

Технічні науки

УДК 614.841:536.46

Діброва Олексій Сергійович

ад'юнкт

Національний університет цивільного захисту України

Диброва Алексей Сергеевич

адъюнкт

Национальный университет гражданской защиты Украины

Dibrova Oleksiy

Adjunct

National University of Civil Defence of Ukraine

Кириченко Оксана В'ячеславівна

доктор технічних наук, професор,

завідувач кафедри пожежно-профілактичної роботи

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

Національного університету цивільного захисту України

Кириченко Оксана Вячеславовна

доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой пожарно-профилактической работы

Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля

Национального университета гражданской защиты Украины

Kyrychenko Oksana

Doctor of Technical Sciences, Professor,

Head of Department Department of Fire Prevention Work

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of

National University of Civil Defense of Ukraine

Мотрічук Роман Борисович

ад'юнкт

*Управління Державної служби України
з надзвичайних ситуацій у Черкаській області*

Мотричук Роман Борисович

адъюнкт

*Управление Государственной службы Украины
по чрезвычайным ситуациям в Черкасской области*

Motrichuk Roman

Adjunct

*Department of the State Emergency Service of
Ukraine in the Cherkasy Region*

Ващенко Вячеслав Андрійович

*доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри фізики та прикладного матеріалознавства
Черкаський державний технологічний університет*

Ващенко Вячеслав Андреевич

*доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой физики и прикладного материаловедения
Черкасский государственный технологический университет*

Vashchenko Vyacheslav

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Physics and Applied Materials Science
Cherkasy State Technological University*

**ПІДВИЩЕННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ ПІРОТЕХНІЧНИХ
НІТРАТНО-МЕТАЛЕВИХ СУМІШЕЙ В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ
ТЕРМІЧНИХ ДІЙ**

**FIRE HAZARD INFLUENCE OF COMPONENTS RELATION AND
EXTERNAL PRESSURE ON THE TEMPERATURE OF THE
COMBUSTION PRODUCTS OF PYROTECHNICAL NITRATE METAL
MIXTURES AND THE CONTENT IN THEM THE HIGH
TEMPERATURE CONDENSATE
ПОВЫШЕНИЕ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ НИТРАТНО-МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СМЕСЕЙ
В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ТЕРМИЧЕСКИХ ДЕЙСТВИЙ**

***Анотація.** Представлено результати експериментальних досліджень процесів спалахування частинок металевих палих піротехнічних сумішей у газоподібних продуктах високотемпературного розкладання нітратовмісних окиснювачів в умовах зовнішніх термічних дій, що призводять до передчасного пожежовибухонебезпечного спрацьовування виробів на їх основі.*

***Ключові слова:** пожежна безпека, піротехнічні суміші, нітратно-металеві суміші, термічна дія, піротехнічні вироби, термодинамічні розрахунки.*

***Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований процессов воспламенения частиц металлических горючих пиротехнических смесей в газообразных продуктах высокотемпературного разложения нитратовмисных окислителей в условиях внешних термических действий, приводящих к преждевременному пожаровзрывоопасными срабатывания изделий на их основе.*

***Ключевые слова:** пожарная безопасность, пиротехнические смеси, нитратно-металлические смеси, термическое воздействие, пиротехнические изделия, термодинамические расчеты.*

Summary. *The results of experimental studies of the burning of particles of metal combustible pyrotechnic mixtures in gaseous products of high-temperature decomposition of nitrate-containing oxidizers in the external thermal conditions, leading to premature fire-explosive operation of their products, are presented.*

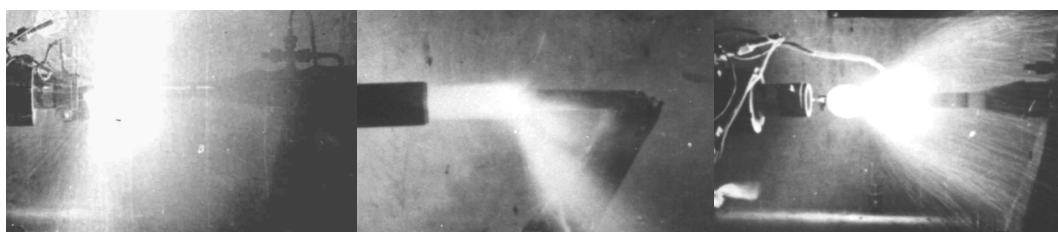
Key words: *fire safety, pyrotechnic mixtures, nitrate-metallic mixtures, thermal action, pyrotechnic articles, thermodynamic calculations.*

Вступ. Нині піротехнічні суміші на основі металевих пальних (магнію, алюмінію, титану, цирконію, алюмінієво-магнієвих сплавів (АМС) та ін.) та нітратовмісних окиснювачів (KNO_3 , NaNO_3 , $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ та ін.) широко використовуються у різних галузях народного господарства та військової техніки (суміші для феєрверків, освітлювальні патрони та артснаряди, фотоосвітлювальні авіабомби, сигнальні патрони, трасери для наведення на ціль протитанкових керованих ракет ПТКР, піротехнічні ГЧ-снаряди (інфрачервоні мішені-пастки для сучасних ракет з тепловим наведенням) тощо) [1-6]. В умовах вимушеного зовнішнього нагріву (наприклад, при спалахуванні складських приміщень, де зберігаються піротехнічні вироби, споряджені зарядами з розглядуваних сумішей, в умовах транспортування при інтенсивному конвективному нагріві їх поверхонь, або при аеродинамічному нагріві металевих оболонок виробів при пострілі та польоті) піротехнічні суміші можуть спалахувати з різким прискоренням подальшого процесу їх згоряння, руйнуванням виробів з утворенням високотемпературних продуктів згоряння, які розлітаються з великими швидкостями у різні боки, будучи пожежонебезпечними для навколишніх об'єктів (споруд, паливно-мастильних матеріалів, пускових установок з обслуговуючим персоналом тощо) (рис. 1) [7-12].

Тому для підвищення пожежної безпеки піротехнічних сумішей у вказаних умовах необхідно, в першу чергу, мати дані про закономірності процесу спалахування металевих пальних у газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювачів, який передує прискореному розвитку їх горіння, що призводить до передчасного вибухонебезпечного спрацьовування виробів.

До теперішнього часу окремі дані по спалахуванню вказаних металевих пальних у різних газоподібних окиснювальних середовищах знаходяться у багаточисельних довідниках, монографіях, наукових статтях та працях [13-21], що утруднює як встановлення закономірностей спалахування металевих пальних в умовах, близьких до реальних умов горіння піротехнічних сумішей, так й оперативне їх використання в якості керованої бази даних з властивостей компонентів сумішей, що характеризують їх пожежонебезпечні властивості в умовах різних зовнішніх термодій.

Крім цього, відсутні систематизовані дані по впливу дисперсності порошків металевих пальних та основних параметрів навколишнього середовища (температури та тиску середовища, відносної концентрації у ньому водню) на таку важливу характеристику процесу горіння сумішей, як температура займання (T_z , К) частинок металів у газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювачів.



a)



б)

Рис. 1. Кінокадри загальної картини вимушених пожежонебезпечних руйнувань виробів в умовах інтенсивних зовнішніх термодій на їх поверхні, отриманих на стандартному піротехнічному обладнанні [3; 6; 9]:

а) – локальні джерела тепла (використовувався ІЧ-нагрів виробів кварцовими лампами типу КГМ-220-1000-1 із застосуванням керованих термодатчиків РИФ-101 для контролю температури на поверхні виробів в діапазоні 300...1900 К []; б) – поздовжній надзвуковий обдув потоком повітря поверхні виробів зі швидкостями до $2 \cdot 10^3$ м/с

Тому **метою** даної роботи є отримання вказаних даних, а також їх узагальнення у вигляді нових закономірностей, сукупність яких являє собою одну зі складових частин бази даних при прогнозуванні пожежонебезпечних властивостей піротехнічних сумішей в умовах зовнішніх термодій.

В результаті проведених досліджень [6; 8; 9] було встановлено, що при температурах, властивих конденсованій фазі піротехнічних сумішей в умовах їх спалахування та розвитку горіння, основними активними газоподібними продуктами термічного розкладання нітратовмісних окислювачів є O_2 та N_2 . Тому нижче розглядаються результати досліджень процесів спалахування частинок металевих палив при підвищених температурах нагріву у вказаних газоподібних продуктах.

Результати досліджень та їх аналіз. Усі дослідження проводились на порошках металевих палив та окиснювачів, що випускаються піротехнічною промисловістю [1-3; 6]. Для дослідження впливу підвищених температур нагріву (до 1900 К) та зовнішніх тисків (до 10^7 Па)

на основні характеристики спалахування частинок металевих пальних у газовому середовищі $O_2 + N_2$ використовувалось стандартне обладнання [6, 9]. Відносна похибка вимірювань не перевищувала 5...7 %. При цьому використовувались сучасні методи фізико-хімічного аналізу [6; 9]: методи мікрозйомки (кінокамера СКС-1М, швидкість зйомки $3 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^3$ кадр/с зі зменшенням у 1,5...2 рази); фотографічні методи; контактні та безконтактні методи вимірювання температури; хімічний аналіз тощо.

Результати проведених експериментальних досліджень з визначення закономірностей впливу на температуру займання*) частинок металевих пальних таких важливих параметрів, як їх розмір, відносний масовий вміст кисню у потоці газоподібних продуктів розкладання окиснювача та тиск навколишнього середовища, що характеризують їх здатність до прискорення процесу займання та розвитку горіння в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків представлено на рис. 2 – 6. Встановлено наступні діапазони зміни температури займання частинок металевих пальних в продуктах термічного розкидання нітратовмісних окиснювачів: $T_z = 790 \dots 1340$ К – для частинок магнію; $T_z = 1270 \dots 1970$ К – для частинок алюмінію; $T_z = 835 \dots 1130$ К – для частинок титану; $T_z = 850 \dots 1560$ К – для частинок АМС (50 % Al + 50 % Mg).

Аналіз отриманих результатів показує, що при збільшенні середнього розміру частинок порошку металевого пального d_m , температура займання частинок T_z зменшується (при збільшенні відносної концентрації кисню C_{O_2} від 0,2 до 0,8 та зменшенні зовнішнього тиску P від 10^7 Па до 10^5 Па): при збільшенні d_m від 54 мкм до 305 мкм (для частинок Mg) T_z зменшується у 1,21...1,32 разу; при збільшенні d_m від 54 мкм до 310 мкм (для частинок Al) T_z зменшується у 1,3...1,43 разу; при збільшенні d_m від 45 мкм до 280 мкм (для частинок Ti) T_z зменшується у 1,15...1,27 разу; при збільшенні d_m від 5 мкм до 15 мкм (для частинок Zr) T_z

зменшується у 1,18...1,25 разу; при збільшенні d_m від 35,8 мкм до 385 мкм (для частинок АМС) T_z зменшується у 1,27...1,34 разу.

Встановлено також, що для використовуваних на практиці діапазонів зміни технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача у суміші $\alpha = 0,3...1,4$; коефіцієнта надлишку окиснювача $K_V = 0,9...0,95$; вказаних вище діапазонів зміни d_m ; середнього розміру частинок порошку окиснювача $d_N < 280$ мкм) та параметрів навколишнього середовища ($C_{O_2} = 0,2...0,8$; $P = 10^5...10^7$ Па) при застосуванні піротехнічних нітратно-металевих сумішей процес займання металевих пальних у газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача аж до виникнення полум'їв протікає стабільно без вибухонебезпечного розвитку.

Для практичного використання отриманих вище результатів по спалахуванню розглядуваних металевих пальних необхідно створити базу даних на їх основі, зручну для оцінок пожежонебезпечних властивостей піротехнічних виробів в умовах зовнішніх термодій, основними параметрами яких є підвищені температури нагріву та зовнішні тиски. При цьому вибухонебезпечні режими горіння сумішей характеризуються передчасним займанням частинок металевого пального у продуктах термічного розкладання нітратовмісного окиснювача з подальшою їх фрагментацією. Швидкість горіння сумішей різко зростає із зростанням температури нагріву та зовнішнього тиску, що призводить до вибухового нагрівання їх зарядів та викиду у різні боки цих продуктів з залишками корпусів та окремих частинок основних зарядів виробів, що продовжують горіти. Для отримання такої бази даних необхідно систематизувати дані по горінню розглядуваних сумішей (і, в першу чергу, по температурі займання частинок металевого пального) у вигляді нескладних експериментально-статистичних моделей, зручних для практичних оцінок.

Для розв'язання цієї задачі були використані відомі методи експериментально-статистичного моделювання та стандартне програмне

забезпечення [6; 9], які дозволяють в діалоговому режимі на комп'ютері за отриманими моделями розраховувати рівні температури займання частинок металевих пальних піротехнічних сумішей, що характеризують їх здатність до прискорення процесу горіння в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків.

*) За температуру займання (T_z , К) частинок металів у газоподібному середовищі приймалася їх мінімальна температура, при якій починається процес їх горіння.

Моделі для розглядуваних металевих пальних мають наступний вигляд (відносна похибка 5...7 %):

$$T_z(d_m, C_{O_2}, P) = A_0 + A_1 \cdot C_{O_2} + A_2 \cdot C_{O_2}^2 + A_3 \cdot d_m + A_4 \cdot d_m^2 + A_5 \cdot P + A_6 \cdot P^2 + A_7 \cdot C_{O_2} \cdot d_m, \quad (1)$$

де A_i ($i = \overline{0, 7}$) – емпіричні коефіцієнти (табл. 1).

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів в формулі (1)

Коефіцієнт Метал	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
Mg	1086	-187,96	-55	-0,153	$-3 \cdot 10^{-6}$	$1,371 \cdot 10^{-4}$	$-1,017 \cdot 10^{-11}$	$-2 \cdot 10^{-3}$
Al	1629	-282	-82,5	-0,23	$-4,512 \cdot 10^{-6}$	$1,917 \cdot 10^{-4}$	$-1,416 \cdot 10^{-11}$	$-3,5 \cdot 10^{-3}$
Zr	905	-156,6	-45,8	-0,1275	$-2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,142 \cdot 10^{-4}$	$-0,8475 \cdot 10^{-11}$	$-1,7 \cdot 10^{-3}$
Ti	1154	-156,3	-37,2	-0,11	$-1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,19 \cdot 10^{-4}$	$-0,91 \cdot 10^{-11}$	$-1,2 \cdot 10^{-3}$
АМС	1375	-112,84	-38	-0,112	$-1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,133 \cdot 10^{-4}$	$-0,93 \cdot 10^{-11}$	$-1,71 \cdot 10^{-3}$

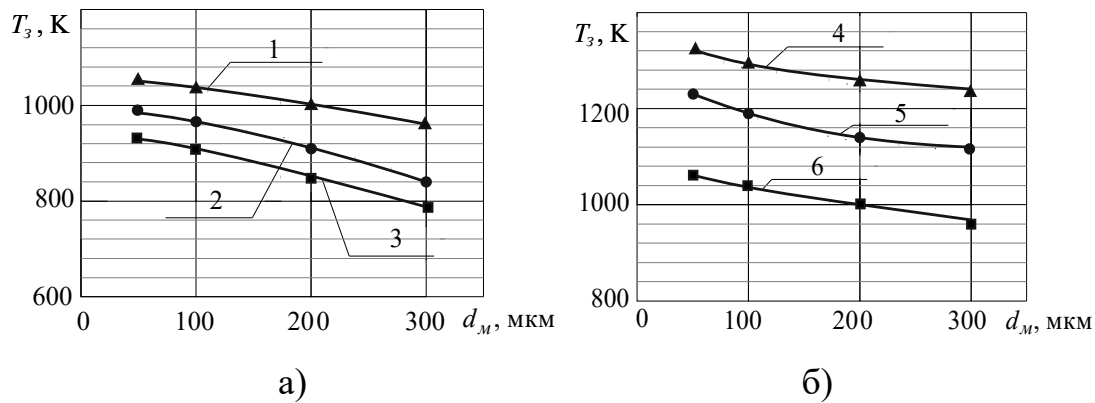


Рис. 2. Залежність температури займання частинки магнію у газовому середовищі $O_2 + N_2$ від її розміру для різних відносних масових концентрацій кисню (а) та різних значень зовнішнього тиску (б):

а) – $P = 10^5$ Па; 1 – $C_{O_2} = 0,2$; 2 – $C_{O_2} = 0,6$; 3 – $C_{O_2} = 0,8$; б) – $C_{O_2} = 0,2$; 4 – $P = 10^5$ Па; 5 – $P = 10^6$ Па; 6 – $P = 10^7$ Па; $\circ$, $\bullet$, $\blacksquare$ – експериментальні дані

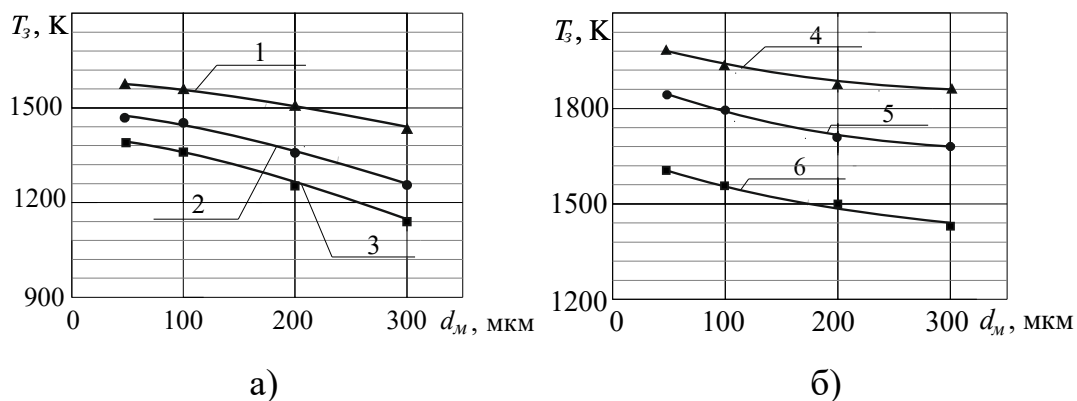


Рис. 3. Залежність температури займання частинки алюмінію у газовому середовищі $O_2 + N_2$ від її розміру для різних відносних масових концентрацій кисню (а) та різних значень зовнішнього тиску (б):

а) – $P = 10^5$ Па; 1 – $C_{O_2} = 0,2$; 2 – $C_{O_2} = 0,6$; 3 – $C_{O_2} = 0,8$; б) – $C_{O_2} = 0,2$; 4 – $P = 10^5$ Па; 5 – $P = 10^6$ Па; 6 – $P = 10^7$ Па; $\circ$, $\bullet$, $\blacksquare$ – експериментальні дані.

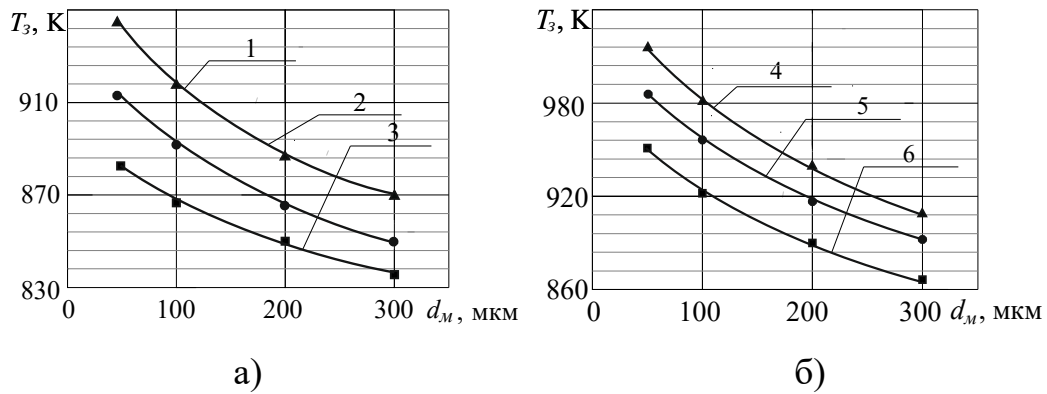


Рис. 4. Залежність температури займання частинки титану у газовому середовищі $O_2 + N_2$ від її розміру для різних відносних масових концентрацій кисню (а) та різних значень зовнішнього тиску (б):

а) – $P = 10^5$ Па; 1 – $C_{O_2} = 0,2$; 2 – $C_{O_2} = 0,6$; 3 – $C_{O_2} = 0,8$; б) – $C_{O_2} = 0,2$; 4 – $P = 10^5$ Па; 5 – $P = 10^6$ Па; 6 – $P = 10^7$ Па; $\circ$, $\bullet$, $\blacksquare$ – експериментальні дані

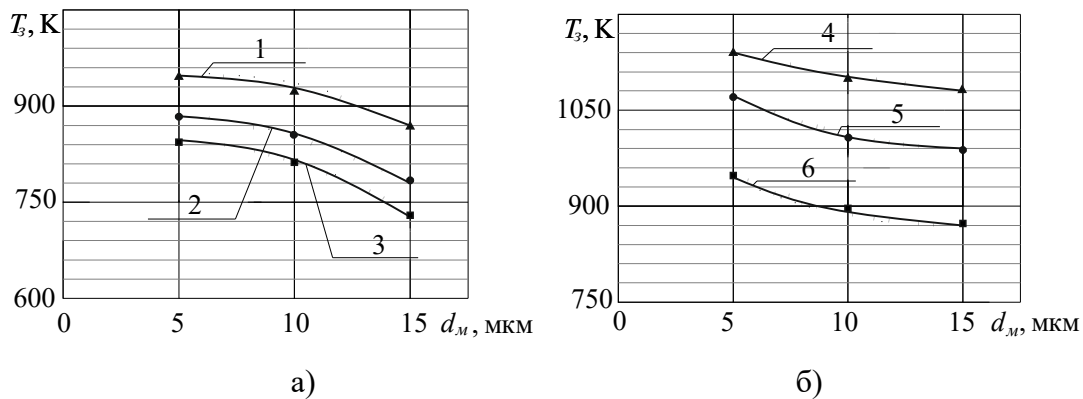


Рис. 5. Залежність температури займання частинки цирконію у газовому середовищі $O_2 + N_2$ від її розміру для різних відносних масових концентрацій кисню (а) та різних значень зовнішнього тиску (б):

а) – $P = 10^5$ Па; 1 – $C_{O_2} = 0,2$; 2 – $C_{O_2} = 0,6$; 3 – $C_{O_2} = 0,8$; б) – $C_{O_2} = 0,2$; 4 – $P = 10^5$ Па; 5 – $P = 10^6$ Па; 6 – $P = 10^7$ Па; $\circ$, $\bullet$, $\blacktriangle$ – експериментальні дані

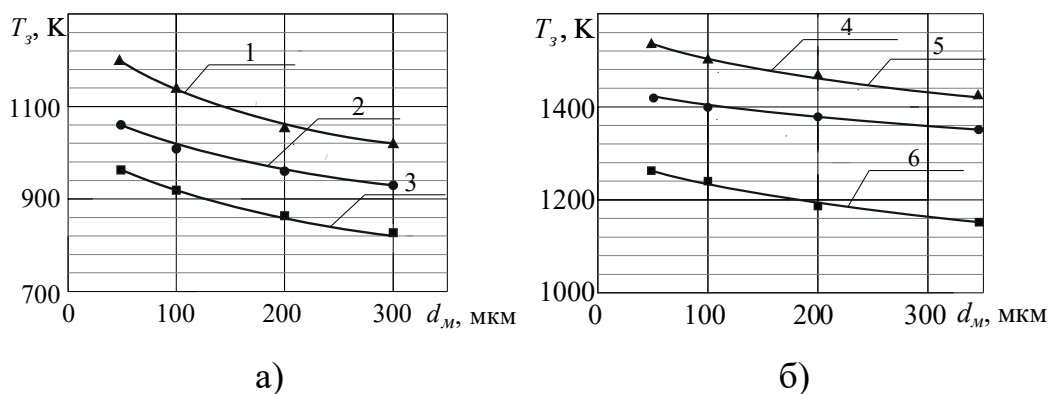


Рис. 6. Залежність температури займання частинки АМС (50 % Al + 50 % Mg) у газовому середовищі $O_2 + N_2$ від її розміру для різних відносних масових концентрацій кисню (а) та різних значень зовнішнього тиску (б):

а) – $P = 10^5$ Па; 1 – $C_{O_2} = 0,2$; 2 – $C_{O_2} = 0,6$; 3 – $C_{O_2} = 0,8$; б) – $C_{O_2} = 0,2$; 4 – $P = 10^5$ Па; 5 – $P = 10^6$ Па; 6 – $P = 10^7$ Па; $\circ$, $\bullet$, $\blacksquare$ – експериментальні дані

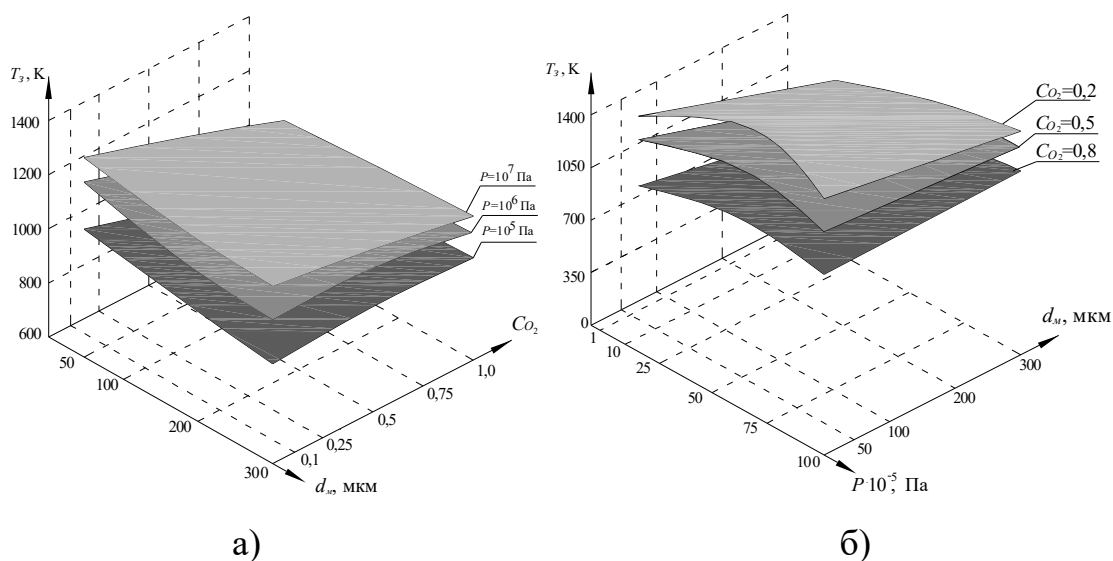


Рис. 7. Тривимірне зображення залежностей температури займання частинки магнію в газовому середовищі $O_2 + N_2$ від таких параметрів:

а) – від C_{O_2} та d_m ; б) – від P та d_m

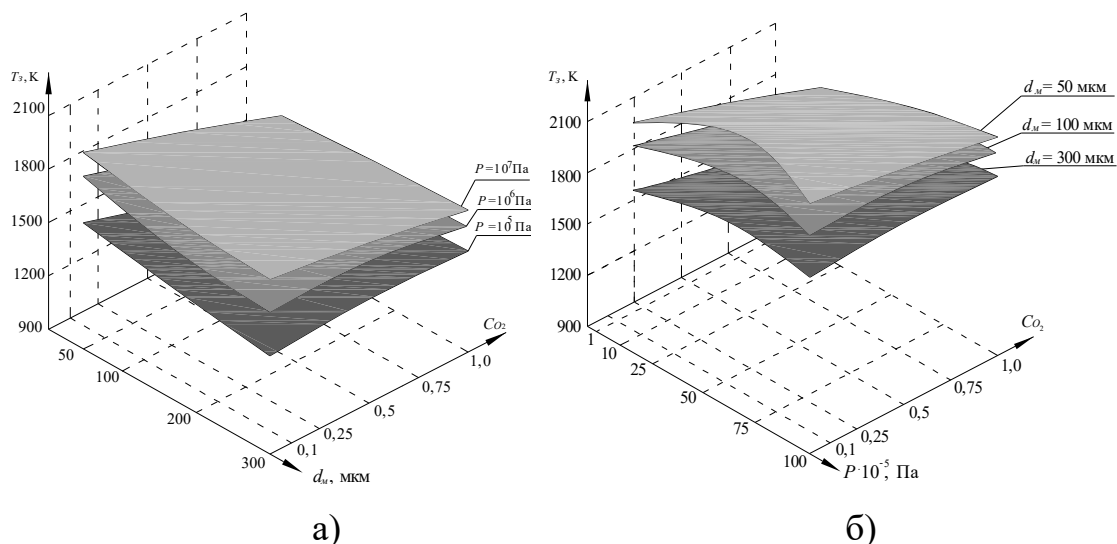


Рис. 8. Тривимірне зображення залежностей температури займання частинки алюмінію в газовому середовищі $O_2 + N_2$ від таких параметрів:

а) – від C_{O_2} та d_m ; б) – від C_{O_2} та P

Результати розрахунків по формулі (1) представлено на рис. 7 – 11. Отримані тривимірні графіки дозволяють шляхом керування параметрами d_m , C_{O_2} та P знаходити оптимальні діапазони зміни температури T_3 , що призводить до підвищення пожежної безпеки піротехнічних сумішей в умовах зовнішніх термічних дій (наприклад, шляхом зменшення дисперсності металевого пального та вмісту окиснювача у суміші (зменшується C_{O_2}) підвищувати температуру T_3).

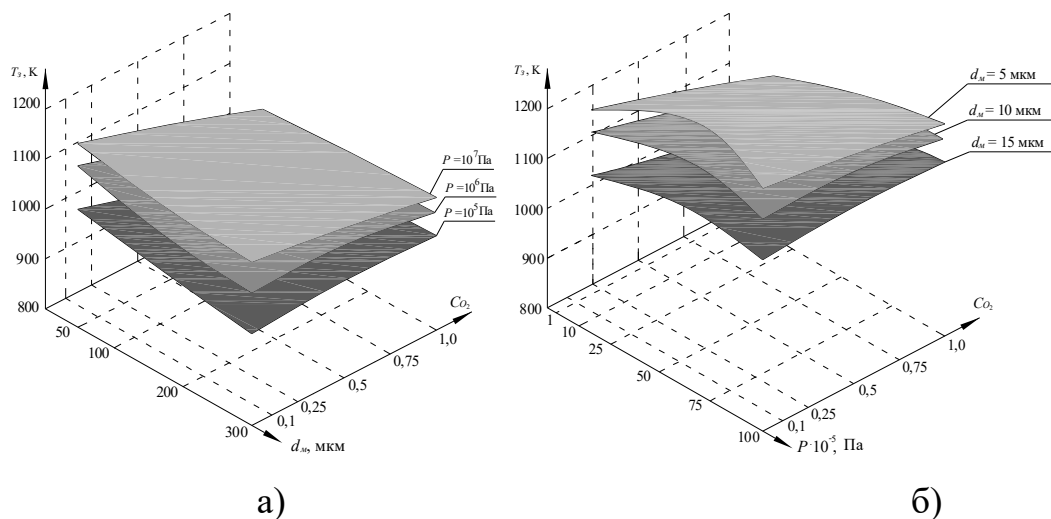


Рис. 9. Тривимірне зображення залежностей температури займання частинки титану в газовому середовищі $O_2 + N_2$ від таких параметрів:

а) – від C_{O_2} та d_m ; б) – від C_{O_2} та P

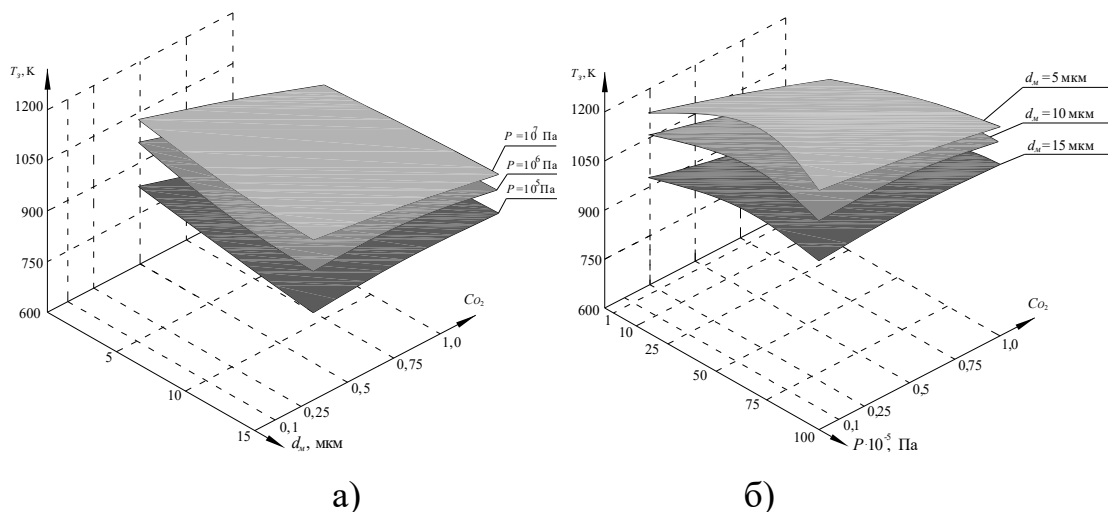


Рис. 10. Тривимірне зображення залежностей температури займання частинки цирконію в газовому середовищі $O_2 + N_2$ від таких параметрів:

а) – від C_{O_2} та d_M ; б) – від C_{O_2} та P

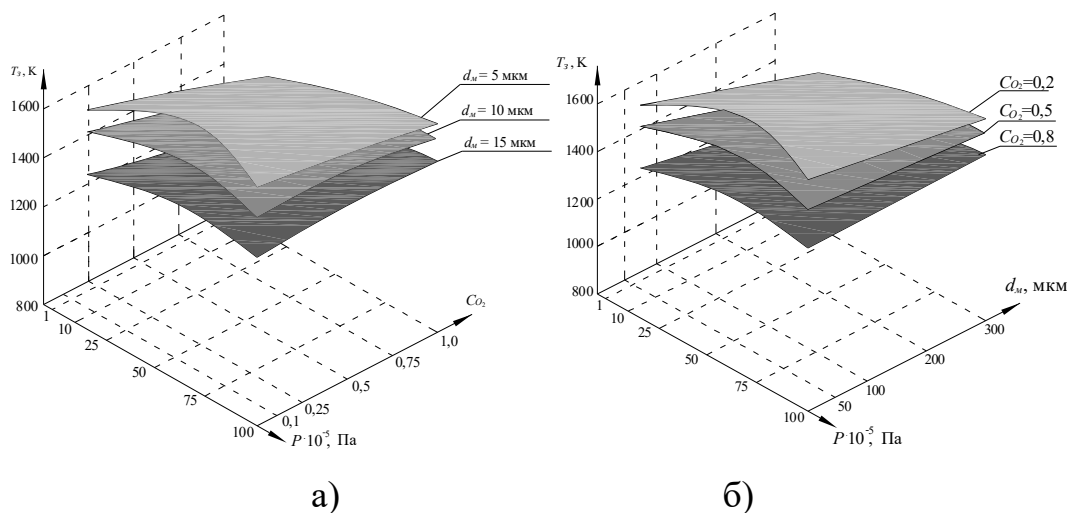


Рис. 11. Тривимірне зображення залежностей температури займання частинки АМС (50 % Al + 50 % Mg) в газовому середовищі $O_2 + N_2$ від таких параметрів:

а) – від C_{O_2} та P ; б) – від d_M та P

Висновки

1. Систематизація та узагальнення отриманих даних по спалахуванню частинок металевих палих піротехнічних сумішей у активних газоподібних продуктах термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів (O_2 , N_2) показують, що:

- діапазони зміни температури займання частинок металевих пальних у продуктах термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів складають 835...1970 К;
- при збільшенні середнього розміру частинок порошку металевого пального від 5 мкм до 305 мкм та відносної концентрації кисню від 0,2 до 0,8, а також при зменшенні зовнішнього тиску від 10^7 Па до 10^5 Па температура їх займання зменшується у 1,15...1,34 разу.

2. Розроблено експериментально-статистичні моделі для визначення в діалоговому режимі на комп'ютері рівнів температури займання частинок металевих пальних в залежності від їх дисперсності та зовнішніх умов, що дозволяє шляхом регулювання технологічних параметрів сумішей (співвідношення компонентів, середній розмір частинок металевих порошків) підвищувати пожежну безпеку піротехнічних виробів, попереджаючи їх передчасне вибухонебезпечне спрацювання в умовах вимушених термічних дій.

Література

1. Шидловский А. А. Основы пиротехники / А. А. Шидловский. М.: Машиностроение, 1973. 320 с.
2. Силин Н. А. Металлические горючие гетерогенных конденсированных систем / Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Л. Я. Кашпоров и др. М.: Машиностроение, 1976. 320 с.
3. Силин Н. А. Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем / Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Л. Я. Кашпоров и др. М.: Машиностроение, 1982. 232 с.
4. Тарасов В. В. Инфракрасные системы "смотрящего" типа / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков. М.: Логос, 2004. 444 с.

5. Глущенко А. Р. Танковые ночные системы и приборы наблюдения / А. Р. Глущенко, В. И. Гордиенко, А. В. Бурак, А. Ю. Денисенко. Черкассы: Фотоприбор, 2007. 441 с.
6. Ващенко В. А. Процессы горения металлизированных конденсированных систем / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. И. Заика, И. В. Яценко, В. В. Цыбулин. К.: Наукова думка, 2008. 745 с.
7. Кириченко О. В. Экспериментально-статистические модели для расчета зависимостей скорости и концентрационных пределов горения пиротехнических нитратных систем от скорости обдува потоком воздуха / О. В. Кириченко, В. Д. Акиншин, Б. О. Яхно, П. И. Заика, В. В. Цыбулин, В. А. Ващенко // Вестник НТУУ "КПИ". Машиностроение, 2008. № 52. С. 58-66.
8. Кириченко О. В. Дослідження впливу температури нагріву та зовнішнього тиску на залежності швидкості горіння ПНС від співвідношення компонентів та концентраційні межі горіння / О. В. Кириченко // Сб. "Труды Одесского национального политехнического университета", 2010. Вып. 2(6). С. 191-196.
9. Кириченко О. В. Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратовмісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів. Монографія / О. В. Кириченко, П. С. Пашковський, В. А. Ващенко, Ю. Г. Лега. К.: Наукова думка, 2012. 318 с.
10. Кириченко О. В. Экспериментально-статические модели для прогнозирования влияния внешних термовоздействий на скорость горения пиротехнических смесей / О. В. Кириченко // Вестник КИИ. Минск: КИИ МЧС РБ, 2013. № 2(18). С. 35-41.
11. Вогман Л. П. Разработка рекомендаций по обеспечению пожарной безопасности фейерверочных пиротехнических изделий / Л. П. Вогман,

- В. А. Зуйков, В. Е. Татаров, В. В. Лепесий // Пожаровзрывобезопасность. 2002. № 3. С. 24-41.
12. Кириллов Г. Н. Требования пожарной безопасности при обращении пиротехнической продукции. Обзорно-аналитический материал / Г. Н. Кириллов, Ю. И. Дешевых, А. Н. Гилетич, Л. П. Вогман, В. А. Зуйков, А. Н. Нестругин, А. М. Пшеничников. М.: ВНИИПО и ДНД МЧС России, 2010. 19 с.
13. Громов А. А. Горение нанопорошков металлов / А. А. Громов, Т. А. Хабас, А. П. Ильин и др. Томск: Дельтаплан, 2008. 382 с.
14. Ильин А. П. Характеристики горения в воздухе агломерированных сверхтонких порошков алюминия / А. П. Ильин, Е. М. Попенко, А. А. Громов и др. // Физика горения и взрыва, 2002. Т. 38. № 6. С. 66-70.
15. Ильин А. П. О горении сверхтонкого алюминия в воздухе / А. П. Ильин, А. А. Громов, В. И. Верещагин и др. // Физика горения и взрыва, 2001. Т. 37. № 6. С. 56-60.
16. Громов А. А. Физика и химия горения нанопорошков металлов в азотосодержащих газовых средах / А. А. Громов, Е. М. Попенко, А. Г. Коротких и др. Томск: Издательство Томского университета, 2007. 332 с.
17. Архипов В. А. Влияние дисперсности порошков металлов на характеристики кондуктивного и лучистого зажигания смесевых композиций / В. А. Архипов, А. Г. Коротких, В. Т. Кузнецов, Е. С. Синогина // Химическая физика, 2007. Т. 26. № 6. С. 58-67.
18. Бекстед М. В. Анализ данных по временам горения частиц алюминия / М. В. Бекстед // Физика горения и взрыва, 2005. № 5. С. 17-26.
19. Калинин В. В. Критические условия гетерогенного воспламенения нагретой частицы магния в холодном воздухе / В. В. Калинин, А. С. Черненко // Физика аэродисперсных систем, 2006. Вып. 43. С. 82-89.

20. Калинин В. В. Зажигание, высокотемпературное окисление и самопроизвольное погасание металлических частиц / В. В. Калинин, А. С. Черненко, С. А. Манюк, В. В. Михалев // Физика аэродисперсных систем, 2011. Вып. 48. С. 69-81.
21. Кириченко О. В. Високотемпературне окислення магнію в продуктах розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при зовнішніх термовпливах / О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін, Є. О. Тищенко // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2011. № 3. С. 115-120.