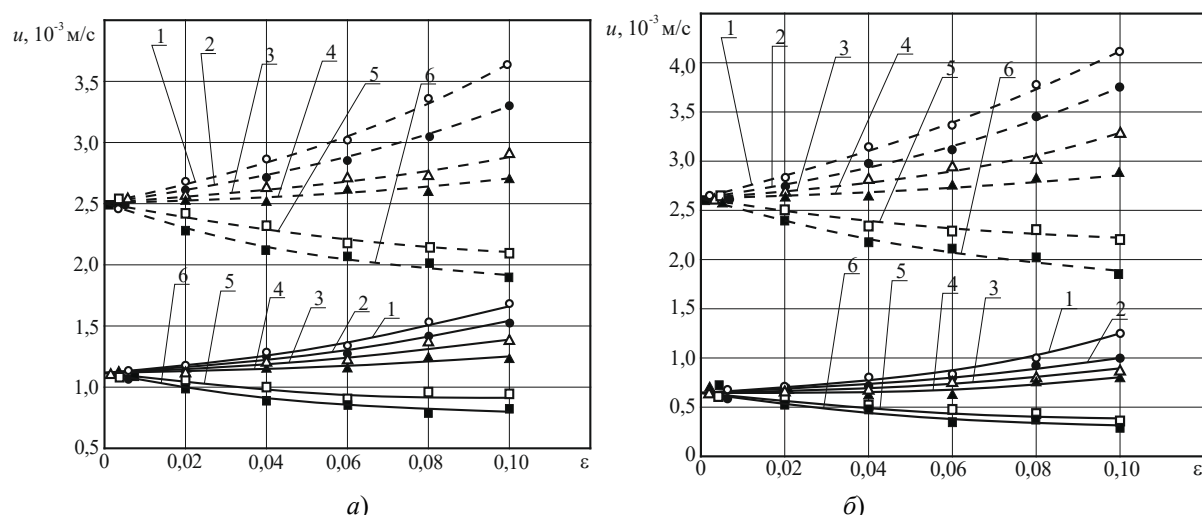


Рисунок 9. Вплив підвищених температур нагріву (а) та зовнішніх тисків (б) на залежності швидкості горіння сумішей $\text{Al} + \Phi\text{-3}$ від величини добавок неорганічних речовин ($\alpha = 1,2$; $d_m = 179$ мкм; $d_{ок} = 110...180$ мкм; $K_y = 0,95...0,96$): 1 – MnO_2 ; 2 – Ni_2O_3 ; 3 – KMnO_4 ; 4 – V_2O_5 ; 5 – CuO ; 6 – Cr_2O_3 ; а) $P = 10^5$ Па; — — — $T_0 = 293$ К; — — — $T_0 = 873$ К; б) $T_0 = 293$ К; — — — $P = 10^5$ Па; — — — $P = 10^7$ Па; $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle, \blacksquare$ – експериментальні дані

Таким чином, для сумішей $\text{Al} + \Phi\text{-3}$ ступінь впливу підвищених T_0 та P на характер залежностей $u(\epsilon)$ діаметрально протилежний: при підвищених T_0 (до 873 К) залежність $u(\epsilon)$ підсилюється в 1,2...1,3 разу, а для підвищених зовнішніх тисків (до 10^7 Па) – послаблюється в 1,1...1,2 разу.

Як при нормальних зовнішніх умовах ($T_0 = 293$ К, $P = 10^5$ Па), так і при підвищених T_0 (до 873 К) та P (до 10^7 Па) неорганічні ре-

човини за ступенем їх впливу на швидкість горіння сумішей $\text{Al} + \Phi\text{-3}$ розташовуються у вигляді наступних послідовностей:

за ступенем зменшення швидкості горіння

$$\text{Cr}_2\text{O}_3 > \text{CuO}; \quad (4)$$

за ступенем зростання швидкості горіння

$$\text{MnO}_2 > \text{Ni}_2\text{O}_3 > \text{KMnO}_4 > \text{V}_2\text{O}_5. \quad (5)$$

На завершення слід відзначити, що на стадії виготовлення піротехнічних металізо-

ваних сумішей на основі фторопластів шляхом регулювання технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення, діаметра зарядів сумішей та матеріалу їх оболонки) можна попереджати передчасний вибухонебезпечний розвиток горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних впливів (наприклад, при пожежах у складських приміщеннях, де зберігаються піротехнічні вироби на основі зазначених сумішей, при їх транспортуванні в умовах зовнішнього нагріву, при термоударних впливах в умовах пострілу та польоту виробів та ін.), що дозволяє підвищувати пожежну безпеку виробів у цих умовах.

Висновки. На основі проведених експериментальних досліджень закономірностей впливу технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача α , коефіцієнта ущільнення K_Y , середнього розміру частинок металевго пального d_m , діаметра зразка суміші D та матеріалу його оболонки (паперова, сталев, мідна)) і зовнішніх умов (підвищених температур нагріву T_0 та зовнішніх тисків P) на швидкість розвитку процесу горіння дво- та трикомпонентних сумішей Mg, Al + Φ -3 + добавка органічної та неорганічної речовини отримано наступні нові результати.

1. Для сумішей Mg + Φ -3:

- встановлено верхню концентраційну межу горіння $\alpha_{ВМГ} = 0,15$ та нижню концентраційну межу горіння $\alpha_{НМГ} = 5,0$, в межах яких ($\alpha_{ВМГ} < \alpha < \alpha_{НМГ}$) відбувається стійке, невибухонебезпечне протікання процесу горіння сумішей;
- отримано, що при збільшенні K_Y від 0,45 до 0,98 швидкість горіння сумішей зменшується у 2,0...2,5 разу; при цьому зі зростанням α від 0,6 до 3,0 швидкість горіння сумішей зменшується у 3,2...4,3 разу, а залежність $u(K_Y)$ послаблюється в 1,4...1,5 разу;
- встановлено, що криві $u(\alpha)$ мають максимум u_{max} при $\alpha = \alpha_{max}$, положення якого суттєво залежить від технологічних параметрів (d_m , D та теплопровідності матеріалу оболонки): при збільшенні d_m від 74,5 мкм до 135 мкм значення α_{max} зростають від 0,21 до 0,32 (у бік надлишку окиснювача), а швидкість горіння суміші зменшується у 2,3...2,5 разу; зменшення D від $2,8 \cdot 10^{-2}$ м до $2,3 \cdot 10^{-2}$ м сприяє зменшенню α_{max} від 0,32 до 0,18 (у бік надлишку металевго пального) та зростанню швидкості горіння суміші в 1,7...1,9 разу; встановлено критичні значення $D = D^* = (1,8...2,0) \cdot 10^{-2}$ м (для

картонних оболонок), нижче яких суміші вже не горять; перехід від менш теплопровідної оболонки до більш теплопровідної призводить до збільшення α_{max} та u_{max} від 0,32 та $7,8 \cdot 10^{-3}$ м/с (для паперової оболонки), 0,45 та $8,9 \cdot 10^{-3}$ м/с (для сталевго оболонки), 0,51 та $10,3 \cdot 10^{-3}$ м/с (для мідної оболонки), 0,63 та $12,3 \cdot 10^{-3}$ м/с (без оболонки);

- встановлено, що підвищення T_0 від 293 К до 873 К призводить до зростання швидкості горіння сумішей в 1,8...2,7 разу; при цьому зі збільшенням α від 0,6 до 2,5 швидкість горіння сумішей зменшується в 1,6...2 рази, а залежність $u(T_0)$ підсилюється в 1,3...1,5 разу;
- отримано, що зі зростанням P від 10^5 Па до 10^7 Па швидкість горіння сумішей збільшується у 2,5...3 рази; при цьому збільшення α від 0,6 до 2,5 призводить до зменшення швидкості горіння сумішей у 2,1...3 рази та підсилення залежності $u(P)$ в 1,4...1,6 разу.

2. Для сумішей Al + Φ -3:

- отримано концентраційні межі горіння сумішей $\alpha_{ВМГ} = 0,26$ та $\alpha_{НМГ} = 1,4$, в межах яких ($\alpha_{ВМГ} < \alpha < \alpha_{НМГ}$) процес їх горіння протікає стабільно і стійко до зовнішніх впливів;
- встановлено, що зі збільшенням K_Y від 0,45 до 0,98 швидкість горіння сумішей зменшується в 1,6...1,9 разу, а зростання d_m від 56 мкм до 179 мкм призводить до зменшення швидкості горіння сумішей у 2,5...3,2 разу та послаблення залежності $u(K_Y)$ в 1,2...1,3 разу;
- отримано, що залежності $u(\alpha)$ також мають екстремальний характер з максимумами u_{max} при $\alpha = \alpha_{max}$, положення яких залежить від технологічних параметрів (d_m , D та теплопровідності матеріалу оболонки): зростання d_m від 56 мкм до 179 мкм призводить до збільшення α_{max} від 0,28 до 0,35 (у бік надлишку окиснювача), а швидкість горіння суміші зменшується у 2,1...2,4 разу; зі зменшенням D від $2,8 \cdot 10^{-2}$ м до $2,3 \cdot 10^{-2}$ м α_{max} знижується від 0,35 до 0,23 (у бік надлишку металевго пального), а швидкість горіння збільшується в 1,5...1,7 разу; при цьому встановлено критичні значення $D = D^* = (1,5...1,7) \cdot 10^{-2}$ м (оболонка паперова), при менших значеннях D суміші не горять; заміна менш теплопровідної оболонки на більш теплопровідну призводить до збільшення α_{max} та u_{max} : від 0,35 та $1,9 \cdot 10^{-3}$ м/с (для паперової оболонки), 0,49 та $2,1 \cdot 10^{-3}$ м/с (для сталевго оболонки), 0,57 та $2,4 \cdot 10^{-3}$ м/с (для мідної оболонки), 0,69 та $2,9 \cdot 10^{-3}$ м/с (без

оболонки) та зростання швидкості горіння сумішей в 1,3...1,5 разу;

– отримано, що зі зростанням T_0 від 293 К до 873 К швидкість горіння сумішей збільшується в 1,7...2,3 разу; при цьому збільшення α від 0,6 до 1,4 призводить до зменшення швидкості горіння сумішей в 1,4...1,8 разу та підсилення залежності $u(T_0)$ в 1,3...1,4 разу;

– встановлено, що з підвищенням P від 10^5 Па до 10^7 Па швидкість горіння сумішей збільшується в 1,9...2,5 разу; зі збільшенням α від 0,6 до 1,4 швидкість горіння сумішей зменшується в 1,5...1,9 разу, а залежність $u(P)$ підсилюється в 1,5...1,6 разу.

3. Для сумішей Mg + Ф-3 + добавка органічної речовини встановлено:

– зі збільшенням відносного вмісту ε добавок СКН-10-1, ЕД-5, стеарину, уротропіну, тіоколу та парафіну від 0,02 до 0,13 швидкість горіння сумішей зменшується в 1,4...3,6 разу (при $T_0 = 293$ К та $P = 10^5$ Па), в 1,3...3,5 разу (при $T_0 = 873$ К та $P = 10^5$ Па) та у 2,3...5,7 разу: у 5,3...5,7 разу (для добавок СКН-10-1); у 4,2...4,5 разу (при $T_0 = 293$ К та $P = 10^7$ Па); при цьому при підвищенні T_0 до 873 К залежність $u(\varepsilon)$ послаблюється в 1,3...1,4 разу, а при підвищенні до 10^7 Па залежність $u(\varepsilon)$ вже підсилюється в 1,5...1,8 разу;

– як при нормальних зовнішніх умовах ($T_0 = 293$ К, $P = 10^5$ Па), так і при підвищених T_0 та P органічні речовини за ступенем їх впливу на швидкість горіння сумішей Mg + Ф-3 розташовуються у вигляді послідовності: СКН-10-1 > ЕД-5 > стеарин > уротропін > тіокол > парафін.

4. Для сумішей Al + Ф-3 + добавка неорганічної речовини отримано:

– зі збільшенням відносного вмісту ε добавок CuO та Cr_2O_3 від 0,02 до 0,10 швидкість горіння сумішей зменшується в 1,2...1,4 разу (при $T_0 = 293$ К та $P = 10^5$ Па), в 1,3...1,5 разу (при $T_0 = 873$ К та $P = 10^5$ Па) і в 1,15...1,2 разу (при $T_0 = 293$ К та $P = 10^7$ Па);

– зі зростанням відносного вмісту ε від 0,02 до 0,10 для добавок MnO_2 , Ni_2O_3 , KMnO_4 та V_2O_5 швидкість горіння збільшується в 1,2...1,7 разу (при $T_0 = 293$ К та $P = 10^5$ Па), в 1,3...1,8 разу (при $T_0 = 873$ К та $P = 10^5$ Па) і в 1,1...1,6 разу (при $T_0 = 293$ К та $P = 10^7$ Па); при підвищенні T_0 (до 873 К) залежність $u(\varepsilon)$ підсилюється в 1,2...1,3 разу, а при підвищенні P (до $P = 10^7$ Па) – послаблюється в 1,1...1,2 разу);

– незалежно від T_0 та P , неорганічні речовини за ступенем їх впливу на швидкість горіння сумішей Al + Ф-3 розташовуються у вигляді послідовностей: $\text{Cr}_2\text{O}_3 > \text{CuO}$ (зменшення швидкості горіння); $\text{MnO}_2 > \text{Ni}_2\text{O}_3 > \text{KMnO}_4 > \text{V}_2\text{O}_5$ (зростання швидкості горіння).

5. Вперше показано, що шляхом регулювання технологічних параметрів сумішей (співвідношення та природи компонентів, дисперсності металевих паливних, коефіцієнта ущільнення, діаметра зразків сумішей та коефіцієнта теплопровідності оболонок) на стадії їх виготовлення, не змінюючи тактико-технічні показники піротехнічних виробів на основі металізованих фторопластовмісних сумішей, за допомогою керованої зміни швидкості горіння сумішей (або часу дії виробів в умовах їх бойового застосування) можна попереджати нестійкі, вибухонебезпечні режими його розвитку в умовах зовнішніх термічних впливів, що призводять до передчасного пожежонебезпечного руйнування виробів.

Перспективи подальших досліджень.

Надалі планується проведення досліджень з визначення механізму і розробки математичних моделей процесу горіння ущільнених сумішей з порошків металевих паливних, фторопластів і добавок органічних та неорганічних речовин, які широко використовуються у піротехнічному виробництві, в умовах зовнішніх термічних впливів, які дозволяють визначати діапазони зміни швидкостей горіння сумішей залежно від їх технологічних параметрів та зовнішніх умов, перевищення яких призводить до нестійкого вибухонебезпечного розвитку процесу горіння сумішей і, у кінцевому підсумку, до пожежонебезпечного руйнування піротехнічних виробів на їх основі.

Список використаних джерел

- [1] В. М. Фатєєв, Ю. П. Приходько, та Л. І. Таборов, *Піротехніка*. Київ, Україна: Наукова думка, 2017.
- [2] Звіт про науково-дослідну роботу "Дослідження тенденцій і закономірностей динаміки основних показників статистики пожеж в Україні за територіальним принципом". Київ: УкрНДІЦЗ, 2018.
- [3] C. L. Mader, *Numerical modeling of explosives and propellants*. CRC Press, 2019.
- [4] J. Bai, and L. Yang, "Study on ignition characteristics of pyrotechnics with different

- binders", *Journal of Energetic Materials*, no. 37 (6), pp. 714-728, 2019.
- [5] X. Jia, X. Qi, and X. Zhang, "Ignition behavior and flame structure of multi-layered pyrotechnic systems containing nitrocellulose", *Combustion Science and Technology*, no. 193 (7), pp. 1354-1373, 2021.
- [6] M. Niu, and Q. Wang, "Experimental investigation on the combustion characteristics of composite modified double-base propellant", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, no. 137 (1), pp. 329-336, 2019.
- [7] Y. Xu, Y. Ma, and Q. Liu, "Characterization of energetic material burning rate using an improved laser shadowgraphy technique", *Journal of Propulsion and Power*, no. 34 (2), pp. 360-366, 2018.
- [8] V. Akkerman, and P. Penner, "Detonation performance of ammonium nitrate explosives", *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, no. 45 (4), pp. 546-556, 2020.
- [9] Y. Fang, S. Wang, and Y. Zhang, "Combustion behavior of composite propellants containing Al/CuO and ammonium perchlorate", *Combustion Science and Technology*, no. 191 (9), pp. 1742-1757, 2019.
- [10] 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", *Intenauka*, № 5/5799, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.inter-nauka.com>.
- [11] 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", *Intenauka*, № 5/5798, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.inter-nauka.com>.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, О. С. Барановський, та В. В. Цибулін, "Визначення вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згоряння піротехнічних нітратно-металевих сумішей при підвищених зовнішніх тисках", *Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр., вип. 19*, с. 323-332, 2018.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] О. Dibrova, О. 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.
- [19] 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 згоряння піротехнічних нітратно-металевих сумішей", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 131-142, 2020.
- [20] 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.

- [21] 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 паливо + оксид металу при зовнішніх термічних діях", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 68-82, 2021.
- [22] 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 згоряння частинок магнію та алюмінію в продуктах розкладання оксидів металів", *Цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (12), с. 111-121, 2021.
- [23] 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 Національного університету цивільного захисту України "Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація"*, т. 6, № 1, с. 29-42, 2022.
- [24] Є. Кириченко, В. Гвоздь, В. Ващенко, О. Кириченко, та О. Дядюшенко, "Попередження передчасного спрацювання 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.
- [25] 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.
- [26] 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.

References

- [1] V. M. Fateev, Yu. P. Prykhodko, and L. I. Taborov, *Pyrotechnics*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 2017 [in Ukrainian].
- [2] Report on research work "Study of trends and patterns of dynamics of the main indicators of fire statistics in Ukraine on a territorial basis". Kyiv: UkrNDICZ, 2018 [in Ukrainian].
- [3] C. L. Mader, *Numerical modeling of explosives and propellants*. CRC Press, 2019.
- [4] J. Bai, and L. Yang, "Study on ignition characteristics of pyrotechnics with different binders", *Journal of Energetic Materials*, no. 37 (6), pp. 714-728, 2019.
- [5] X. Jia, X. Qi, and X. Zhang, "Ignition behavior and flame structure of multi-layered pyrotechnic systems containing nitrocellulose", *Combustion Science and Technology*, no. 193 (7), pp. 1354-1373, 2021.
- [6] M. Niu, and Q. Wang, "Experimental investigation on the combustion characteristics of composite modified double-base propellant", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, no. 137 (1), pp. 329-336, 2019.
- [7] Y. Xu, Y. Ma, and Q. Liu, "Characterization of energetic material burning rate using an improved laser shadowgraphy technique", *Journal of Propulsion and Power*, no. 34 (2), pp. 360-366, 2018.
- [8] V. Akkerman, and P. Penner, "Detonation performance of ammonium nitrate explosives", *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, no. 45 (4), pp. 546-556, 2020.
- [9] Y. Fang, S. Wang, and Y. Zhang, "Combustion behavior of composite propellants containing Al/CuO and ammonium perchlorate", *Combustion Science and Technology*, no. 191 (9), pp. 1742-1757, 2019.
- [10] 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", *Intenauka*, no. 5/5799, 2020. [Online]. Available: <http://www.intenauka.com> [in Ukrainian].
- [11] 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", *Intenauka*, no. 5/5798, 2020. [Online]. Available: <http://www.intenauka.com> [in Ukrainian].
- [12] 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 fire extinguishing and liquidation of emergency situations*, Cherkasy: Cherkas. in-t pozhazhnoyi bezpeky im. Heroyiv Chornobylya, 2020 [in Ukrainian].
- [13] V. M. Marych, V. V. Kovalyshyn, and Ya. B. Kyryliv, "Optimization of fire extinguishing powders for magnesium extinguishing", in *Proc. Int. Sci. and Pract. Conf. Theory and practice of fire extinguishing and liquidation of emergency situations*, Cherkasy, 2018 [in Ukrainian].
- [14] V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, T. M. Voitovych, and B. M. Husar, "Use of environmentally friendly fire extinguishers", in *Proc. Int. Sci. and Pract. Conf. Environmental safety as the basis of sustainable development of society. European experience and perspectives*, DUBZD, 2018 [in Ukrainian].
- [15] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, O. C. Baranovskyi, 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. coll. of sci. papers*, iss. 19, pp. 323-332, 2018 [in Ukrainian].
- [16] 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.
- [17] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, 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 universytetu*, no. 3, pp. 56-67, 2019 [in Ukrainian].
- [18] O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrichuk, 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.
- [19] R. B. Motrichuk, O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, T. I. Butenko, Yu. 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 universytetu*, no. 4, pp. 131-142, 2020 [in Ukrainian].
- [20] 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 pozhazhnoyi bezpeky im. Heroyiv Chornobylya Natsionalnoho universytetu tsyvilnoho zakhystu Ukrainy "Nadzvychayni sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya"*, vol. 5, no. 2, pp. 37-51, 2021 [in Ukrainian].
- [21] Ye. P. Kyrychenko, V. V. Kovalyshyn, V. M. Gvozdz, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, 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 universytetu*, no. 4, pp. 68-82, 2021 [in Ukrainian].
- [22] Ye. Kyrychenko, V. Gvozdz, 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 pozhazhna bezpeka*, no. 2 (12), pp. 111-121, 2021 [in Ukrainian].
- [23] 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 Chornobylya Natsionalnoho universytetu tsyvilnoho zakhystu Ukrayiny "Nadzvychni sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya", vol. 6, no. 1, pp. 29-42, 2022 [in Ukrainian].*
- [24] 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].
- [25] 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 universytetu*, no. 2, pp. 53-63, 2022 [in Ukrainian].
- [26] 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.

V. O. Kovbasa

e-mail: victory101@ukr.net

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

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS AND EXTERNAL CONDITIONS ON THE SPEED OF DEVELOPMENT OF THE COMBUSTION PROCESS OF PYROTECHNIC METALIZED MIXTURES BASED ON FLUOROPLASTS

In order to prevent premature fire-hazardous destruction of products, it is necessary to have a controlled database on the development of combustion of mixtures, and, first of all, on their burning rates under conditions of elevated heating temperatures and external pressures, with the help of which to quickly predict the conditions for the occurrence of explosive modes of combustion of mixtures during their forced activation.

At the moment, there are no studies for pyrotechnic mixtures of metal fuel powders and fluoroplastics with additives of organic and inorganic substances of the influence of technological parameters (ratio and dispersion of components, compaction coefficient, amount and nature of additive of organic substances, diameter of the charge of the mixture, etc.) on the dependence of speed combustion of mixtures from elevated heating temperatures (up to 800 K) and external pressures (up to 107 Pa); models of their combustion in these conditions to determine the critical parameters of external thermal actions, the excess of which leads to the explosive development of combustion of mixtures and fire-hazardous destruction of products, and methods of preventing the specified destruction of products by adjusting technological parameters at the stage of manufacturing charges of mixtures have not been developed, which allows to increase the operating times of products in extreme operating conditions.

The purpose of the work is to obtain a database on the burning rates of mixtures under conditions of elevated heating temperatures and external pressures for various values of technological parameters, which allows to estimate its permissible ranges of change. The objectives of the research are the study of the influence of technological parameters on the speed of development of the combustion process of pyrotechnic metallized mixtures based on fluoroplastics; study of the influence of external conditions on the speed of combustion of pyrotechnic mixtures made of metal fuel powders, fluoroplastics and organic substance additives.

Samples of pyrotechnic mixtures have been made using standard methods for pressing powders of fluoroplastics, metal fuels (Mg, Al, etc.) with additives of organic and inorganic substances. Studies

of the processes of ignition and burning of mixture samples have been carried out on standard pyrotechnic equipment.

The regularities of the influence of technological parameters (ratio and dispersion of components, mixture compaction coefficient, diameter of its sample, coefficient of thermal conductivity of its shell) and external conditions (increased heating temperature and external pressure) on the speed of development of the combustion process of compacted mixtures of metal fuels, fluoroplastics and additives organic and inorganic substances have been established. Concentration limits of combustion of mixtures are found, within which the process of their combustion is stable. A wide class of organic and inorganic substances, the introduction of which in the form of small additives (up to 10...13%) in the composition of mixtures leads to a decrease in the burning rate and an increase in the resistance of their combustion process to external influences for various ranges of changes in technological parameters of the mixtures, has been established. Inorganic substances, the addition of which, on the contrary, leads to a sharp increase in the rate of development of the mixture combustion process and a decrease in its stability, especially in conditions of elevated heating temperatures and external pressures, have also been detected. It is shown for the first time that by adjusting the technological parameters of the mixtures (the ratio and nature of the components, the dispersion of metal fuels, the compaction coefficient, the diameter of the mixture samples and the coefficient of thermal conductivity of the shells) at the stage of their manufacture, without changing tactical and technical indicators of pyrotechnic products based on metallized fluoroplastic mixtures, with the help of a controlled change in the burning rate of mixtures (or the time of action of products in the conditions of their combat use), it is possible to prevent unstable, explosive modes of its development in conditions of external thermal influences, which lead to premature fire-hazardous destruction of products.

Keywords: *fire safety, pyrotechnic mixtures, organic and inorganic substances, burning speed, stability of burning process, external influences.*