

[0000-0001-9082-0771] **Н. М. Козяр¹**, канд. техн. наук,

e-mail: nazarkozyar@ukr.net

[0000-0002-0240-1807] **О. В. Кириченко¹**, д-р техн. наук, професор,

e-mail: okskir@meta.ua

[0000-0002-9479-669X] **В. О. Ковбаса¹**,

e-mail: victory101@ukr.net

[0000-0002-2373-2429] **С. П. Кириченко¹**,

e-mail: kyrychenkojp@gmail.com

[0000-0003-0722-9353] **В. А. Ващенко²**, д-р техн. наук, професор,

e-mail: v.vaschenko@chdtu.edu.ua

[0000-0002-0234-8655] **С. О. Колінько²**, канд. фіз.-мат. наук, доцент,

e-mail: s.kolinko@chdtu.edu.ua

[0000-0002-2805-572X] **В. В. Цибулін²**

e-mail: tsybulin22@gmail.com

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

Національного університету цивільного захисту України

вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна

²Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ РІЗНИХ ЧИННИКІВ НА ШВИДКІСТЬ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ КИСНЕВМІСНИХ ОКИСНЮВАЧІВ ТА МЕТАЛЕВИХ ПАЛЬНИХ

Вивчено вплив різних чинників (теплообмін із зовнішнім середовищем, що залежить від діаметра зразка суміші та матеріалу оболонки, яка ізолює його, вологість окиснювача, склад та вологість середовища) на швидкість і стабільність процесу горіння ущільнених сумішей з порошків кисневмісних окиснювачів (NaNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, BaO_2 , MnO_2) та металевих пальних (Mg , Al , ПАМ) для різних значень технологічних параметрів (співвідношення й дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення, вологості окиснювача, діаметра зразка та матеріалу оболонки) і зовнішніх умов (складу та вологості середовища, зовнішнього тиску). Встановлено діапазони зміни параметрів, що характеризують зазначені чинники, в межах яких спостерігається зменшення швидкості горіння сумішей більш, ніж у 2...3 рази, стабілізація процесу горіння та підвищення його стійкості до зовнішніх впливів. Капсуляція частинок порошку окиснювача (наприклад алюмінієм) приводить до зменшення швидкості горіння суміші та підвищення стійкості процесу її горіння до зовнішніх термічних впливів, що пояснюється суттєвим зменшенням вологості окиснювача. Процеси горіння сумішей у повітрі, азоті або аргоні значно різняться, що пояснюється різними кінетичними характеристиками процесів термічного розкладання окиснювачів, окиснення та займання частинок металевих пальних у цих середовищах.

Ключові слова: пожежна безпека, піротехнічні суміші, кисневмісні окиснювачі, металеві пальні, швидкість горіння, стійкість процесу горіння, зовнішні впливи.

Вступ. Нині піротехнічні вироби на основі ущільнених сумішей з порошків кисневмісних окиснювачів (NaNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, BaO_2 , MnO_2 та ін.) і металевих пальних (Mg , Al , сплав ПАМ та ін.) широко використовуються у різних галузях народного господарства та військової техніки (освітлювальні, сигнальні й трасувальні засоби, спалахувальні та запалювальні патрони і снаряди, еле-

менти ракетно-космічної техніки та ін.) [1-7]. Зазначені вироби при практичному використанні часто піддаються різним зовнішнім термовпливам (наприклад при пожежах у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, в умовах термоударних впливів при запусках та польоті виробів та ін.), що призводить до передчасного пожежовивбухонебезпечного спрацювання сумішей [5-8]. В результаті

відбувається руйнування піротехнічних виробів з утворенням високотемпературних продуктів згоряння, які розлітаються у різні боки і мають пожежну небезпеку для навколишніх об'єктів (паливно-мастильні матеріали, легкозаймисті будови, пускові установки з обслуговуючим персоналом та ін.) [9-15]. Тому велике практичне значення для запобігання можливим руйнуванням виробів при їх зберіганні, транспортуванні та застосуванні в умовах зовнішніх термічних дій має вміння регулювати швидкість розвитку процесу горіння сумішей, насамперед за допомогою технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення, величини та природи добавки органічних і неорганічних речовин та ін.).

Нині достатньо добре вивчено вплив на швидкість горіння зазначених вище технологічних параметрів [1-4, 8, 10, 12, 14]: встановлено діапазони їх зміни, в межах яких процес горіння сумішей протікає стабільно без вибухонебезпечного розвитку; вивчено вплив підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків на швидкість розвитку процесу горіння сумішей для значень технологічних параметрів, що використовуються у піротехнічному виробництві. Разом з тим, крім перелічених вище основних параметрів, є низка інших не вивчених чинників, які також роблять суттєвий вплив на швидкість горіння сумішей (наприклад теплообмін з навколишнім середовищем, що залежить від діаметра заряду та матеріалу оболонки, яка ізолює його, а також вологість окиснювача, склад та вологість середовища, в якому зберігаються і відпалюються заряди сумішей, зовнішні тиски та ін.).

Мета та задачі досліджень. Мета роботи: встановлення закономірностей впливу теплообміну з навколишнім середовищем, його складу, вологості та тиску, а також вологості окиснювача на швидкість і стійкість процесу розвитку горіння ущільнених сумішей з порошків кисневмісних окиснювачів та металевих паливних.

Задачами досліджень є:

– визначення сукупності параметрів, що характеризують досліджувані чинники, які приводять до сповільнення і підвищення стійкості процесу горіння сумішей для різних значень технологічних параметрів;

– встановлення діапазонів зміни зазначених параметрів та зовнішніх умов, при яких

може відбуватися зростання швидкості та зниження стійкості процесу розвитку горіння сумішей.

Виклад основного матеріалу. Зразки піротехнічних сумішей виготовлялися з використанням стандартних методів пресування порошків кисневмісних окиснювачів (NaNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, BaO_2 , MnO_2) та металевих паливних (Mg, Al, ПАМ) [1, 4]. Співвідношення компонентів у сумішах характеризується коефіцієнтом надлишку окиснювача α , їх густина – коефіцієнтом ущільнення K_Y , а дисперсність використовуваних промисловістю порошків окиснювачів та металевих паливних – середніми розмірами частинок окиснювачів $d_{ок}$ (мкм) та металевих паливних d_M (мкм), які розраховувалися за прийнятими у піротехнічній промисловості методиками.

Коефіцієнт надлишку окиснювача характеризує ступінь відхилення цієї системи від системи стехіометричного складу: $\alpha = \frac{\xi_{ок}}{\xi_M \cdot l_c}$ (ξ_M , $\xi_{ок}$ – відносні масові вмісти у суміші відповідно металевого пального і окиснювача, $l_c \cong 2,9$ – стехіометричний коефіцієнт). При цьому суміші з $\alpha < 1$ вважаються Perezбагаченими металевим паливним, при $\alpha > 1$ – Perezбагаченими окиснювачем, а у випадку $\alpha = 1$ – система є стехіометричною.

Коефіцієнт ущільнення $K_Y = \frac{\rho_c}{\rho_{max}}$ (ρ_c – густина зразка (досягнута), ρ_{max} – максимально можлива густина зразка).

Дослідження процесу горіння зразків сумішей проводили на стандартному піротехнічному обладнанні [1, 3]. Середнє значення швидкості горіння сумішей визначалось за формулою $u = \frac{h}{\tau}$ (h – висота зразка, м; τ – середній час згоряння зразка, с).

Для реєстрації початку та закінчення горіння зразка суміші найнадійнішими є безконтактні методи, при яких датчики, що сприймають зміни яких-небудь фізичних параметрів, не піддаються безпосередній дії високотемпературних продуктів згоряння. До них передусім відносяться методи, що ґрунтуються на застосуванні датчиків теплового випромінювання.

Реєстрація моменту закінчення процесу горіння здійснювалась фотодатчиком (як приймачі випромінювання використовувалися фотодіоди ФД – 1, ФД – 2, ФД – 3а), розташованим напроти заднього торця зразка

і фіксує момент виникнення свічення в отворі заднього торцевого бронювання. Це дає можливість використовувати достатньо просту і доступну у виготовленні конструкцію зразка, відмінну від звичайної конструкції, що широко освоєна піротехнічною промисловістю, тільки наявністю отвору в торцевому бронюванні. Виконання отвору може проводитися без механічної обробки, з мінімальною зміною існуючої технології. За мірну базу при цьому приймається повна висота зразка. Вплив ділянок з нестационарністю процесу на початку і в кінці горіння (кінцеві ефекти) може бути практично виключеним шляхом підбору відповідної висоти заряду.

Істотну роль при вимірюванні швидкості горіння відіграє спосіб запалювання. Основна вимога до способу запалювання – малий час запалювання (що визначається тепловим потоком) в поєднанні з одночасністю запалювання всієї поверхні зразка. Для запалювання зразків найчастіше застосовуються електрична спіраль і порохове навішування. Час запалювання і поширення полум'я по всій поверхні зразка при підпалі спіралями у декілька разів вищий, ніж при використуванні зерених навішувань, при цьому з останніх найефективнішим є димний порох.

Для запалювання використовувалось зернене навішування димного порошу ДРП, розміщене у спалаховій камері пірогенного

типу з соплом, направленим на заряд, біля торця зразка у спеціальній втулці з прорізами, які забезпечують обтікання торця продуктами згорання навішування.

Відносна похибка вимірювання u не перевищувала 7...9%. Експериментальні криві будувалися з використанням сучасних методів регресійного та кореляційного аналізів.

Результати досліджень. В результаті проведених досліджень встановлено, що при горінні стехіометричної суміші $\text{NaNO}_3 + \text{Mg}$ заміна менш теплопровідної оболонки зразка на більш теплопровідну, тим більше перехід до зразка без оболонки, призводить до значного збільшення швидкості горіння. Швидкість горіння для паперової оболонки – $13,5 \cdot 10^{-3}$ м/с; сталевий – $14,0 \cdot 10^{-3}$ м/с; мідної – $14,0 \cdot 10^{-3}$ м/с; без оболонки – $18,6 \cdot 10^{-3}$ м/с ($d_m = 100 \dots 110$ мкм; $d_{ок} = 100 \dots 110$ мкм; $T_0 = 303$ К; діаметр зразків становить $1,5 \cdot 10^{-2}$ м; $K_V = 0,78$; тиск атмосферний). Теплофізичні властивості матеріалів оболонок наведено у таблиці 1. При цьому функція оболонки зводиться не тільки до теплоізоляції, але й до зміни умов тепловіддачі від нагрітих продуктів горіння до вихідних шарів суміші. Швидкість горіння сумішей з малими діаметрами зразка найбільш суттєво залежить від матеріалу оболонок. Так, за рахунок зміни теплопровідності оболонок можна змінити швидкість горіння суміші у 3...4 рази.

Таблиця 1. Характеристики матеріалів оболонок [1, 4]

| Матеріал | Густина, кг/м ³ | Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К) | Питома теплоємність c , кДж/кг·К |
|----------|----------------------------|--|------------------------------------|
| Латунь | 8400 | 111 | 0,385 |
| Алюміній | 2650 | 209 | 0,896 |
| Сталь | 7830 | 53,6 | 0,465 |
| Мідь | 8900 | 390 | 0,388 |

Як видно з таблиці 2, швидкість горіння сумішей $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$, $\text{Mg} + \text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Al} + \text{NaNO}_3$, $\text{PAM} + \text{NaNO}_3$ зі збільшенням теплопровідності оболонки зростає, а у сумішей Mg , Al , PAM з оксидами BaO_2 , MnO_2 швидкість горіння зі збільшенням теплопровідності оболонки зменшується. Швидкість горіння суміші нітрату стронцію з магнієм підвищується зі збільшенням теплопровідності оболонки більшою мірою, ніж суміші магнію з нітратом натрію. Горіння суміші $\text{PAM} + \text{Ba}(\text{NO}_3)_2$

та $\text{PAM} + \text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ при підвищенні теплопровідності оболонки взагалі може згаснути. У сумішей $\text{Mg} + \text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ швидкість горіння зі збільшенням коефіцієнта теплопровідності оболонки зростає при малих розмірах частинок металу та, навпаки, зменшується при їх великих розмірах. Встановлено також, що за певних умов (наприклад зі збільшенням розміру частинок окиснювача) швидкість горіння суміші $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$ також може зменшуватись при збільшенні теплопровідності оболонки.

Таблиця 2. Вплив матеріалу оболонки на швидкість горіння (10^{-3} м/с) стехіометричних сумішей при атмосферному тиску

| Суміш | Коефіцієнт ущільнення суміші, K_Y | Без оболонки | Мідь | Сталь | Папір | $\frac{u_{\text{без обол.}}}{u_{\text{папер. обол.}}}$ |
|--|-------------------------------------|--------------|------|-------|-------|--|
| Ba(NO ₃) ₂ + Mg | 0,78 | 4,9 | 4,6 | 3,7 | 3,4 | 1,4 |
| Sr(NO ₃) ₂ + Mg | 0,78 | 4,8 | 4,6 | 3,4 | 3,2 | 1,4 |
| BaO ₂ + Mg | 0,77 | 11,2 | 5,0 | 5,1 | 5,2 | 2,7 |
| MnO ₂ + Mg | 0,57 | 12,8 | 4,9 | 5,0 | 5,6 | 2,2 |
| NaNO ₃ + Al | 0,78 | – | – | – | 1,2 | – |
| BaO ₂ + Al | 0,77 | 8,2 | 2,7 | 2,8 | 3,7 | 2,2 |
| MnO ₂ + Al | 0,53 | 8,8 | 3,6 | 4,1 | 4,2 | 2,1 |
| NaNO ₃ + ПАМ | 0,78 | 4,9 | 4,6 | 3,6 | 2,9 | 1,7 |
| BaO ₂ + ПАМ | 0,77 | 10,2 | 3,3 | 3,4 | 4,0 | 2,6 |
| MnO ₂ + ПАМ | 0,57 | 10,0 | 3,8 | 4,0 | 4,4 | 2,3 |

Примітка: для магнію $d_m = 94$ мкм; для алюмінію $d_m = 34$ мкм; для сплаву ПАМ $d_m = 94$ мкм; $d_{ок} = 94$ мкм; $T_0 = 293$ К; діаметр зразків – $1,5 \cdot 10^{-2}$ м

Перехід від зразка суміші Mg + NaNO₃ в оболонці (наприклад паперовій) до зразка без оболонки призводить, крім збільшення швидкості горіння, також до зміщення положення максимуму на кривій $u(\alpha)$ у бік надлишку окиснювача (рисунк 1), при цьому найсильніше зазначений вплив проявляється в області $\alpha = \alpha_{u_{max}}$ та значно послаблюється при $\alpha > 1,0$.

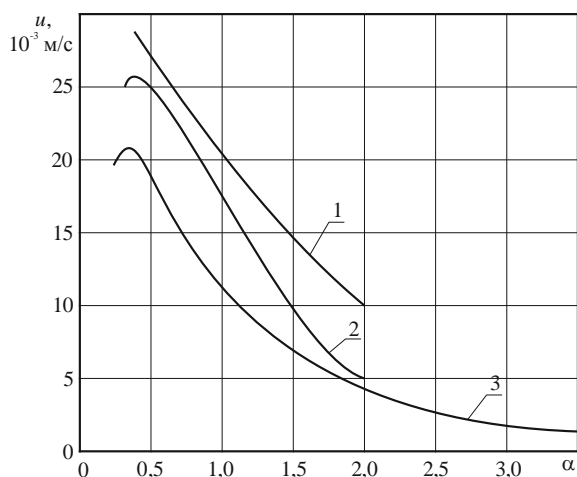


Рисунок 1. Вплив діаметра зразка суміші Mg + NaNO₃ на залежність швидкості горіння при атмосферному тиску від α ($K_Y = 0,85$; МПФ-3; $d_{ок} < 380$ мкм; $T_0 = 293$ К) при діаметрі зразка D : 1 – $D = 2,3 \cdot 10^{-2}$ м (без оболонки); 2 – $D = 2,55 \cdot 10^{-2}$ м (без оболонки); 3 – $D = 2,55 \cdot 10^{-2}$ м (оболонка паперова)

Збільшення ступеня вологості NaNO₃ призводить до зростання швидкості горіння суміші Mg + NaNO₃ (рисунк 2). Капсуляція частинок порошку NaNO₃ металами (у цьому

випадку алюмінієм) призводить до вельми суттєвого послаблення залежності $u(P)$ (рисунк 3), при цьому зі зменшенням K_Y зазначений вплив капсуляції частинок порошку окиснювача на залежність $u(P)$ помітно підсилюється.

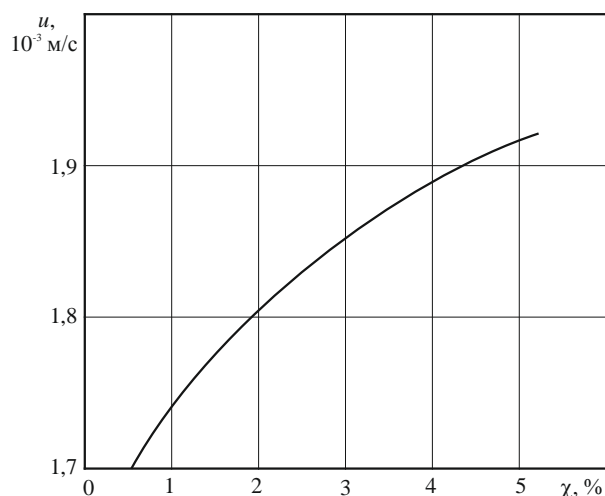


Рисунок 2. Залежність швидкості горіння суміші NaNO₃ + ПА-4 при атмосферному тиску від вмісту води χ ($K_Y = 0,9$; $d_{ок} = 100 \dots 140$ мкм; $T_0 = 293$ К)

На швидкість горіння сумішей впливає склад навколишнього газового середовища. Наприклад, при горінні сумішей Mg з NaNO₃ у випадку відхилення складу суміші від стехіометричного швидкості горіння у повітрі, азоті й аргоні суттєво різняться (рисунк 4). Спалювання зразків суміші у зволоженому середовищі (у цьому випадку у вологому повітрі) приводить до значного

зменшення швидкості горіння та вельми суттєвого зміщення положення максимуму

на кривій $u(\alpha)$ у бік надлишку металевого пального (рисунк 5).

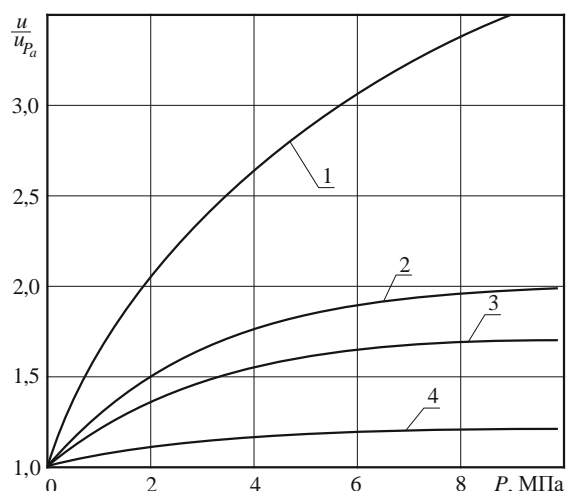


Рисунок 3. Вплив капсульованого NaNO_3 на залежність відносної швидкості горіння суміші $\text{MgO} + \text{NaNO}_3$ від P ($\alpha = 1,0$; $d_{ок} = 100...140$ мкм): 1 – NaNO_3 вихідний ($K_V = 0,7$); 2 – NaNO_3 , капсульований алюмінієм ($K_V = 0,7$); 3 – NaNO_3 вихідний ($K_V = 0,9$); 4 – NaNO_3 , капсульований алюмінієм ($K_V = 0,9$)

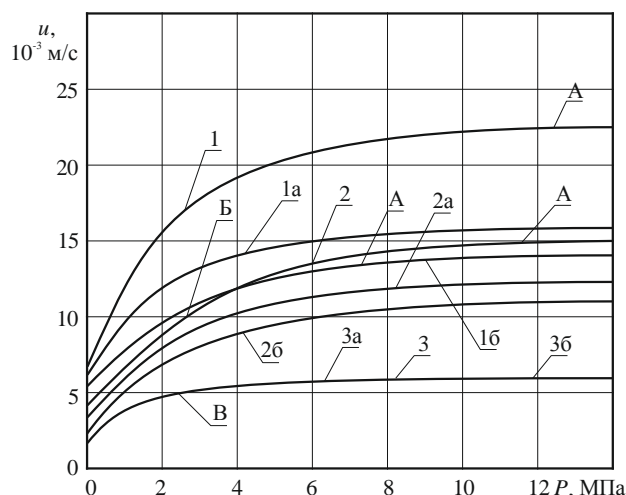


Рисунок 4. Залежність швидкості горіння сумішей $\text{MgO} + \text{NaNO}_3$ від P у різних середовищах: А – 50 % $\text{MgO} + 50$ % NaNO_3 (1 – повітря; 1а – азот; 1б – аргон); Б – 40 % $\text{MgO} + 60$ % NaNO_3 (2 – повітря; 2а – азот; 2б – аргон); В – 29,4 % $\text{MgO} + 70,6$ % NaNO_3 (3 – повітря; 3а – азот; 3б – аргон)

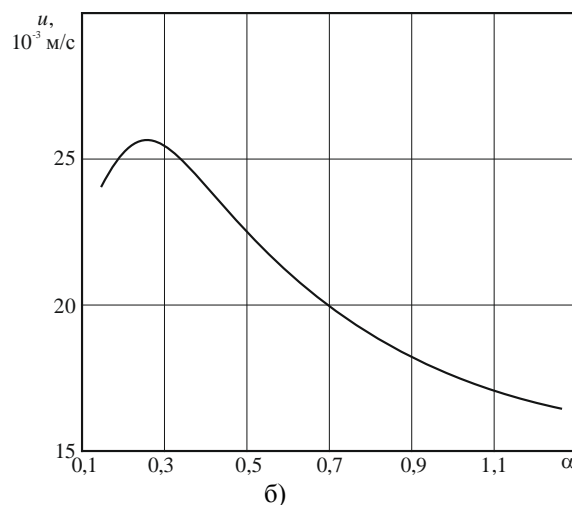
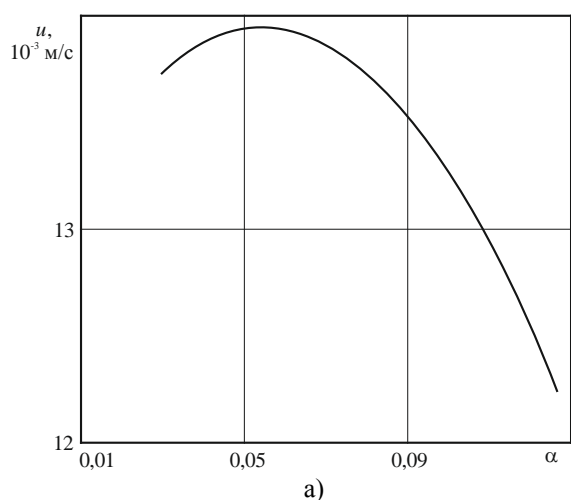


Рисунок 5. Вплив вологості повітря на залежність швидкості горіння суміші $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$ від α ($K_V = 0,88$; $d_m = 75...105$ мкм; $d_{ок} = 250$ мкм): а) – вологе повітря; б) – сухе повітря

Обговорення результатів. Встановлено, що одна й та ж оболонка може як уповільнювати, так і прискорювати горіння сумішей залежно від умов спалювання та рецептури суміші: наприклад, швидкість горіння суміші $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$ при $\alpha > 1$ (надлишок окиснювача) у сталевій оболонці вища, ніж у картонній. Та ж суміш при $\alpha < 1$ (надлишок пального) горить з більшою швидкістю у картонних оболонках, ніж у сталевих; при

цьому процес горіння сумішей стає нестабільним та вибухонебезпечним. Швидкість горіння сумішей суттєво залежить від діаметра зразка: наприклад, суміші $\text{NaNO}_3 + \text{ПА-4}$ ($\alpha = 0,63$), які запресовані у картонні оболонки діаметром, меншим $2 \cdot 10^{-2}$ м, при атмосферному тиску не горять ($d_{ок} \leq 280$ мкм, $T_0 = 293$ К); процес горіння сумішей, які запресовані в оболонки діаметром $2 \cdot 10^{-2}...3 \cdot 10^{-2}$ м, протікає нестабільно; стабільне горіння су-

мішей при атмосферному тиску спостерігається лише у сумішей, які запресовані в оболонки діаметром, більшим $3 \cdot 10^{-2}$ м. При цьому з підвищенням зовнішнього тиску критичний діаметр зразка суміші, що горить, зменшується. До підвищення стабільності процесу горіння сумішей приводять також зміна співвідношення компонентів, зменшення розміру частинок металевго пального, підвищення коефіцієнта ущільнення суміші.

При цьому капсуляція частинок порошку окиснювача (наприклад алюмінієм) приводить до зменшення швидкості горіння суміші та підвищення стійкості процесу її горіння до зовнішніх термічних впливів, що пояснюється суттєвим зменшенням вологості окиснювача. Крім цього, на швидкість горіння сумішей значно впливають склад та вологість навколишнього середовища: наприклад, процеси горіння сумішей у повітрі, азоті або аргоні значно різняться, що пояснюється різними кінетичними характеристиками процесів термічного розкладання окиснювачів, окиснення та займання частинок металевих пальных у цих середовищах; у вологих середовищах процес горіння сумішей уповільнюється та стає більш стабільним внаслідок наявності у продуктах розкладання окиснювачів значної кількості парів води, що уповільнюють процеси екзотермічного окиснення частинок металевго пального.

Висновки. На основі проведених експериментальних досліджень закономірностей впливу різних чинників на швидкість горіння піротехнічних сумішей на основі порошоків кисневмісних окиснювачів і металевих пальных отримано наступні нові результати:

1. Заміна більш теплопровідної оболонки зразка сумішей $Mg + NaNO_3$, $Mg + Sr(NO_3)_2$, $Al + NaNO_3$, ПАМ + $NaNO_3$ на менш теплопровідну (наприклад металеву на паперову) приводить до зменшення швидкості горіння більш, ніж у 2...3 рази та помітної стабілізації процесу горіння. Найбільш сильний вплив коефіцієнта теплопровідності оболонки виявляється зі збільшенням розміру частинок металевго пального та окиснювача. Стабільне горіння при атмосферному тиску спостерігається тільки у зразків сумішей, які запресовані в оболонки діаметром, більшим $3 \cdot 10^{-2}$ м, а при підвищенні зовнішнього тиску

(до 10 МПа) значення зазначеного діаметра зменшуються у декілька разів. Крім цього, до підвищення стабільності процесу горіння сумішей приводить також регулювання технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення). Зменшення ступеня зволоження окиснювача (наприклад $NaNO_3$ або $Sr(NO_3)_2$ шляхом капсуляції його частинок (наприклад алюмінієм)) також приводить до зменшення швидкості горіння суміші та його стабілізації. Капсуляція частинок порошоків окиснювачів приводить до послаблення залежності $u(P)$ та підвищення стійкості процесу горіння сумішей до зовнішніх термічних впливів.

2. Швидкість горіння сумішей $Mg + NaNO_3$, $Mg + Sr(NO_3)_2$, $Al + NaNO_3$, ПАМ + $NaNO_3$ зі збільшенням теплопровідності оболонки зростає більш, ніж у 3...4 рази, а процес горіння стає нестабільним і вибухонебезпечним. При цьому перехід від зразка суміші в оболонці (наприклад паперовій) до зразка без оболонки призводить до збільшення швидкості горіння та до зміни характеру залежності $u(\alpha)$: максимум на кривій зміщується у бік надлишку окиснювача.

Незалежно від матеріалу оболонки, процес горіння сумішей, які запресовані в оболонки діаметром $2 \cdot 10^{-2}$... $3 \cdot 10^{-2}$ м, протікає нестабільно. Зменшення вологості зовнішнього середовища (наприклад повітря) призводить до зростання швидкості горіння сумішей, зміщення положення максимуму на кривій $u(\alpha)$ у бік надлишку металевго пального та, у цілому, до дестабілізації процесу горіння сумішей.

Перспективи подальших досліджень. Надалі планується проведення досліджень щодо визначення залежностей швидкості горіння піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей з добавками органічних та неорганічних речовин від параметрів зовнішніх термічних впливів (підвищення температури нагріву, зовнішні тиски, швидкості обдуву потоком повітря та ін.), що дозволяє встановлювати критичні діапазони зміни цих параметрів, перевищення яких може призводити до передчасного займання зарядів сумішей і пожежовибухонебезпечного руйнування піротехнічних виробів на їх основі в умовах зберігання, транспортування та застосування.

Список використаних джерел

- [1] О. В. Кириченко, П. С. Пашковський, В. А. Ващенко, та Ю. Г. Лега, *Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратовмісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів*. Київ, Україна: Наукова думка, 2012.
- [2] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, О. С. Барановський, та В. В. Цибулін, "Визначення вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згорання піротехнічних нітратно-металевих сумішей при підвищених зовнішніх тисках", *Наука та виробництво: міжвузів. темат. зб. наук. пр.*, вип. 19, с. 323-332, 2018.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, and V. Melnyk, "Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions", *Technology audit and production reserves*, no. 1/1 (51), pp. 44-49, 2020.
- [6] Р. Б. Мотрічук, О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, Т. І. Бутенко, Є. П. Кириченко, та В. В. Цибулін, "Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру та склад продуктів згорання піротехнічних нітратно-металевих сумішей", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 131-142, 2020.
- [7] Є. Кириченко, "Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах пострілу та польоту", *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. пр. Черкас. ін-ту пожеж. безпеки ім. Героїв* Чорнобиля Нац. ун-ту цивільного захисту України, т. 5, № 2, с. 37-51, 2021.
- [8] Є. П. Кириченко, В. В. Ковалишин, В. М. Гвоздь, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, та В. В. Цибулін, "Дослідження механізму та розробка моделі розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей металеве пальне + оксид металу при зовнішніх термічних діях", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 68-82, 2021.
- [9] Є. Кириченко, В. Гвоздь, В. Ващенко, О. Кириченко, О. Дядюшенко, та В. Мельник, "Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру займання та час згорання частинок магнію та алюмінію в продуктах розкладання оксидів металів", *Цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (12), с. 111-121, 2021.
- [10] 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", *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація: зб. наук. пр. Черкас. ін-ту пожеж. безпеки ім. Героїв Чорнобиля Нац. ун-ту цивільного захисту України*, т. 6, № 1, с. 29-42, 2022.
- [11] Є. Кириченко, В. Гвоздь, В. Ващенко, О. Кириченко, та О. Дядюшенко, "Попередження передчасного спрацьовування піротехнічних виробів на основі сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів в умовах зовнішніх термічних дій", *Цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (12), с. 122-130, 2022.
- [12] 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.
- [13] В. М. Фатєєв, Ю. П. Приходько, та Л. І. Таборов, *Піротехніка*. Київ, Україна: Наукова думка, 2017.
- [14] В. М. Баланюк, Н. М. Козяр, та О. І. Гарасим'юк, "Застосування газоаерозольно-порошкових вогнегасних сумішей для захисту від запалювальних сумішей", *Science Rise*, № 2 (22), с. 11-14. 2016.
- [15] О. В. 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] O. V. Kyrychenko, P. S. Pashkovskiy, V. A. Vashchenko, and Yu. G. Lega, *Fundamentals of fire safety of pyrotechnic nitrate-containing products in the conditions of external thermal influences*, Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 2012 [in Ukrainian].
- [2] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrychuk, O. C. Baranovsyy, 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: interuniversity thematic collection of sci. papers*, iss. 19, pp. 323-332, 2018 [in Ukrainian].
- [3] V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskiy, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, and O. L. Mirus, "Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5 (95), pp. 68-76, 2018.
- [4] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrychuk, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, and V. V. Tsybulin, "Study of the influence of the strength of charges of pyrotechnic nitrate-metal mixtures on the fire safety of products based on them", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 3, pp. 56-67, 2019 [in Ukrainian].
- [5] O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, and V. Melnyk, "Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions", *Technology audit and production reserves*, no. 1/1 (51), pp. 44-49, 2020.
- [6] R. B. Motrichuk, O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, T. I. Butenko, Ye. P. Kyrychenko, and V. V. Tsybulin, "Regularities of influence of technological parameters and external factors on temperature and composition of combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 4, pp. 131-142, 2020 [in Ukrainian].
- [7] Ye. Kyrychenko, "Study of the processes of external thermal shock effects on pyrotechnic metal oxide products under the conditions of a shot and flight", *Nadzvychnyi sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya: coll. of sci. papers of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine*, vol. 5, no. 2, pp. 37-51, 2021 [in Ukrainian].
- [8] Ye. P. Kyrychenko, V. V. Kovalyshyn, V. M. Gvozd, 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 universitetu*, no. 4, pp. 68-82, 2021 [in Ukrainian].
- [9] Ye. Kyrychenko, V. Gvozd, V. Vashchenko, O. Kyrychenko, O. Dyadushenko, and V. Melnyk, "Regularities of influence of technological parameters and external factors on the ignition temperature and combustion time of magnesium and aluminum particles in the decomposition products of metal oxides", *Tsyvilnyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, no. 2 (12), pp. 111-121, 2021 [in Ukrainian].
- [10] 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", *Nadzvychnyi sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya: coll. of sci. papers of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine*, vol. 6, no. 1, pp. 29-42, 2022 [in Ukrainian].
- [11] 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].

- [12] 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 tekhnolohichnogo universitetu*, no. 2, pp. 53-63, 2022 [in Ukrainian].
- [13] V. M. Fateev, Yu. P. Prikhodko, and L. I. Taborov, *Pyrotechnics*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 2017 [in Ukrainian].
- [14] V. M. Balanyuk, N. M. Kozyar, and O. I. Garasimyyuk, "Application of aerosol-powder fire-extinguishing mixtures for protection against incendiary mixtures", *Science Rise*, no. 2 (22), pp. 11-14, 2016 [in Ukrainian].
- [15] 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.

N. M. Kozyar¹, *Cand. Tech. Sc.,*
O. V. Kyrychenko¹, *Dr. Tech. Sc., Professor,*
V. O. Kovbasa¹,
Ye. P. Kyrychenko¹,
V. A. Vaschenko², *Dr. Tech. Sc., Professor,*
S. O. Kolinko², *Cand. Phys. and Math. Sc., Associate Professor,*
V. V. Tsybulin²

¹Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl
of the National University of Civil Defense of Ukraine
Onoprienko st., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

²Cherkasy State Technological University
Shevchenko Blvd., 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

REGULARITIES OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT FACTORS ON THE RATE OF DEVELOPMENT OF THE COMBUSTION PROCESS OF PYROTECHNIC MIXTURES BASED ON OXYGEN-CONTAINING OXIDIZERS AND METALLIC FUELS

Of great practical importance in preventing possible destruction of pyrotechnic products based on mixtures of powders of oxygen-containing oxidants and metal fuels in conditions of external thermal effects is the ability to regulate the speed of development of the combustion process of mixtures, first of all, with the help of technological parameters (ratio and dispersion of components, compaction coefficient, amount and nature of additives of organic and inorganic substances, etc.). Currently, the influence of the above-mentioned technological parameters on the burning rate is sufficiently well studied. In addition to the main parameters listed above, there are a number of other unstudied factors that also have a significant impact on the burning rate of mixtures (for example, heat exchange with the environment, which depends on the diameter of the charge and the material of the shell that isolates it, as well as the humidity of the oxidizer, composition and humidity of environment in which mixture charges are stored and fired, external pressures, etc.).

The purpose of the work is to establish the regularities of the influence of heat exchange with the environment, its composition, humidity and pressure, as well as the humidity of the oxidizer on the speed and stability of the combustion process of compacted mixtures of oxygen-containing oxidizer powders and metal fuels.

Replacement of more heat-conductive shell of a sample of Mg + NaNO₃, Mg + Sr(NO₃)₂, Al + NaNO₃, PAM + NaNO₃ mixtures with a less heat-conductive one (for example, metal with paper one) leads to a decrease in the burning rate by more than 2...3 times and a noticeable stabilization of the combustion process. The strongest influence of the coefficient of shell thermal conductivity is manifested with an increase in the size of the particles of metal fuel and oxidizer. The regulation of techno-

logical parameters (ratio and dispersion of components, compaction coefficient) also leads to an increase in the stability of the combustion process of mixtures. The reduction of the degree of hydration of the oxidizing agent (for example, NaNO_3 or $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ by encapsulating its particles (for example, with aluminum)) also leads to a decrease in the burning rate of the mixture and its stabilization. The encapsulation of particles of oxidizing powders leads to a weakening of the $u(P)$ dependence and an increase in the resistance of the mixture combustion process to external thermal influences.

The burning rate of mixtures of $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$, $\text{Mg} + \text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Al} + \text{NaNO}_3$, $\text{PAM} + \text{NaNO}_3$ increases more than 3...4 times with the increase in thermal conductivity of the shell, and the burning process becomes unstable and explosive. The transition from a sample of the mixture in a shell (for example, a paper one) to a sample without a shell leads to an increase in the burning rate and to a change in the nature of the $u(\alpha)$ dependence: the maximum on the curve shifts to the side of the oxidant excess. A decrease in the humidity of the external environment (for example, air) leads to an increase in the rate of combustion of mixtures, a shift of the position of the maximum on the curve $u(\alpha)$ towards an excess of metallic fuel and, in general, to a destabilization of the combustion process of mixtures.

Keywords: fire safety, pyrotechnic mixtures, oxygen-containing oxidizers, metal fuels, burning speed, stability of burning process, external influences.