

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

e-mail: kyrychenkojp@gmail.com

[0000-0001-9137-189] **В. В. Ковалишин²**, *д-р техн. наук, професор*,

e-mail: ldubzh.lviv@dsns.gov.ua

[0000-0003-2277-7972] **В. М. Гвоздь¹**, *канд. техн. наук, професор*,

e-mail: chipb@dsns.gov.ua

[0000-0003-0722-9353] **В. А. Ващенко³**, *д-р техн. наук, професор*,

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

[0000-0002-0234-8655] **С. О. Колінько³**, *канд. фіз.-мат. наук, доцент*,

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

[0000-0002-2805-572X] **В. В. Цибулін³**

e-mail: tsybulin22@gmail.com

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

Національного університету цивільного захисту України

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

²Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

вул. Клепарівська, 35, м. Львів, 79007, Україна

³Черкаський державний технологічний університет

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

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ТА РОЗРОБКА МОДЕЛІ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ СУМІШЕЙ МЕТАЛЕВЕ ПАЛЬНЕ + ОКСИД МЕТАЛУ ПРИ ЗОВНІШНІХ ТЕРМІЧНИХ ДІЯХ

Встановлено механізм горіння двокомпонентних сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів, згідно з яким процес перетворення вихідної суміші у продуктах згоряння є стаціонарним, одновимірним і протікає у трьох зонах: прогрітий шар у конденсованій фазі суміші; реакційна зона конденсованої фази суміші; зона полум'я (зона тепловиділення газової фази). Розроблено модель горіння сумішей, яка враховує кінетичні характеристики термічного розкладання окиснювача та високотемпературного окиснення, займання та горіння частинок металу у продуктах розкладання, що дає змогу більш точно (відносно похибку знижено до 7... 9 % замість 10...15 % у наявних моделей) визначати критичні діапазони зміни швидкості горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій, перевищення яких призводить до прискорення процесу горіння сумішей та пожежовибухонебезпечного руйнування піротехнічних виробів.

Ключові слова: *пожежна безпека, піротехнічні суміші, термічні дії, процеси горіння, моделі горіння металізованих конденсованих систем.*

Вступ. Нині ущільнені суміші з порошків металевих палив (Mg, Al та ін.) та оксидів металів (CuO, Cu₂O, Sb₂O₃, NiO та ін.) широко використовуються у піротехнічних виробках різного призначення (спалахувальні суміші для освітлювальних і сигнальних патронів та снарядів, трасерів, ІЧ-засобів теплового захисту різних об'єктів, а також стримувальні суміші в артилерійських та бомбових дистанційних трубках та ін.). З кожним роком зростає кількість пожеж та вибухів у процесі обігу досліджуваних виробів (при зберіганні, транспортуванні та застосуванні), що призводить до руйнування об'єктів, травмування та загибелі людей, значних матеріальних збитків [1-8].

Аналіз зазначених випадків показує, що займанню та подальшому пожежовибухонебезпечному руйнуванню виробів передують зовнішні термічні впливи, яким вони піддаються (наприклад, при пожежі у складських приміщеннях, в умовах їх транспортування, при ударних термовпливах в умовах пострілу та польоту виробів при їх запусках та ін.) [9-16]. Це призводить до передчасного займання та вибухонебезпечного розвитку горіння сумішей, що входять до складу виробів, і подальших пожежонебезпечних їх руйнувань. Тому велике практичне значення має попередження вимушених передчасних пожежонебе-

зпечних руйнувань виробів у разі впливу зовнішніх термічних дій.

На сьогодні достатньо докладно досліджено механізм та розроблено моделі горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей (ущільнених сумішей з порошків металевих пальних (Mg, Al, алюмінієво-магнієвих сплавів, Ti, Zr та ін.), нітратовмісних окиснювачів (NaNO_3 , $\text{Sr(NO}_3)_2$ та ін.) та добавок органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену та ін.)) [17-27]. Встановлено, що процес горіння зазначених сумішей проходить у трьох найбільш характерних зонах [17-19]: у к-фазі, на поверхні розділу фаз та у зоні полум'я. Показано [20, 21] наявність агломерації (укрупнення в результаті спікання) частинок металів на поверхні горіння, де вони повністю згоряють. Для знаходження теплового потоку з зони полум'я було використано відомий метод теплового потоку, який було уточнено шляхом використання даних по кінетиці термічного розкладання окиснювачів і даних термодинамічних розрахунків температури та складу продуктів згоряння сумішей [22, 23]. З допомогою розроблених моделей горіння з похибкою 10...15 % було знайдено залежності швидкості горіння сумішей від технологічних параметрів (співвідношення компонентів, коефіцієнта ущільнення та ін.) та зовнішніх умов (температури нагріву, складу і тиску навколишнього середовища та ін.) [24-26], а також визначено критичні діапазони зміни швидкості горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій, перевищення яких призводить до вибухового прискорення процесу їх горіння та пожежовибухонебезпечного руйнування піротехнічних виробів на їх основі в екстремальних умовах експлуатації [25-27].

Стосовно досліджуваних сумішей металеве пальне + оксид металу, нині зазначені вище дослідження для них відсутні.

Мета та задачі досліджень. *Мета роботи:* встановлення механізму горіння двокомпонентних ущільнених сумішей з порошків магнію та алюмінію з оксидами металів та розробка моделі їх горіння для визначення критичних діапазонів зміни швидкості горіння сумішей, враховуючи вплив зовнішніх термічних дій.

Задачами досліджень є:

– аналіз експериментальних даних з метою встановлення фізико-хімічних процесів, що протікають у різних зонах горіння сумішей;

– отримання рівнянь для розрахунку швидкості та температури поверхні горіння сумішей;

– визначення середньої температури поверхні горіння та теплового потоку від частинок металу, що згоряють на поверхні горіння.

Виклад основного матеріалу. Методика експериментальних досліджень. Як зразки сумішей використовувались ущільнені двокомпонентні суміші з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів, які виготовлялись стандартними методами ущільнюючого формування, головним чином, пресуванням [4-6]. При вивченні впливу дисперсності порошків металів та окиснювачів на процес розвитку горіння сумішей використовувались стандартні порошки, які випускаються промисловістю [2-4]. Коефіцієнт ущільнення зразків становив 0,95...0,97, тобто зразки мали гранично допустимі значення K_v та були практично газонепроникними [5, 6]. Для дослідження впливу підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків на процес горіння сумішей зразки мали діаметр $2...3 \cdot 10^{-2}$ м і товщину металевої оболонки $1,5...2,0 \cdot 10^{-3}$ м. Висоти запресувань при вказаних діаметрах становили $3...4 \cdot 10^{-2}$ м. Для моделювання впливу підвищених температур нагріву (до 1000 К) та зовнішніх тисків (до $3 \cdot 10^7$ Па) на швидкість горіння сумішей використовувалося стандартне піротехнічне обладнання [5, 6, 30].

Для проведення досліджень використовувались відомі методи фізико-хімічного аналізу (контактні та безконтактні методи вимірювання температури, швидкісна мікрокіномія процесів горіння, термогравіметричні методи аналізу та ін.), методи математичного моделювання, чисельно-аналітичні методи рішення рівнянь тепло- та масопереносу, рівнянь хімічної кінетики, а також методи математичної статистики з використанням стандартних програм по сучасних чисельних методах [29]. Водночас відносна похибка вимірювань основних характеристик горіння сумішей (температури поверхні горіння, часу згоряння частинок металів у продуктах розкладання окиснювача, швидкості горіння сумішей та ін.) у зазначених умовах не перевищувала 7...9 %.

Фізико-хімічні процеси, що проходять у різних зонах горіння сумішей. Проведені дослідження поведінки компонентів сумішей з порошків Mg, Al та оксидів металів (CuO, NiO

та ін.) в умовах підвищених температур нагріву, притаманних процесу горіння піротехнічних сумішей порошків металевих палих з кисневмісними окиснювачами [5, 6], дали змогу встановити, що процес горіння зарядів досліджуваних сумішей у середньому є стаці-

онарним і протікає таким же чином, як у сумішевих твердих ракетних палив (СТРП) [1, 4], у декількох просторово розділених зонах: конденсованій фазі (к-фазі), на поверхні горіння та у газовій фазі (г-фазі – зоні полум'я) (рисунк 1).



Рисунок 1 – Загальна картина процесу горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей порошків магнію (а) та алюмінію (б) з оксидами металів (CuO, NiO та ін.) (суміші стехіометричні; $T_0 = 300$ К; $P = 10^5$ Па) [5, 6]

Так, з даних про термічне розкладання оксидів металів й окиснення порошків магнію та алюмінію в активних кисневмісних середовищах випливає, що при нагріванні зарядів сумішей до температур 1300...1500 К, відповідних значенням температур поверхні горіння сумішей T_n , відбувається повне розкладання окиснювача з виділенням O_2 за таким кінетичним рівнянням:

$$\frac{d\psi_1}{dt} = K_1 \cdot e^{-E_1/RT}, \quad (1)$$

де ψ_1 – відносний ступінь розкладання окиснювача; K_1 , E_1 – кінетичні константи ($E_1 \gg RT$). Умова $E_1 \gg RT$ відповідає тому, що основне поглинання тепла у к-фазі, яке пов'язане з розкладанням окиснювача, практично повністю зосереджене у достатньо вузькому інтервалі температур $\Delta T \cong 2RT_n^2/E_1$, що прилягає до температури поверхні горіння [5, 6].

Згідно з експериментальними даними в окиснювачі, що газифікується, при температурах $T > 1300$ К починається процес окиснення частинок металу. Аналітична обробка кінетичних кривих окиснення частинок металу в газоподібних продуктах розкладання розплаву окиснювача показує, що швидкість зазначеного процесу описується таким рівнянням:

$$\frac{d\psi_2}{dt} = K_2 \cdot C_{O_2}^m \cdot \bar{\rho}_c^n \cdot e^{-E_2/RT} \text{ при } E_2 \gg RT, \quad (2)$$

де ψ_2 – ступінь окиснення металу; K_2 – передекспоненціальний множник (s^{-1}); E_2 – енергія активації (кДж/моль); C_{O_2} , $\bar{\rho}_c$ – відносний масовий вміст O_2 в газоподібних продуктах; відносна густина газового середовища (стосовно нормальних умов) відповідно; m , n – емпіричні константи, що залежать від природи металевих пального. Водночас з умови $E_2 \gg RT$ випливає, що інтенсивне передполум'яне окиснення частинок металевих пального в газоподібних продуктах розкладання окиснювача також протікає у вузькій реакційній зоні к-фазі, де відбувається повна газифікація зазначених компонентів.

Мікрокінозйомка поверхні горіння суміші показує, що спалахування частинок металевих пального відбувається одразу ж після їх виходу на поверхню горіння (рисунк 2). За такої умови поверхню горіння суміші, так само як і у СТРП [1, 4], можна охарактеризувати середньою температурою T_n . Проте експериментальні дані показують, що для горючих сумішей досліджуваного типу визначення вказаної температури T_n є вельми складним. Це пов'язано з тим, що процеси, які протікають на поверхні горіння досліджуваної суміші (на відміну від СТРП), досить складні. Так, наприклад, детальний аналіз показав, що відмінність у температурах частинок металу і продуктів розкладання окиснювача на поверхні горіння може досягати значень 500...700 К. Більше того, навіть частинки порошку металу

на поверхні горіння мають різні температури через нерівність поверхні горіння і різні гідродинамічні та фізичні умови навколо окремих частинок. Ці особливості поверхні горін-

ня і затрудняють точне визначення T_n , тому про експериментально виміряну T_n як про деяку середню величину для всієї поверхні горіння можна говорити лише приблизно.

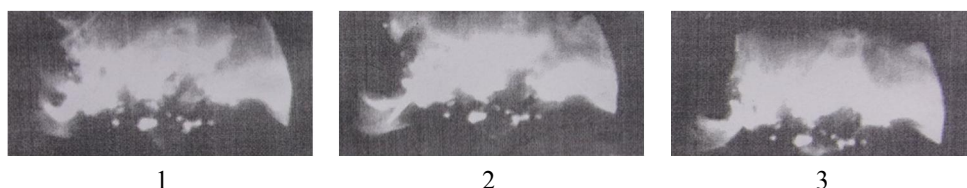


Рисунок 2 – Кінокадри мікрокінозйомки процесу займання частинок металевого пального на поверхні горіння суміші (суміші стехіометричні; $T_0 = 300$ К; $P = 10^5$ Па) [5, 6]

З даних мікрокінозйомки поверхні горіння сумішей також випливає, що практично усі частинки металевого пального спалахують на ній, невелика частина з них (близько кількох процентів від загальної кількості частинок у реакційній зоні к-фазы суміші) виноситься

(диспергує) у зону полум'я, більша частина затримується на поверхні горіння у результаті їх агломерації (рисунок 3), де вони повністю дифузійно згорають у потоці газоподібних продуктів термічного розкладання окиснювача (рисунок 4).

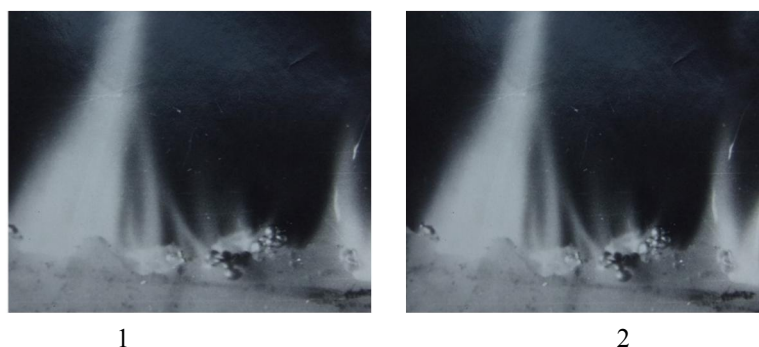
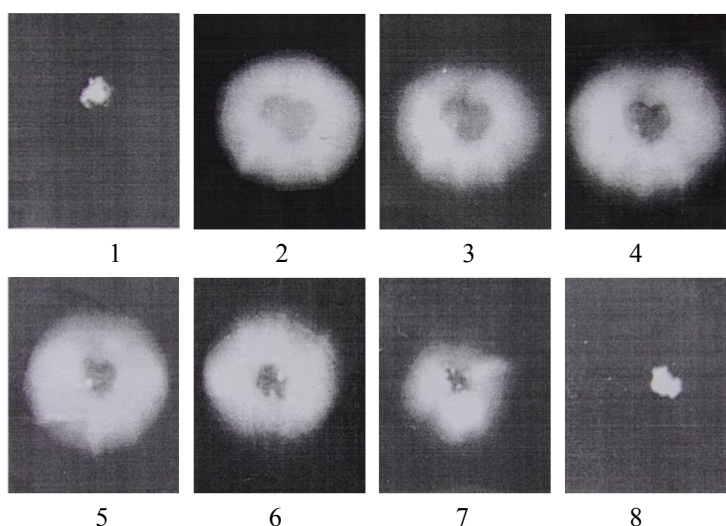


Рисунок 3 – Кінокадри мікрокінозйомки процесу агломерації частинок металевого пального на поверхні горіння суміші (суміші стехіометричні; $T_0 = 300$ К; $P = 10^5$ Па) [5, 6]



1 – знімок сферичної частинки металу до моменту її займання; 2, 3, 4, 5, 6 – знімки, що характеризують стаціонарне вигорання металу з частинки; 7 – знімок, що характеризує нестаціонарне вигорання металу з частинки; 8 – знімок частинки оксиду, що утворюється після згорання частинки металу

Рисунок 4 – Кінокадри мікрокінозйомки процесу дифузійного згорання частинки металевого пального у середовищі газоподібних продуктів розкладання окиснювача ($T_0 = 300$ К; $P = 10^5$ Па) [5, 6]

Результати досліджень. Механізм і математична модель горіння сумішей, рівняння для розрахунку швидкості розвитку їх горіння. На основі аналізу експериментальних відомостей про фізико-хімічні процеси, що протікають у різних зонах горіння досліджуваних сумішей, встановлено механізм їх горіння. Процес перетворення вихідної суміші в продукти згорання є стаціонарним, одновимірним і протікає в наступних трьох найхарактерніших зонах (рисунок 5). Зона I – прогрітий шар у к-фазі суміші. В цій зоні можна знехтувати хімічними перетвореннями. Зона II – реакційна зона к-фазі суміші, в якій тверда суміш перетворюється на газ, відбувається розкладання окиснювача та окиснення частинок металевго пального за реакціями, для яких $E \gg RT$ (E – енергія активації, R – газова стала). Спалахування частинок металу відбувається на поверхні горіння. Поверхня горіння – площина, на якій тверда суміш втрачає властивості конденсованого середовища. Середня температура поверхні – T_n . Більша частина частинок металу, що спалахнули, затримується на поверхні горіння

аж до їх повного згорання, а деякі з них диспергуються у г-фазу. Зона III – зона тепловиділення г-фазі. В цій зоні дисперговані частинки металевго пального згоряють в потоці продуктів розкладання окиснювача. При цьому утворюються продукти згорання з температурою T_c . Тепло, що виділяється, шляхом теплопровідності і радіації передається у к-фазу.

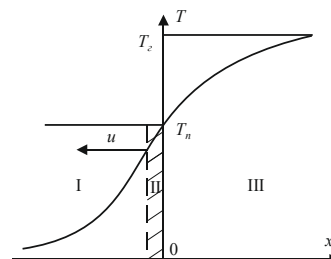


Рисунок 5 – Схематичне зображення розподілу температури поблизу поверхні горіння суміші

Розповсюдження фронту реакції горіння у к-фазі вихідної суміші описується відомою в теорії горіння системою рівнянь [5, 6]:

$$\frac{d}{dx}(\lambda_c \frac{dT}{dx}) - \rho_c c_c \frac{dT}{dx} - H_{ок} \rho_c u \zeta_{ок} \frac{d\psi_1}{dx} + H_m \rho_c \zeta_m u \frac{d\psi_2}{dx} = 0; \quad (3)$$

$$u \frac{d\psi_1}{dx} = K_1 e^{-E_1/(RT)}; \quad (4)$$

$$u \frac{d\psi_2}{dx} = K_2 \cdot C_{O_2}^m \cdot \bar{p}_2^n e^{-E_2/(RT)}; \quad (5)$$

з граничними умовами:

$$T = T_0, \psi_1 = \psi_2 = 0 \text{ при } x \rightarrow -\infty; \quad (6)$$

$$T = T_n, \psi_1 = \psi_{1n}, \psi_2 = \psi_{2n}; \lambda_c \left(\frac{dT}{dx} \right) = q_n + q_k \text{ при } x = 0. \quad (7)$$

Тут ρ_c, c_c, λ_c – густина (кг/м^3), питома теплоємність ($\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$) і коефіцієнт теплопровідності ($\text{Вт/м}\cdot\text{К}$) суміші; $H_{ок}$ – тепловий ефект реакції розкладання окиснювача (Дж/кг); ψ_i, K_i та E_i ($i = \overline{1,2}$) – відносні ступені розкладання окиснювача та окиснення металевго пального (по масі) та їх кінетичні константи (с^{-1} , кДж/моль) відповідно; $\zeta_{ок}, \zeta_m$ – відносні

масові вмісти окиснювача і металевго пального в суміші відповідно; q_n – тепловий потік від частинок металу, що згоряють на поверхні горіння, Вт/м^2 ; q_k – кондуктивний тепловий потік із зони полум'я, Вт/м^2 .

Проінтегрувавши рівняння (4) від $-\infty$ до x , отримуємо

$$\lambda_c \left(\frac{dT}{dx} \right) = \rho_c c_c u (T - T_0) - H_m \rho_c \zeta_m u \left(\psi_2 - \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_m \zeta_m} \psi_1 \right). \quad (8)$$

Помножимо рівняння (4) на $\frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_m \zeta_m}$, потім віднімемо їх з рівняння (5):

$$u \frac{d}{dx} \left(\psi_2 - \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_m \zeta_m} \psi_1 \right) = K_2 \cdot C_{O_2}^m \cdot \bar{p}_2^n e^{-E_2/(RT)} - K_1 \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_m \zeta_m} e^{-E_1/(RT)}. \quad (9)$$

Розділимо (9) на (8):

$$\frac{u}{\lambda_c} \cdot \frac{d}{dT} \left(\psi_2 - \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_m \zeta_m} \psi_1 \right) = \frac{K_2 \cdot C_{O_2}^m \cdot \bar{p}_2^n e^{-E_2/(RT)} - K_1 \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_m \zeta_m} e^{-E_1/(RT)}}{\rho_c c_c u (T - T_0) - H_m \rho_c \zeta_m u \left(\psi_2 - \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{H_m \zeta_m} \psi_1 \right)}. \quad (10)$$

Для випадку $E_i \gg RT$ ($i = \overline{1,2}$) досліджувані реакції розкладання окиснювача з утворенням газоподібних продуктів та окиснення в них частинок металу протікають в основному у зоні к-фази, що прилягає до поверхні горіння суміші (при температурі T_n). Згідно з методом розкладання експоненти [5, 6]:

$$\frac{E_i}{RT} = \frac{E_i}{R(T_n + \Delta T)} = \frac{E_i}{RT_n} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta T}{T_n}} \cong \frac{E_i}{RT_n} - \frac{E_i}{RT_n^2} \Delta T, \quad (11)$$

де $\Delta T = T - T_n$.

Тоді отримуємо, що

$$e^{-E_i/(RT)} \cong e^{E_i/(RT_n)} \cdot e^{E_i \cdot (T_n - T)/(RT_n^2)}. \quad (12)$$

Підставляючи (12) у (10), отримуємо

$$u \frac{d}{dx} \left(\psi_2 - \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} \psi_1 \right) = [K_2 \cdot C_{O_2}^m \cdot \bar{p}_c^n \cdot e^{E_2/(RT_n)} \cdot e^{\frac{E_2 \cdot (T_n - T)}{RT_n^2}} - K_1 \cdot \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} \cdot e^{E_1/(RT_n)} \cdot e^{\frac{E_1 \cdot (T_n - T)}{RT_n^2}}] \cdot [\rho_c c_c u (T_n - T_0) - H_M \rho_c u \zeta_M \left(\psi_2 - \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} \psi_1 \right)]^{-1}. \quad (13)$$

Рівняння (13) повинне задовольняти граничним умовам:

$$\psi_1 = \psi_2 \text{ при } T = T_0; \quad (14)$$

$$\psi_1 = \psi_{1n}, \psi_2 = \psi_{2n} \text{ при } T = T_n. \quad (15)$$

В результаті інтегрування рівняння (13) з граничними умовами (14) та (15) отримуємо

$$u^2 \left[\rho_c c_c (T_n - T_0) \left(\psi_{2n} - \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} \psi_{1n} \right) - \frac{H_M \zeta_M \rho_c}{2} \left(\psi_{2n} - \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{H_M \zeta_M} \psi_{1n} \right)^2 \right] = \frac{\lambda_c K_2 C_{O_2}^m \bar{p}_c^n R T_n^2}{E_2} e^{-E_2/(RT_n)} \cdot [1 - e^{\frac{E_2 \cdot (T_n - T_0)}{RT_n^2}}] - \frac{\lambda_c K_1 R T_n^2 H_{OK} \zeta_{OK}}{E_1 H_M \zeta_M} \cdot e^{-E_1/(RT_n)} \cdot [1 - e^{\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{RT_n^2}}]. \quad (16)$$

Проведені експериментальні дослідження і теоретичні оцінки [5, 6] показують, що для піротехнічних металізованих сумішей тепловиділенням за рахунок окиснення частинок металевого пального окиснювачем, що газифікується, порівняно з загальним тепловим балансом к-фази вихідної суміші можна,

у першому наближенні, знехтувати (відносна похибка не перевищує 2...4 %), хоча зазначеного тепла повністю вистачає для спалахування частинок металу на поверхні горіння. З урахуванням цього факту вираз (16) набуває вигляду

$$H_{OK} \zeta_{OK} \rho_c u^2 \cdot [c_c (T_n - T_0) \psi_{1n} + \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{2} \psi_{1n}^2] = \frac{\lambda_c K_1 R T_n^2 H_{OK} \zeta_{OK}}{E_1} \cdot e^{-E_1/(RT_n)} \cdot [1 - e^{\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{RT_n^2}}]. \quad (17)$$

При $x = 0$ з рівняння (8) отримуємо, що

$$\psi_{1n} = \frac{q_n + q_k - \rho_c c_c u (T_n - T_0)}{H_{OK} \rho_c u \zeta_{OK}}. \quad (18)$$

Підставивши вираз (18) у (17), отримаємо для швидкості горіння таке рівняння:

$$\rho_c^2 c_c^2 u^2 (T_n - T_0)^2 = (q_n + q_k)^2 + \frac{2 c_c \rho_c K_1 H_{OK} \zeta_{OK} R T_n^2}{E_1} e^{-E_1/(RT_n)} \cdot [1 - e^{\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{RT_n^2}}]. \quad (19)$$

Далі з отриманого спрощеного рівняння (19) випливає, що для розрахунку швидкості горіння сумішей необхідними є параметри T_n , q_n , q_k .

Визначення T_n . Експериментальне визначення T_n є складним і достатньо наближеним [5, 6], а дослідження аналітичного визначення T_n обмежені. Тому, використовуючи

експериментальні дані про кінетику термічного розкладання окиснювачів [5, 6], T_n можна визначити, припускаючи, що при $T = T_n$ відбувається повна газифікація окиснювача. Таким чином, з (17) при $\psi_{1n} \approx 1$, $\psi_{2n} \approx 0$, для визначення T_n отримуємо наступне рівняння:

$$\rho_c^2 u^2 [c_c (T_n - T_0) + \frac{H_{OK} \zeta_{OK}}{2}] = \lambda_c K_1 R T_n^2 \cdot e^{-E_1/(RT_n)} [1 - e^{\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{RT_n^2}}]. \quad (20)$$

Аналіз даних макрозйомки поверхні горіння сумішей [5, 6] показує, що кількість частинок металу, які диспергують у г-фазу, складає не більше 1...3 % від кількості частинок, що затримуються на поверхні аж до їх повного згоряння. Це дозволяє, у першому наближенні, знехтувати тепловим потоком з

г-фази за рахунок теплопровідності q_k порівняно з тепловим потоком від частинок, що згоряють на поверхні горіння q_n .

Таким чином, для розрахунку швидкості та температури поверхні горіння досліджуваних сумішей отримуємо таку замкнуту систему рівнянь:

$$\rho_c^2 u^2 c_c^2 (T_n - T_0)^2 = q_n^2 + \frac{2c_c \rho_c K_1 H_{ок} \zeta_{ок} R T_n^2}{E_1} \cdot \left[1 - e^{-\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{R T_n^2}} \right], \quad (21)$$

$$\rho_c^2 u^2 \left[c_c (T_n - T_0) + \frac{H_{ок} \zeta_{ок}}{2} \right] = \frac{\lambda_c K_1 R T_n^2}{\rho_c} \cdot \left[1 - e^{-\frac{E_1 \cdot (T_n - T_0)}{R T_n^2}} \right], \quad (22)$$

де $\zeta_{ок} = 1 - \zeta_M$.

Визначення q_n . З метою отримання більш простого аналітичного виразу для q_n були прийняті наступні припущення, що не протирічать отриманим експериментальним даним: з реакційної зони к-фази суміші у зону полум'я диспергують частинки металу з розміром, меншим критичного (для частинок такого розміру температура T_n є температурою займання T_z ($T_n \cong T_z$)), а частинки з розміром, що дорівнює або більше критичного, залишаються на поверхні горіння до їх повного згоряння; задана функція розподілу частинок металу за їх розмірами r_M (r_M – радіус частинки металу) апроксимується нормальним розподілом Гаусса [29], що характеризується деяким середньостатистичним розміром $\bar{r}_M$ і середньоквадратичним відхиленням від середнього σ_{r_M} ; функція розподілу частинок металу за їх розміром r_M не змінюється при переході до реакційної зони к-фази суміші, де вони спалахують.

Нехай у реакційній зоні к-фази суміші є N неоднорідностей. Розподіл вірогідностей розмірів частинок підпорядковується закону Гауса [29]:

$$\Phi(r_M) = \frac{1}{\sigma_{r_M} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{r_M} e^{-\frac{(r_M - \bar{r}_M)^2}{2\sigma_{r_M}^2}} dr_M, \quad (23)$$

де $\Phi(r_M)$ – відношення кількості частинок з розміром, меншим r_M , до загальної кількості частинок.

Густина вірогідності має вигляд

$$\varphi(r_M) = \frac{1}{\sigma_{r_M} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(r_M - \bar{r}_M)^2}{2\sigma_{r_M}^2}}, \quad (24)$$

де $\varphi(r_M)$ – відношення кількості частинок розміром $r_M \pm \Delta r_M / 2$ до загальної кількості частинок.

Розіб'ємо весь спектр частинок з розміром $r_M \leq r_M^*$ (r_M^* – критичний розмір частинок металу, для яких температура T_n є їх температурою займання) на i ($i = 1, 2, \dots$) областей, кожна з яких характеризується кількістю N_i частинок з розміром r_{Mi} . Масова швидкість їх горіння

$$\dot{m}_i = \dot{m}(r_{Mi}) \cdot N_i, \quad (25)$$

де $\dot{m}(r_{Mi})$ – масова швидкість горіння індивідуальної i -тої частинки. Тепловий потік на одиницю площі поверхні горіння за одиницю часу від цих частинок

$$q_{ni} = \frac{\dot{m}(r_{Mi}) \cdot N_i H_M}{S}, \quad (26)$$

де H_M – теплота згоряння металу; S – площа поверхні горіння. З визначення густини вірогідності (24) маємо

$$N_i = N \cdot \varphi(r_{Mi}) \cdot \Delta r_M. \quad (27)$$

Підставивши N_i у вираз (26), а потім підсумувавши і переходячи до границі, отримуємо

$$q_n = \frac{N H_M}{S} \cdot \int_{r_M^*}^{\infty} \dot{m}(r_M) \varphi(r_M) \cdot dr_M. \quad (28)$$

Для знаходження теплового потоку q_n необхідно, як це видно з (28), визначити кількість неоднорідностей N у реакційній зоні к-фази суміші. Для цього розіб'ємо весь спектр частинок на i областей. Тоді маса N_i частинок у цій області запишеться так:

$$M_i = \frac{4}{3} \rho_M \cdot \pi r_{Mi}^3 \cdot N_i. \quad (29)$$

Далі замінімо N_i згідно з (27), тоді отримуємо

$$M_i = \frac{4}{3} N \cdot \rho_M \cdot \pi r_{Mi}^3 \cdot \varphi(r_{Mi}) \cdot \Delta r_M. \quad (30)$$

Переходячи до границі та проінтегрувавши (30), отримуємо

$$M_i = \frac{4}{3} N \cdot \rho_M \cdot \pi \int_0^{\infty} r_M^3 \cdot \varphi(r_M) \cdot dr_M. \quad (31)$$

Інтеграл у співвідношенні (31) – момент третього порядку, який обчислюється у випадку нормального розподілу на основі відомих моментів першого та другого порядків ($I_1 = 0$; $I_2 = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$) [29]:

$$M_i = \frac{4}{3} N \cdot \rho_m \cdot \pi \bar{r}_m^3 \cdot \left[1 + \frac{3\sigma_{r_m}^2}{\bar{r}_m^2} \right]. \quad (32)$$

З другого боку, маса частинок металу, що зосереджені у реакційній зоні к-фази товщиною $\bar{r}_m$, дорівнює

$$M = \frac{\rho_c \cdot S \cdot \bar{r}_m}{\zeta_m}, \quad (33)$$

де ζ_m – відносний вміст металевго пального у суміші.

Звідси

$$N = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_m} \cdot \frac{S \cdot \zeta_m}{\bar{r}_m^3 \cdot \left[1 + \frac{3\sigma_{r_m}^2}{\bar{r}_m^2} \right]}. \quad (34)$$

Підставляючи (34) у вираз (28), отримаємо

$$q_n = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_m} \cdot \frac{H_m \cdot \zeta_m}{\bar{r}_m^3 \cdot \left[1 + \frac{3\sigma_{r_m}^2}{\bar{r}_m^2} \right]} \cdot \int_{r_m}^{\infty} \dot{m}(r_m) \varphi(r_m) \cdot dr_m. \quad (35)$$

Для знаходження r_m^* скористаємось відомими критичними умовами займання частинки металу у кисневмісних середовищах при температурі T_n [2, 5]:

$$\frac{Q \cdot E_2}{R \cdot T_n^2} \cdot \frac{\rho_m}{\lambda_{zn}} \cdot \frac{K_2 \cdot C_{O_2n}^m \cdot r_m^*}{\bar{\rho}_{zn}^n} \cdot e^{-E_2/R \cdot T_n} = \frac{1}{e}, \quad (36)$$

де Q , E_2 , K_2 – кінетичні та теплові параметри частинки металу у передполум'яному процесі; $C_{O_2n}^m$ – відносна концентрація O_2 у середовищі продуктів розкладання окиснювача при T_n ; λ_{zn} , $\bar{\rho}_{zn}$ – коефіцієнт теплопровідності та відносна густина (стосовно густини при нормальних умовах ($T = 300$ К, $P = 10^5$ Па)) газового середовища при T_n ; m , n – емпіричні константи). Далі з (36) знаходимо

$$r_m^* = \frac{\lambda_{zn} \bar{\rho}_{zn}^n \cdot R \cdot T_n^2}{\rho_m \cdot Q \cdot E_2 \cdot K_2 \cdot C_{O_2n}^m} \cdot e^{\frac{E_2}{R \cdot T_n} - 1}. \quad (37)$$

При цьому швидкість горіння частинки металу у кисневмісних середовищах $\dot{m}(r_m) = \frac{dm(r_m)}{dt}$, що входить у формулу (35), знаходиться з відомого виразу для дифузійного механізму процесу її горіння [2, 5]:

$$\frac{dm(r_m)}{dt} = \frac{4\pi r_m \lambda_{zn}}{c_{Pn}} \cdot Nu_n \cdot \ln \eta_n, \quad (38)$$

$$\text{де } \eta_n = \frac{1 + C_{O_2n} \cdot (H_m/L) + (c_{Pn}/L) \cdot (T_n - T_K)}{(1 + \frac{C_{O_2n}}{\gamma^*}) \cdot (1 - C_{O_2n})^{1/\gamma^*}}; \quad (39)$$

c_{Pn} , λ_{zn} – теплоємність і коефіцієнт теплопровідності газового потоку при $T = T_n$; C_{O_2} – відносна концентрація кисню в газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача (згідно з експериментальними даними по відтоку газоподібних продуктів [5, 6] значення C_{O_2} вважається рівним її значенню при повному розкладанні окиснювача); γ^* – відношення масового потоку кисню до масового потоку пари металу; L , T_K – прихована теплота випаровування і температура кипіння металу; $Nu_n = 2[1 - 0,08(2r \cdot V_n/v_{zn})^{2/3}]$ – критерій Нуссельта [5, 6]; v_{zn} – коефіцієнт кінематичної в'язкості газового потоку при $T = T_n$; V_n – середня швидкість відтоку газоподібних продуктів поблизу поверхні горіння.

Приведемо рівняння (37) та вираз (38) до вигляду, зручного для інтегрування, використовуючи відомі вирази для коефіцієнтів c_{Pn} , λ_{zn} та v_{zn} [2-4]:

$$\lambda_{zn} \approx \lambda_z^0 \cdot \left(\frac{T_n}{T_0^*} \right)^{0,5}, \quad (40)$$

$$c_{Pn} \approx c_P^0 \cdot \left(\frac{T_n}{T_0^*} \right)^{0,5}, \quad (41)$$

$$v_{zn} \approx v_z^0 \cdot \left(\frac{T_n}{T_0^*} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{P_a}{P} \right), \quad (42)$$

де λ_z^0 , c_P^0 , v_z^0 – значення параметрів, які беруться при нормальних умовах ($T_0^* = 290$ К, $P_a = 10^5$ Па).

При цьому V_n знаходиться з рівняння нерозривності на поверхні горіння

$$\rho_{zn} \cdot V_n = \rho_c \cdot u \cdot \zeta_{ок}, \quad (43)$$

де ρ_{zn} – густина газового потоку при температурі $T = T_n$.

Звідси отримуємо

$$V_n = \frac{\rho_c \cdot u \cdot \zeta_{ок}}{\rho_{zn}}, \quad (44)$$

$$\text{де } \rho_{zn} \approx \rho_z^0 \cdot \left(\frac{T_n}{T_0^*} \right) \cdot \left(\frac{P_a}{P} \right). \quad (45)$$

Отримані формули (35), (37)–(45) дають змогу розраховувати тепловий потік q_n залежно від співвідношення компонентів у суміші, дисперсності металевго пального та природи кисневмісного окиснювача, а також зовнішніх умов (температури та тиску навколишнього середовища).

Обговорення результатів. Отримані вище вирази (27), (28), (35), (37)–(45) дають можливість розраховувати швидкість розвитку горіння досліджуваних сумішей u , температуру їх поверхні горіння T_n , а також швид-

кість горіння частинок металу у продуктах розкладання цих сумішей $\frac{dm(r_M)}{dt}$ та тепловий потік з поверхні горіння сумішей q_n . З використанням необхідних значень фізико-хімічних параметрів сумішей та їх компонентів [2-4], стандартного програмного забезпечення [5, 6] було проведено розрахунки залежностей швидкості горіння сумішей від технологічних параметрів, а також параметрів зовнішніх термічних дій (температури нагріву, зовнішнього тиску) (рисунки 6–9). З результатів зіставлення розрахункових залежностей з отриманими експериментальними даними випливає, що між ними спостерігається повний якісний збіг. Кількісні відмін-

ності між розрахунком і експериментом не перевищують 7...9 % (замість 10...15 % у існуючих моделях горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей [5, 6]).

В результаті проведених розрахунків було встановлено критичні діапазони зміни швидкості горіння сумішей, перевищення яких призводить до вибухонебезпечного розвитку процесу їх горіння (таблиця 1):

$$u_i^{**} \leq u \leq u_i^*, i = \overline{1,4}, \quad (46)$$

де індексу “i” відповідає конкретна суміш (“1” – суміш Mg + CuO; “2” – суміш Mg + NiO; “3” – суміш Al + CuO; “4” – суміш Al + NiO).

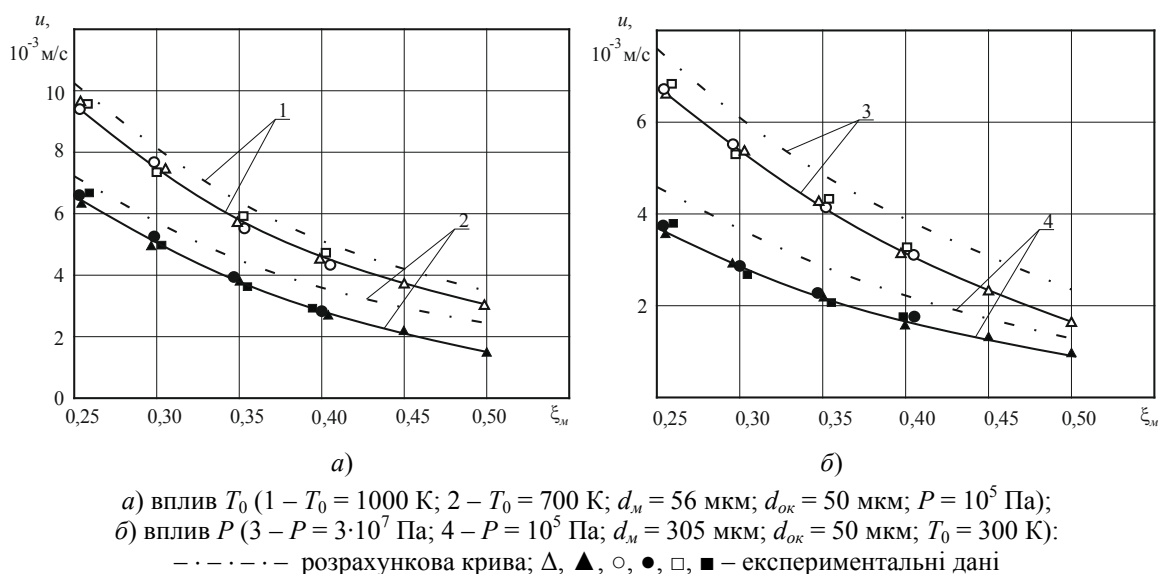


Рисунок 6 – Вплив температури нагріву та зовнішнього тиску на залежність швидкості горіння суміші магній + оксид міді від відносного вмісту металевого пального

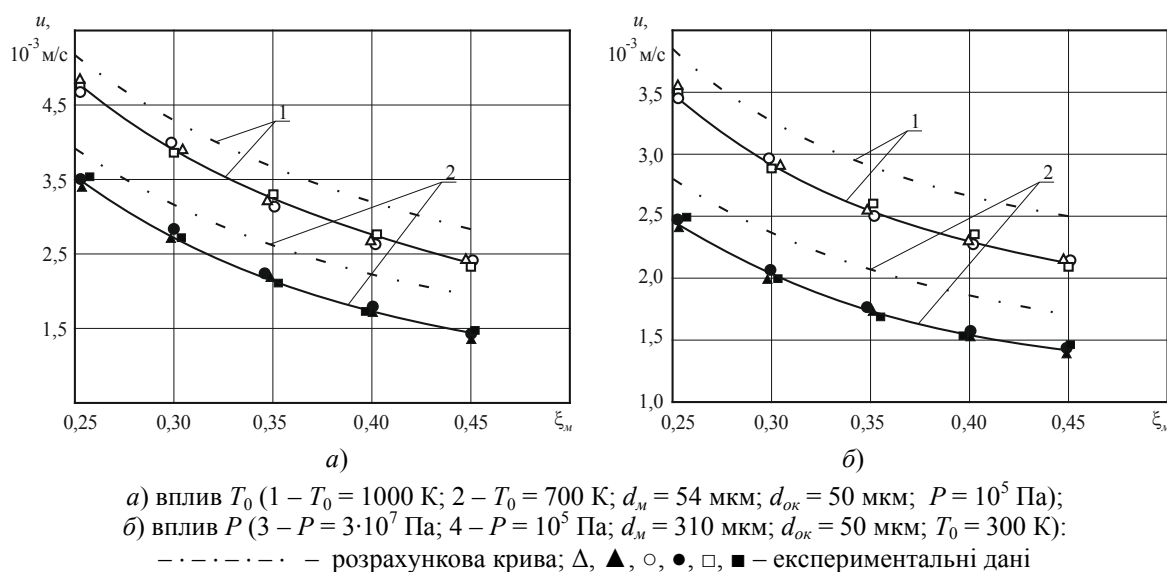
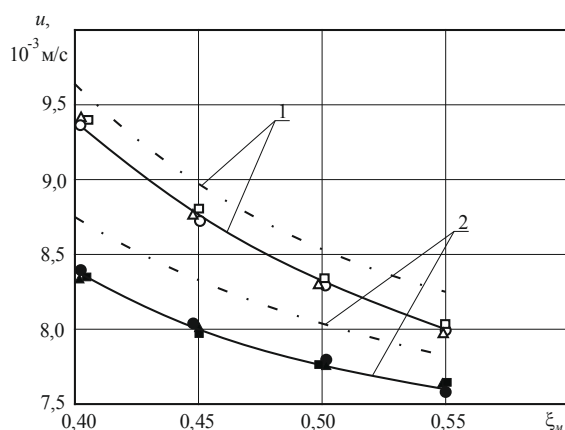


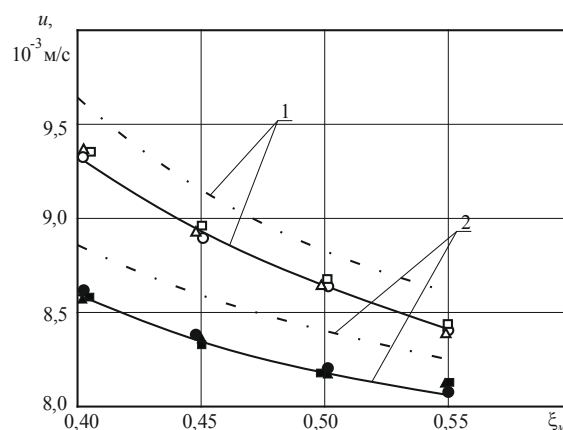
Рисунок 7 – Вплив температури нагріву та зовнішнього тиску на залежність швидкості горіння суміші алюміній + оксид міді від відносного вмісту металевого пального

Таблиця 1 – Розрахункові значення параметрів u_i^* , u_i^{**} ($i=1,4$)

Суміш Параметр	Mg + CuO	Mg + NiO	Al + CuO	Al + NiO
u_1^* , 10^{-3} м/с	0,82			
u_1^{**} , 10^{-3} м/с	4,76			
u_2^* , 10^{-3} м/с		1,19		
u_2^{**} , 10^{-3} м/с		5,73		
u_3^* , 10^{-3} м/с			0,63	
u_3^{**} , 10^{-3} м/с			1,64	
u_4^* , 10^{-3} м/с				0,45
u_4^{**} , 10^{-3} м/с				1,00



а)



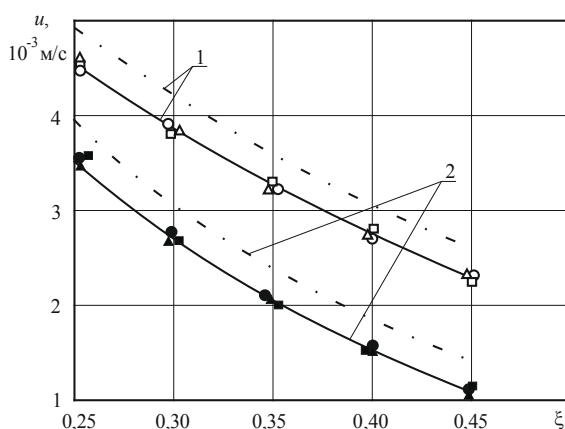
б)

а) вплив T_0 (1 – $T_0 = 1000$ К; 2 – $T_0 = 700$ К; $d_m = 56$ мкм; $d_{ок} = 50$ мкм; $P = 10^5$ Па);

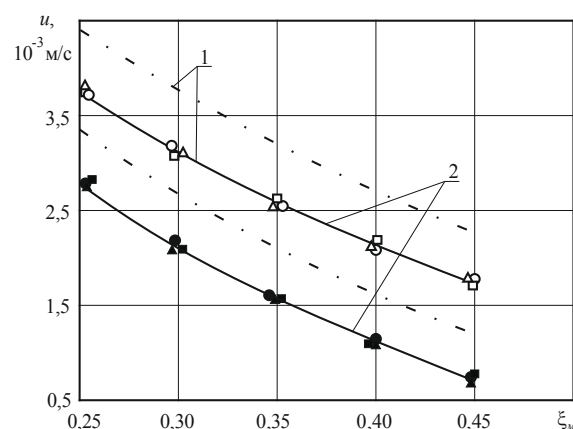
б) вплив P (3 – $P = 3 \cdot 10^7$ Па; 4 – $P = 10^5$ Па; $d_m = 305$ мкм; $d_{ок} = 50$ мкм; $T_0 = 300$ К):

— — — — — розрахункова крива; Δ , $\blacktriangle$, $\circ$, $\bullet$, $\square$, $\blacksquare$ — експериментальні дані

Рисунок 8 – Вплив температури нагріву та зовнішнього тиску на залежність швидкості горіння суміші магній + оксид нікелю від відносного вмісту металевих пального



а)



б)

а) вплив T_0 (1 – $T_0 = 1000$ К; 2 – $T_0 = 700$ К; $d_m = 54$ мкм; $d_{ок} = 50$ мкм; $P = 10^5$ Па);

б) вплив P (3 – $P = 3 \cdot 10^7$ Па; 4 – $P = 10^5$ Па; $d_m = 310$ мкм; $d_{ок} = 50$ мкм; $T_0 = 300$ К):

— — — — — розрахункова крива; Δ , $\blacktriangle$, $\circ$, $\bullet$, $\square$, $\blacksquare$ — експериментальні дані

Рисунок 9 – Вплив температури нагріву та зовнішнього тиску на залежність швидкості горіння суміші алюміній + оксид нікелю від відносного вмісту металевих пального

Таким чином, зовнішні термодії на поверхню корпусів виробів з зарядами досліджуваних сумішей в умовах їх зберігання, транспортування або пострілу та польоту можуть призводити до суттєвого нагрівання їх корпусів, що спричиняє розвиток вибухонебезпечного процесу горіння заряду суміші в замкнутому об'ємі під корпусом виробу в умовах підвищених температур нагріву і тисків зовнішнього середовища, що є основною причиною прискорення процесу його горіння, передчасного спрацьовування виробу та його пожежонебезпечного руйнування. Тому важливо на стадії проектування та стендових випробувань виробів, що моделюють зазначені зовнішні термодії, вміти визначати критичні діапазони зміни швидкості розвитку горіння зарядів сумішей при зовнішніх термічних впливах, перевищення яких призводить до пожежовибухонебезпечного руйнування виробів в екстремальних умовах експлуатації.

Висновки. На основі проведених теоретико-експериментальних досліджень процесу горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій отримано наступні нові результати:

1. Встановлено механізм горіння сумішей, згідно з яким процес перетворення вихідної суміші у продуктах згоряння є стаціонарним, одновимірним і протікає у таких найхарактерніших зонах: зона I – прогрітий шар у к-фазі суміші, де хімічними перетвореннями можна знехтувати; зона II – реакційна зона к-фази суміші, в якій відбувається перетворення твердої суміші на газ, що містить окремі частинки металу, які окиснюються у продуктах розкладання окиснювача; поверхня горіння (поверхня розділу фаз) – площа, на якій суміш втрачає властивості конденсованого середовища, при цьому більша частина частинок металу, що спалахнули, в результаті їх агломерації затримуються на ній до повного згоряння; зона III – зона полум'я (зона тепловиділення г-фази), в якій дисперговані частинки металу згоряють у дифузійному режимі у потоці продуктів розкладання окиснювача, утворюючи продукти згоряння.

2. Розроблено модель горіння ущільнених двокомпонентних сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів, яка, на відміну від існуючих моделей піротехнічних нітратно-металевих сумішей, враховує кінетичні характеристики термічного розкладання

окиснювача та високотемпературного окиснення, займання та горіння частинок металу у продуктах розкладання, що дозволяє більш точно (відносна похибка знижено до 7...9 % замість 10...15 % у існуючих моделях) розраховувати залежності швидкості горіння сумішей від підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків для різних значень технологічних параметрів (співвідношення компонентів, дисперсності металевих пального, природи металу та окиснювача та ін.) та визначати її критичні діапазони зміни у цих умовах, перевищення яких призводить до прискорення процесу горіння сумішей та пожежовибухонебезпечного руйнування виробів.

Перспективи подальших досліджень. В результаті передчасного спрацьовування досліджуваних сумішей в умовах зовнішніх термодій утворюються продукти згоряння з великим вмістом високотемпературного конденсату, що призводить до пожежовибухонебезпечного спалахування навколишніх об'єктів. Тому перспективними є термодинамічні розрахунки залежностей вмісту високотемпературного конденсату у продуктах згоряння від технологічних чинників та зовнішніх умов для досліджуваних сумішей.

Список використаних джерел

- [1] А. А. Шидловский, А. И. Сидоров, и Н. А. Силин, *Пиротехника в народном хозяйстве*. Москва, Россия: Машиностроение, 1978.
- [2] Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Л. Я. Кашпоров и др., *Металлические горючие гетерогенных конденсированных систем*. Москва, Россия: Машиностроение, 1976.
- [3] Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Н. И. Зарипов и др., *Окислители гетерогенных конденсированных систем*. Москва, Россия: Машиностроение, 1978.
- [4] Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Л. Я. Кашпоров и др., *Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем*. Москва, Россия: Машиностроение, 1982.
- [5] В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. И. Заика, И. В. Яценко, и В. В. Цыбулин, *Процессы горения металлизированных конденсированных систем*. Киев, Украина: Наукова думка, 2008.
- [6] 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.
- [7] А. В. Молодык, "История развития научно-технического направления "Оптические головки самонаведения", на 2-й Укр. наук.-техн. конф. Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: зб. тез доп. Київ: Арсенал, 2016.
- [8] А. В. Молодык, Н. И. Носов, Г. А. Смоляр, и Д. В. Лозбин, "Опыт и перспективы решения теплофизических проблем создания оптико-электронных специзделий ИК-техники", на 2-й Укр. наук.-техн. конф. Спеціальне приладобудування: стан та перспективи: зб. тез доп. Київ: Арсенал, 2016.
- [9] Л. П. Вогман, и В. В. Лепесий, "Требования пожарной безопасности к пиротехническим изделиям бытового назначения", *Пожаровзрывобезопасность*, № 4, с. 51-57, 1998.
- [10] Л. П. Вогман, В. А. Зуйков, В. Е. Татаров, и В. В. Лепесий, "Разработка рекомендаций по обеспечению пожарной безопасности фейерверочных пиротехнических изделий", *Пожаровзрывобезопасность*, № 3, с. 24-41, 2002.
- [11] ДСТУ 4105 – 2002. *Вироби піротехнічні побутові. Загальні вимоги безпеки*. Затверджено наказом Держстандарту України від 12.06.2002 р., № 356.
- [12] СТО 4. 3. 1 – 2003. *Изделия пиротехнические. Правила безопасности при обращении с пиротехнической продукцией*. Сергиев-Посад: Репид-фейерверк, 2013.
- [13] СТО 4. 3. 2 – 2003. *Изделия пиротехнические. Порядок и правила организации и проведения фейерверков*. Сергиев-Посад: Репид-фейерверк, 2013.
- [14] ДСТУ 4316 – 2004. *Вироби піротехнічні побутового призначення. Вимоги пожежної безпеки і методи випробувань*. Затверджено наказом Держстандарту України від 05.07.2004 р., № 130.
- [15] Г. Н. Кириллов и др., *Требования пожарной безопасности при обращении пиротехнической продукции. Обзорно-аналитический материал*. Москва, Россия: ВНИИПО и ДНД МЧС России, 2010.
- [16] В. А. Маковей, "Основные требования пожарной безопасности при обращении пиротехнической продукции", *Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность*, № 1-3 (6-8), с. 13-21, 2011.
- [17] В. А. Ващенко, "Оптимізація впливу зовнішніх дій на процеси взаємодії хвилі горіння з металізованими конденсованими системами", *Вісті Академії інженерних наук України*, № 1, с. 31-39, 1995.
- [18] В. А. Ващенко, "Проектування оптимальних технологічних режимів взаємодії хвиль горіння з металізованими конденсованими системами", *Вісті Академії інженерних наук України*, № 2, с. 41-48, 1995.
- [19] В. А. Ващенко, *Высокотемпературные технологические процессы взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами*, Москва, Россия: Деп. в ВИНТИ 07.08.96.
- [20] О. В. Кириченко, В. В. Цыбулин, И. В. Яценко, и В. А. Ващенко, "Моделирование пожаровзрывоопасных режимов горения нитратных систем при применении пиротехнических изделий", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 35-41, 2008.
- [21] О. В. Кириченко, "Моделирование предельных, неустойчивых режимов горения пиротехнических нитратных систем с учетом агломерации металлического горючего", *Науковий вісник УкрНДІПБ*, № 1 (17), с. 78-86, 2008.
- [22] О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, та В. В. Цыбулін, "Пожежонебезпечні термовпливи на поверхню металевих корпусів піротехнічних виробів в умовах пострілу та польоту", *Проблеми пожарной безопасности*, № 32, с. 98-112, 2012.
- [23] О. В. Кириченко, "Тепловые воздействия на поверхность металлических обтекателей пиротехнических изделий в условиях выстрела и полета", *Пожаровзрывобезопасность*, № 9, с. 6-11, 2013.
- [24] О. В. Кириченко, "Моделирование процесса нагрева металлических оболочек пиротехнических изделий в условиях внешних термовоздействий", *Чрезвычайные ситуации: образование и наука*, № 2, с. 37-45, 2013.
- [25] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, Є. О. Тищенко, та В. В. Цыбулін, "Визначення допустимих режимів нагріву

- піротехнічних сумішей при їх експлуатації", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 5-11, 2018.
- [26] О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, та В. А. Ващенко, "Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій", *Internauka*, № 5/5798, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.inter-nauka.com>.
- [27] 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.
- [28] В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, В. Д. Акиншин, В. В. Цыбулин, и И. В. Яценко, "Комплекс испытательных установок, моделирующих реальные условия применения пиротехнических нитратосодержащих изделий", *Научный вестник УкрНДІПБ*, № 1 (19), с. 127-137, 2009.
- [29] Г. Корн, Т. Корн, *Справочник по математике для научных работников и инженеров*, Москва, Россия: Наука, 1984.
- [6] О. V. Kirichenko, 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].
- [7] A. V. Molodyk, "The history of the development of scientific and technical direction "Optical homing heads", in *2nd Ukr. Sci. and Tech. Conf. Special instrumentation: state and prospects*: coll. of abstracts. Kiev, Ukraine: Arsenal, 2016 [in Russian].
- [8] A. V. Molodyk, N. I. Nosov, G. A. Smolar, and D. V. Lozbin, "Experience and prospects for solving thermo-physical problems of creating optoelectronic special products for infrared technology", in *2nd Ukr. Sci. and Tech. Conf. Special instrumentation: state and prospects*: coll. of abstracts. Kiev, Ukraine: Arsenal, 2016 [in Russian].
- [9] L. P. Vogman, and V. V. Lepesiy, "Fire safety requirements for household pyrotechnic products", *Pozharovzryvobezopasnost*, no. 4, pp. 51-57, 1998 [in Russian].
- [10] L. P. Vogman, V. A. Zuykov, V. E. Tatarov, and V. V. Lepesiy, "Development of recommendations for ensuring fire safety of fireworks pyrotechnic products", *Pozharovzryvobezopasnost*, no. 3, pp. 24-41, 2002 [in Russian].
- [11] DSTU 4105 – 2002. *Household pyrotechnic products. General safety requirements*. Approved by the order of the State Standard of Ukraine of June 12, 2002, no. 356 [in Ukrainian].
- [12] STO 4. 3. 1 – 2003. *Pyrotechnic products. Safety rules for handling pyrotechnic products*. Sergiev-Posad, Russia: Rapid-feyerverk, 2013 [in Russian].
- [13] STO 4. 3. 2 – 2003. *Pyrotechnic products. The procedure and rules for organizing and conducting fireworks*. Sergiev-Posad, Russia: Rapid-feyerverk, 2013 [in Russian].
- [14] DSTU 4316 – 2004. *Pyrotechnic articles for household use. Fire safety requirements and test methods*. Approved by the order of the State Standard of Ukraine of July 5, 2004, no. 130 [in Ukrainian].
- [15] G. N. Kirillov et al., *Fire safety requirements for handling pyrotechnic products. Review and analytical material*. Moscow,

References

- [1] A. A. Shidlovskii, A. I. Sidorov, and N. A. Silin, *Pyrotechnics in the national economy*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1978 [in Russian].
- [2] N. A. Silin, V. A. Vashchenko, L. Ya. Kashporov et al., *Metallic fuels of heterogeneous condensed systems*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1976 [in Russian].
- [3] N. A. Silin, V. A. Vaschenko, N. I. Zaripov et al., *Oxidants of heterogeneous condensed systems*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1978 [in Russian].
- [4] N. A. Silin, V. A. Vaschenko, L. Ya. Kashporov et al., *Combustion of metalized heterogeneous condensed systems*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1982 [in Russian].
- [5] V. A. Vaschenko, O. V. Kirichenko, Yu. G. Lega, P. I. Zaika, I. V. Yatsenko, and V. V. Tsybulin, *Combustion processes of metallized condensed systems*. Kiev, Ukraine: Naukova dumka, 2008 [in Russian].

- Russia: VNIPO i DND MChS Rossii, 2010 [in Russian].
- [16] V. A. Makovei, "Basic requirements of fire safety when handling pyrotechnic products", *Chrezvychnyye situatsii: promyshlennaya i ekologicheskaya bezopasnost*, no. 1-3 (6-8), pp. 13-21, 2011 [in Russian].
- [17] V. A. Vashchenko, "Optimization of the influence of external actions on the processes of interaction of the combustion wave with metallized condensed systems", *Visti Akademiyi inzhenernykh nauk Ukrayiny*, no. 1, pp. 31-39, 1995 [in Ukrainian].
- [18] V. A. Vashchenko, "Design of optimal technological modes of interaction of combustion waves with metallized condensed systems", *Visti Akademiyi inzhenernykh nauk Ukrayiny*, no. 2, pp. 41-48, 1995 [in Ukrainian].
- [19] V. A. Vashchenko, *High-temperature technological processes of interaction of concentrated energy sources with materials*. Moscow, Russia: Deposited at VINITI 08.07.96 [in Russian].
- [20] O. V. Kirichenko, V. V. Tsybulin, I. V. Yatsenko, and V. A. Vashchenko, "Modeling of fire and explosion hazardous modes of combustion of nitrate systems when using pyrotechnic products", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 4, pp. 35-41, 2008 [in Russian].
- [21] O. V. Kirichenko, "Modeling of limiting, unstable combustion modes of pyrotechnic nitrate systems taking into account the agglomeration of metallic fuel", *Naukovyi visnyk UkrNDIPB*, no. 1 (17), pp. 78-86, 2008 [in Russian].
- [22] O. V. Kirichenko, V. A. Vashchenko, and V. V. Tsybulin, "Fire-hazardous thermal effects on the surface of metal housings of pyrotechnic articles in the conditions of fire and flight", *Problemy pozharnoy bezopasnosti*, no. 32, pp. 98-112, 2012 [in Ukrainian].
- [23] O. V. Kirichenko, "Thermal effects on the surface of metal fairings of pyrotechnic products in the conditions of a shot and flight", *Pozharovzryvobezopasnost*, no. 9, pp. 6-11, 2013 [in Russian].
- [24] O. V. Kirichenko, "Modeling of the heating process of metal shells of pyrotechnic products under conditions of external thermal effects", *Chrezvychnyye situatsii: obrazovaniye i nauka*, no. 2, pp. 37-45, 2013 [in Russian].
- [25] O. V. Kirichenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, Ye. O. Tishchenko, and V. V. Tsybulin, "Determination of permissible modes of heating of pyrotechnic mixtures during their operation", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 2, pp. 5-11, 2018 [in Ukrainian].
- [26] O. S. Dibrova, O. V. Kirichenko, R. B. Motrichuk, and V. A. Vashchenko, "Regularities of influence of technological parameters on fire safety of pyrotechnic nitrate-titanium mixtures in the conditions of external thermal actions", *Internauka*, no. 5/5798, 2020. [Online]. Available: <http://www.inter-nauka.com> [in Ukrainian].
- [27] 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.
- [28] V. A. Vashchenko, O. V. Kirichenko, V. D. Akinshin, V. V. Tsybulin, and I. V. Yatsenko, "A complex of test installations simulating real conditions for the use of pyrotechnic nitrate-containing products", *Naukovyi visnyk UkrNDIPB*, no. 1 (19), pp. 127-137, 2009 [in Russian].
- [29] G. Korn, and T. Korn, *Handbook on mathematics for scientists and engineers*. Moscow, Russia: Nauka, 1984 [in Russian].

E. P. Kirichenko¹,

e-mail: kirychenkojp@gmail.com

V. V. Kovalychin², *Dr. Tech. Sc., Professor*,

e-mail: ldubzh.lviv@dsns.gov.ua

V. M. Gvozdz¹, *Ph. D., Professor*,

e-mail: chipb@dsns.gov.ua

V. A. Vaschenko³, *Dr. Tech. Sc., Professor*,

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

S. O. Kolinko³, *Ph. D., Associate Professor*,

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

V. V. Tsybulin³

e-mail: tsybulin22@gmail.com

¹Cherkasy Institute of Fire Safety named by Chornobyl Heroes

of National University of Civil Defense of Ukraine

Onoprienko st., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

²Lviv State University of Life Safety,

Kleparivska st., 35, Lviv, 79007, Ukraine

³Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

RESEARCH OF THE MECHANISM AND DEVELOPMENT OF A MODEL FOR THE DEVELOPMENT OF THE PROCESS OF COMBUSTION OF PYROTECHNIC MIXTURES METAL FUEL + OXIDE OF METAL AT EXTERNAL THERMAL ACTIONS

The aim of the work is to establish the mechanism of combustion of two-component compacted mixtures of magnesium and aluminum powders with metal oxides and to develop a model of their combustion to determine critical ranges of combustion rate of mixtures taking into account external thermal influences.

The analysis of experimental data on physical and chemical processes occurring in different combustion zones of the considered mixtures allows to establish the mechanism of their combustion according to which the process of conversion of the initial mixture into combustion products in the first approximation is stationary, one-dimensional and takes place in the following three most characteristic zones. Zone I is a heated layer in the mixture condensed phase, where chemical conversions can be neglected. Zone II is a reaction zone of the condensed phase of the mixture, in which the solid mixture is converted into a gas containing individual metal particles. Within this zone, oxidant decomposition and vigorous oxidation of metal fuel particles take place. The ignition of metal particles occurs on the combustion surface. Most of ignited metal particles, as a result of their agglomeration, are delayed on the combustion surface until their complete combustion. Heat from burning metal particles is transferred to the depth of the condensed phase. Zone III is a zone of heat release of the gas phase. In this zone, dispersed metal fuel particles are burned in the diffusion mode in the stream of oxidant decomposition products. The heat released is transferred to the condensed phase by thermal conductivity and radiation.

A model of combustion of compacted two-component mixtures of magnesium, aluminum and metal oxides has been developed, which, in contrast to existing models of pyrotechnic nitrate-metal mixtures, takes into account kinetic characteristics of thermal decomposition of the oxidant and high-temperature oxidation, ignition and combustion of metal particles in decomposition products. This allows to more accurately calculate (relative error is reduced to 7... 9 % instead of 10... 15 % in existing models) the dependences of the combustion rate of mixtures on elevated heating temperatures and external pressures for different values of technological parameters (ratio of components, dispersion of metal fuel, nature of metal and oxidant, etc.). The model also allows to determine critical ranges of changes in the rate of combustion in these conditions, exceeding of which leads to accelerated mixtures combustion and explosive destruction of products.

Keywords: *fire safety, pyrotechnic mixtures, thermal influences, combustion processes, combustion models of metallized condensed systems.*