

О. В. Кириченко¹, к.т.н., доцент,

В. А. Ващенко², д.т.н., професор,

О. М. Тищенко¹, к.т.н., доцент,

заступник начальника інституту з навчальної та наукової роботи,

П. І. Зайка¹, к.т.н., доцент,

В. В. Цибулін², викладач

¹Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля

²Черкаський державний технологічний університет

ТЕМПЕРАТУРА ЗАЙМАННЯ ЧАСТИНОК МЕТАЛЕВИХ ПАЛЬНИХ У ПРОДУКТАХ ТЕРМІЧНОГО РОЗКЛАДАННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ СУМІШЕЙ

Представлено результати експериментальних досліджень та експериментально-статистичні моделі для оцінювання впливу технологічних параметрів зарядів піротехнічних нітратно-металевих джерел запалювання та зовнішніх чинників на температуру займання частинок металевих палих у продуктах термічного розкладання нітратовмісного окиснювача та добавок органічних речовин.

Ключові слова: піротехнічні суміші, нітратно-металеві джерела запалювання.

З кожним роком в Україні та в усьому світі зростає кількість пожеж і вибухів при зберіганні, транспортуванні та застосуванні загальнопромислових піротехнічних виробів, які спричиняють руйнування об'єктів, людські жертви та завдають значних матеріальних збитків. Зокрема, в Україні, відповідно до статистичних даних, тільки за останні десять років відбулося 566 пожеж та вибухів на об'єктах з наявністю піротехнічних виробів, які призвели до руйнування об'єктів, знищення матеріальних цінностей (прямі збитки становили 24,6 млн. грн., побічні збитки – 33,9 млн. грн.), загинуло 10 людей, травмовано – 48.

Аналіз зазначених випадків показує, що займанню та попередньому руйнуванню виробів, як правило, передують зовнішні термічні дії, яким вони піддаються (наприклад, при пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, в умовах їх транспортування при займанні близько розташованих об'єктів, а також в умовах пострілу та польоту виробів при їх запусках тощо [1–4]). Відбувається термічне розкладання нітратовмісного окиснювача (нітрату натрію), добавок органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену) та високотемпературне окиснення частинок металевих палих (алюмінію, магнію, цирконію) в продуктах розкладання. Це призводить до інтенсивного виділення тепла, займання частинок металу, передчасного ви-

бухонебезпечного спрацьовування джерел запалювання та подальшого пожежонебезпечного руйнування виробів. При цьому, у багатьох випадках передчасне вибухонебезпечне спрацьовування піротехнічних виробів мало катастрофічні наслідки, оскільки процес горіння піротехнічних зарядів, що розпочався, неможливо ефективно ліквідувати сучасними засобами пожежогасіння.

Тому велике практичне значення мають попередження вимушених пожежонебезпечних руйнувань виробів у разі впливу зовнішніх термічних дій. При цьому вони повинні ґрунтуватися на експериментальних методах визначення температури займання частинок металевих палих у продуктах розкладання розглядуваних компонентів.

Нині відсутні дані про комплексний вплив технологічних параметрів зарядів джерел запалювання та зовнішніх чинників на температуру займання частинок металу. Тому **метою роботи** є проведення експериментальних досліджень та побудова експериментально-статистичних моделей для визначення залежностей температури займання частинок металевих палих у продуктах розкладання піротехнічних сумішей від їх дисперсності, вмісту кисню в продуктах та зовнішнього тиску.

1. Результати експериментальних досліджень. На основі існуючих даних [1–6]

було встановлено, що при температурах, властивих конденсованій фазі піротехнічних сумішей в умовах їх займання та розвитку горіння, основними активними газоподібними продуктами термічного розкладання нітрату натрію та досліджуваних органічних речовин є $O_2 + N_2$. Тому нижче на базі проведених комплексних досліджень з використанням стандартного піротехнічного обладнання та відомих методів досліджень [3–12] наводяться отримані експериментально-статистичні моделі по оцінюванню впливу на температуру займання^{*)} частинок металів таких важливих параметрів, як розмір частинок металів (d_m , мкм), відносний масовий вміст кисню в потоці газоподібних продуктів розкладання (CO_2) і тиск навколишнього середовища (P , Па), що характеризують їх здатність до прискорення процесу займання та розвитку горіння в умовах підвищених температур нагріву і зовнішніх тисків.

Для отримання експериментально-статистичних моделей було використано розроблене спеціалізоване програмне забезпечення по методах регресії та інтерполяції [3–12].

2. Моделі для розрахунку залежностей температури займання від розміру частинок металу, відносної масової концентрації кисню в газовій суміші $O_2 + N_2$ та зовнішнього тиску. Моделі для досліджуваних металів мають такий вигляд (відносна похибка – 5...7 %):

$$T_3(d_m, CO_2, P) = a + b \cdot CO_2 + c \cdot CO_2^2 + d \cdot d_m + e \cdot d_m^2 + f \cdot P + g \cdot P^2 + h \cdot CO_2 \cdot d_m, \quad (1)$$

де a, b, c, d, e, f, g, h – емпіричні коефіцієнти, значення яких залежать від природи металу (табл. 1).

Порівняння результатів розрахунків по моделях (1) з отриманим масивом експериментальних даних показує, що відмінність між ними не перевищує 8...10 %. Результати розрахунків за формулою (1) (рис. 1–12) дозво-

лили встановити такі діапазони зміни температури займання частинок металів: $T_3 = 780...1330$ К – для частинок магнію (при $54 \leq d_m \leq 305$ мкм; $0,2 \leq CO_2 \leq 0,8$; $10^5 \leq P \leq 10^7$ Па); $T_3 = 1170...1900$ К – для частинок алюмінію (при $54 \leq d_m \leq 310$ мкм; $0,2 \leq CO_2 \leq 0,8$; $10^5 \leq P \leq 10^7$ Па); $T_3 = 625...1100$ К – для частинок цирконію (при $5 \leq d_m \leq 15$ мкм; $0,2 \leq CO_2 \leq 0,8$; $10^5 \leq P \leq 10^7$ Па).

При цьому, в результаті проведених досліджень для використовуваних на практиці діапазонів зміни досліджуваних параметрів (d_m, CO_2, P) процеси займання частинок металів проходять стабільно та не мають вибухового характеру. Крім цього, зміна зазначених керованих параметрів суттєво впливає на характер поведінки температури займання частинок металів: збільшення d_m та CO_2 приводить до зменшення T_3 відповідно в 1,2...1,5 разу та в 1,3...1,7 разу, а збільшення P – до зростання T_3 в 1,4...1,6 разу.

Отримані експериментально-статистичні моделі (1) дозволяють за допомогою розробленого спеціального програмного забезпечення на комп'ютері в діалоговому режимі формувати керовану базу даних по температурах займання частинок металів у газоподібних продуктах розкладання нітрату натрію та добавок органічних речовин в умовах зовнішнього нагріву. Зазначена база даних може бути покладена в основу більш загальної керованої бази теоретико-експериментальних даних по прогнозуванню пожежонебезпечних властивостей виробів з нітратно-металевими джерелами запалювання в умовах зовнішніх термодій.

^{*)}За температуру займання (T_3 , К) частинок металів у газоподібному середовищі, що нагріваються, приймалася їх мінімальна температура, при якій починався процес їх горіння.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів у формулі (1)

Коефіцієнт Метал	a	b	c	d	e	f	g	h
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	$-2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,142 \cdot 10^{-4}$	$-0,8475 \cdot 10^{-11}$	$-1,7 \cdot 10^{-3}$

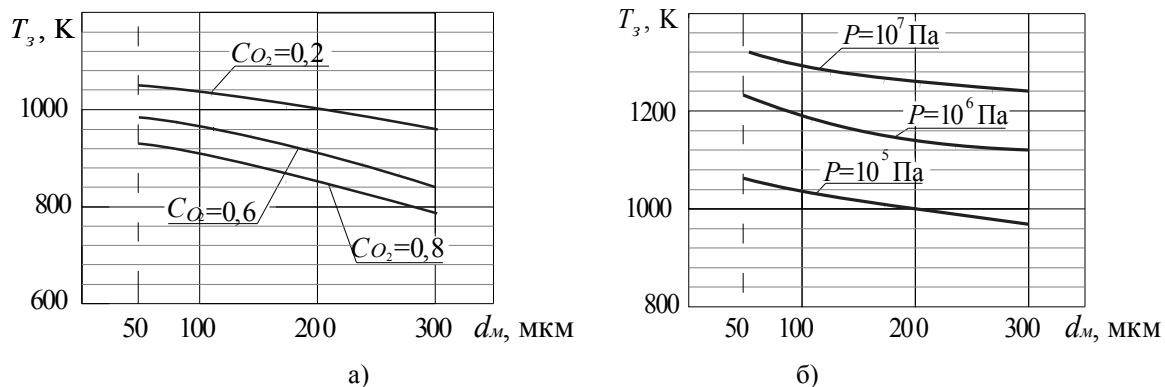


Рис. 1. Вплив відносної масової концентрації кисню (а, $P = 10^5$ Па) та зовнішнього тиску (б, $C_{O_2} = 0,2$) на залежність температури займання частинки магнію в газовому середовищі $O_2 + N_2$ від її розміру

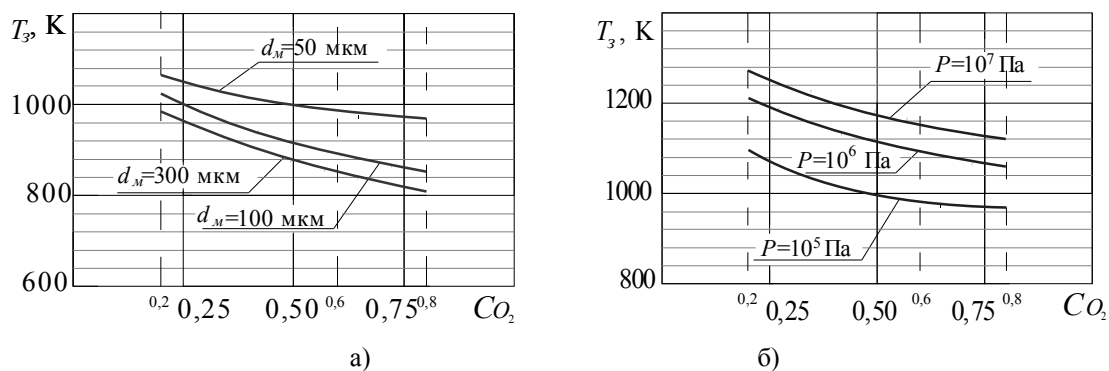


Рис. 2. Вплив розміру частинки магнію (а, $P = 10^5$ Па) та зовнішнього тиску (б, $d_m = 50$ мкм) на залежність температури займання частинки в газовому середовищі $O_2 + N_2$ від відносної масової концентрації кисню

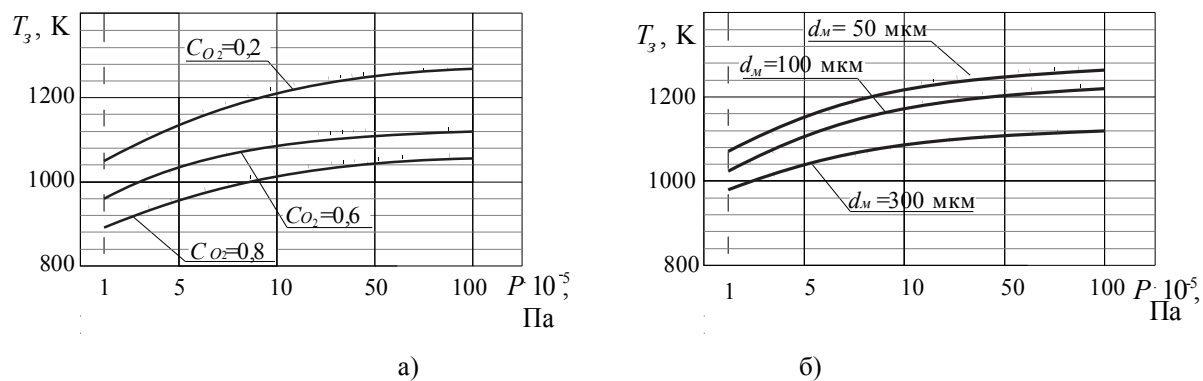


Рис. 3. Вплив відносної масової концентрації кисню (а, $d_m = 50$ мкм) та розміру частинки магнію (б, $C_{O_2} = 0,2$) на залежність температури займання частинки від зовнішнього тиску

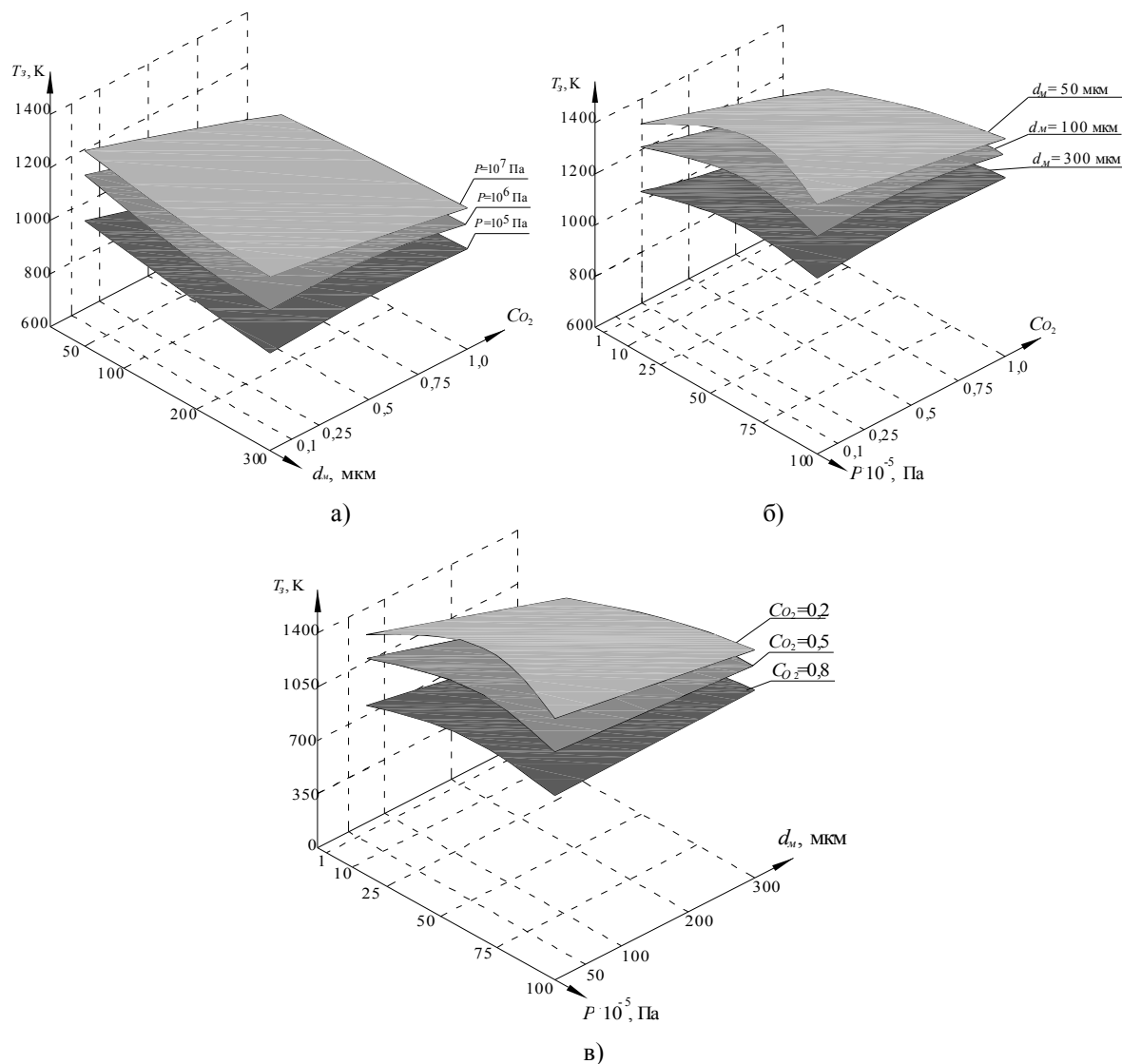


Рис. 4. Зображення залежностей температури займання частинки магнію в газовому середовищі $O_2 + N_2$ від таких параметрів:
 а) від CO_2 та d_m ; б) від CO_2 та P ; в) від P та d_m

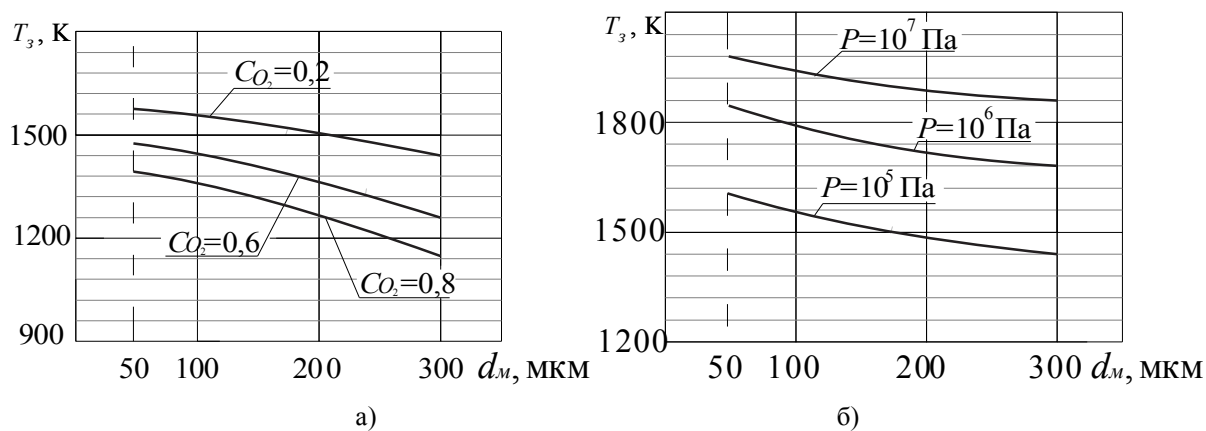


Рис. 5. Вплив відносної масової концентрації кисню (а, $P = 10^5 \text{ Па}$) та зовнішнього тиску (б, $CO_2 = 0.2$) на залежність температури займання частинки алюмінію в газовому середовищі $O_2 + N_2$ від її розміру

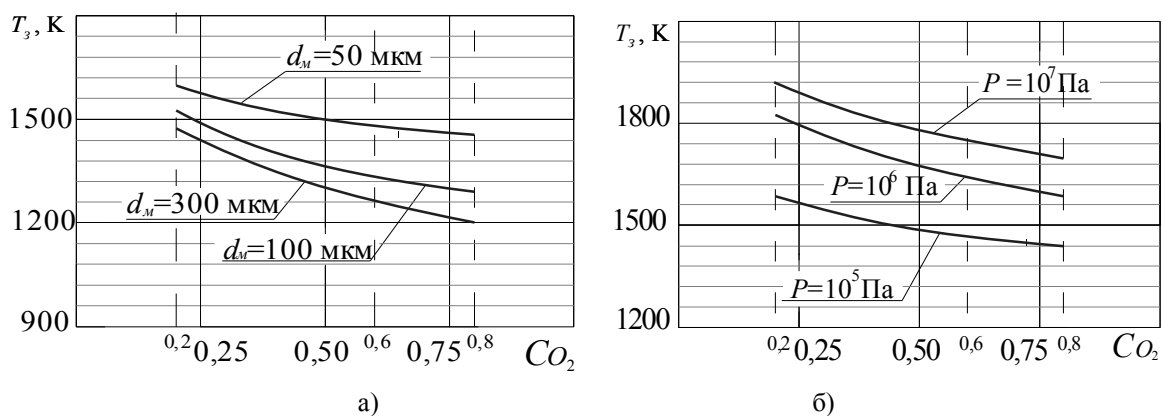


Рис. 6. Вплив розміру частинок алюмінію (а, $P = 10^5$ Па) та зовнішнього тиску (б, $d_m = 50$ мкм) на залежність температури займання частинок в газовому середовищі $O_2 + N_2$ від відносної масової концентрації кисню

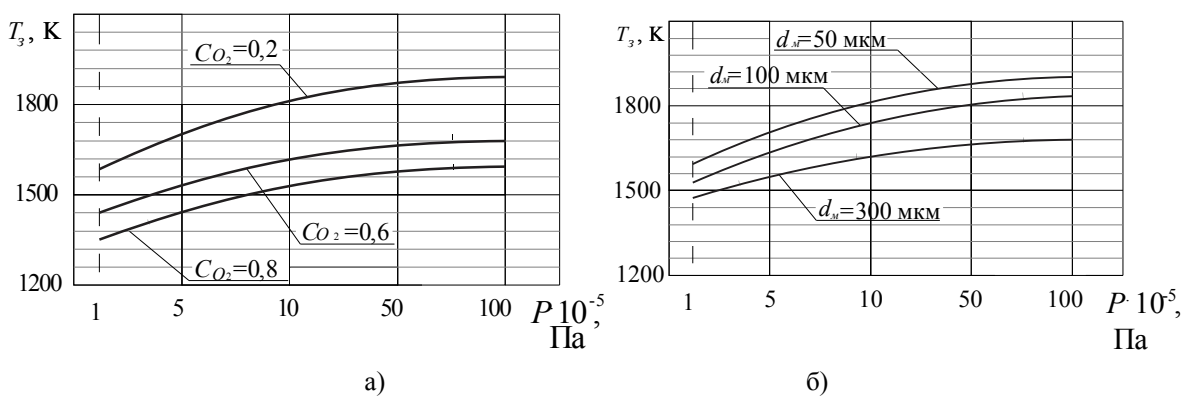
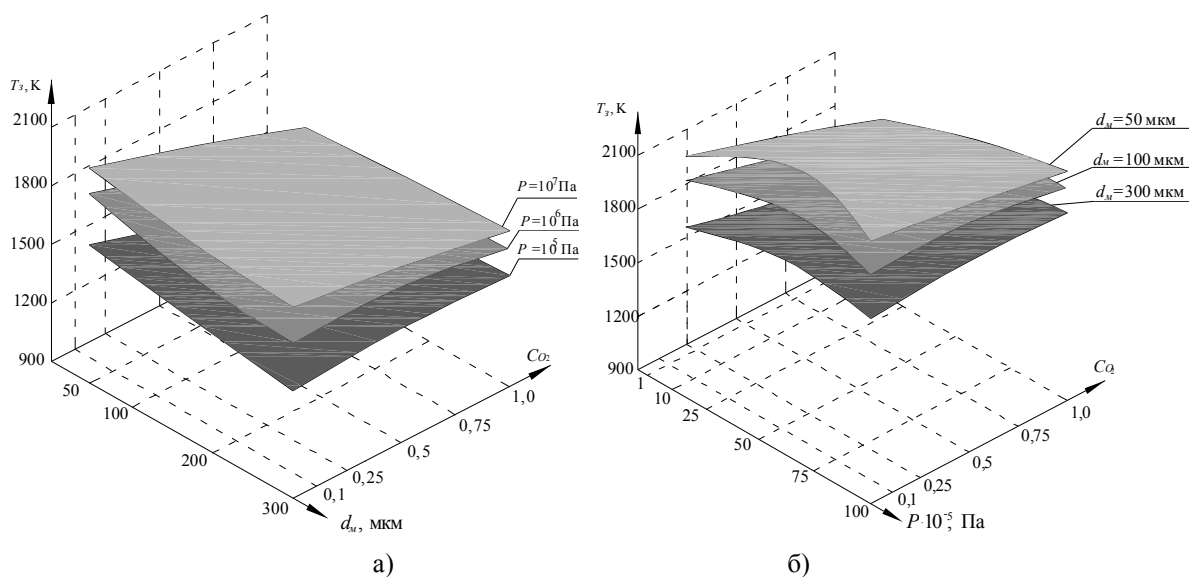


Рис. 7. Вплив відносної масової концентрації кисню (а, $d_m = 50$ мкм) та розміру частинок алюмінію (б, $C_{O_2} = 0,1$) на залежність температури займання частинок від зовнішнього тиску



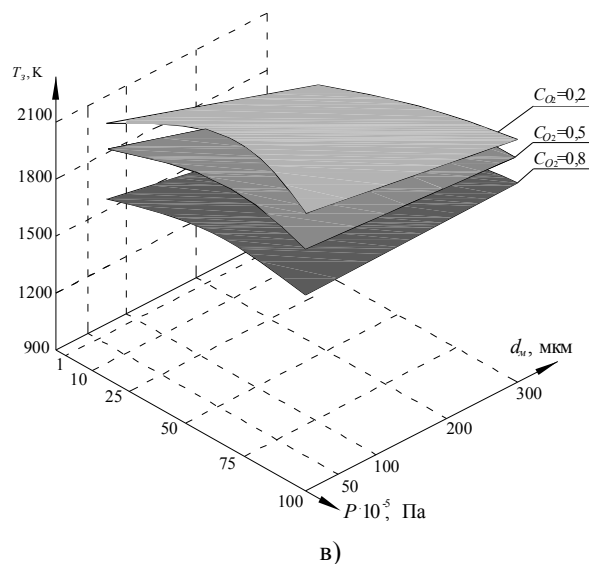


Рис. 8. Зображення залежностей температури займання частинки алюмінію в газовому середовищі $O_2 + N_2$ від таких параметрів:

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

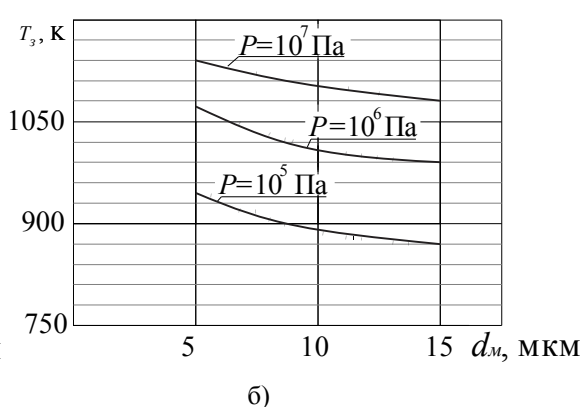
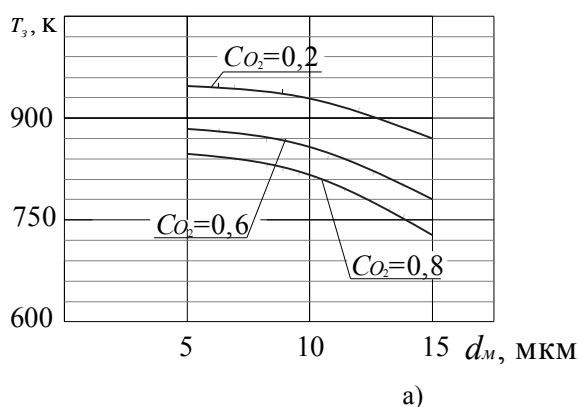


Рис. 9. Вплив відносної масової концентрації кисню (а, $P = 10^5$ Па) та зовнішнього тиску (б, $C_{O_2} = 0,2$) на залежність температури займання частинки цирконію в газовому середовищі $O_2 + N_2$ від її розміру

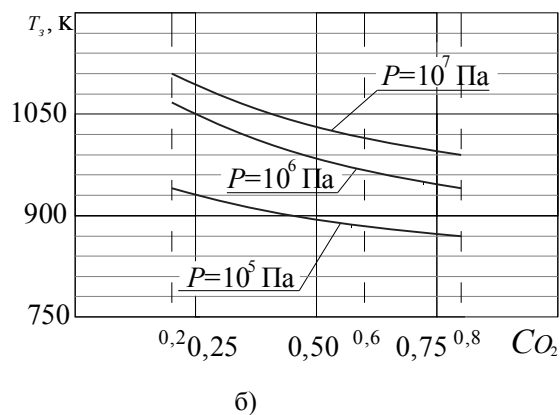
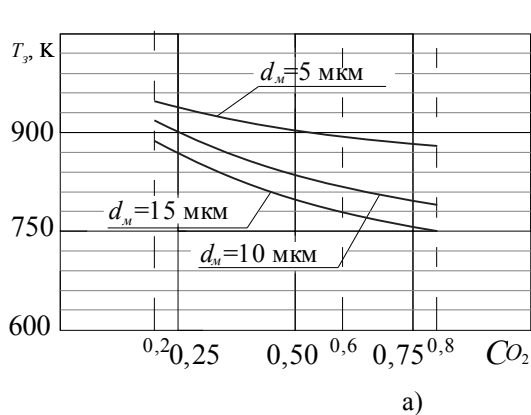


Рис. 10. Вплив розміру частинок цирконію (а, $P = 10^5$ Па) та зовнішнього тиску (б, $d_m = 5$ мкм) на залежність температури займання частинок в газовому середовищі $O_2 + N_2$ від відносної масової концентрації кисню

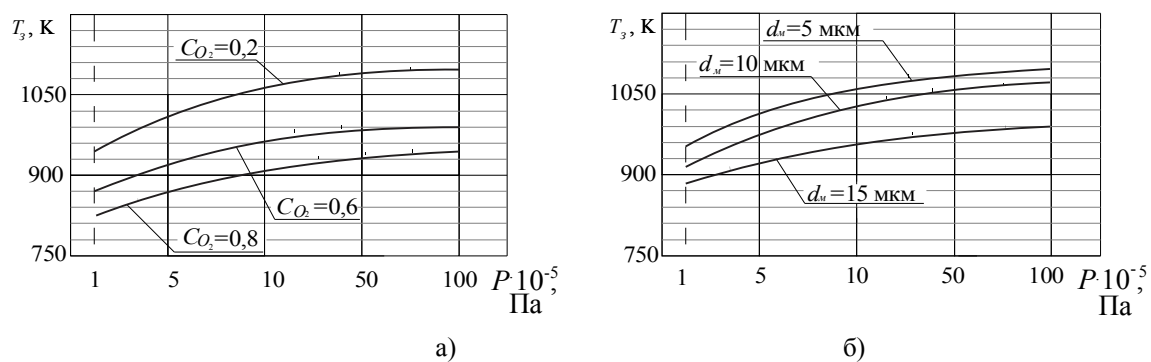


Рис. 11. Вплив відносної масової концентрації кисню (а, $d_m = 5$ мкм) та розміру частинок цирконію (б, $C_{O_2} = 0,2$) на залежність температури займання частинок від зовнішнього тиску

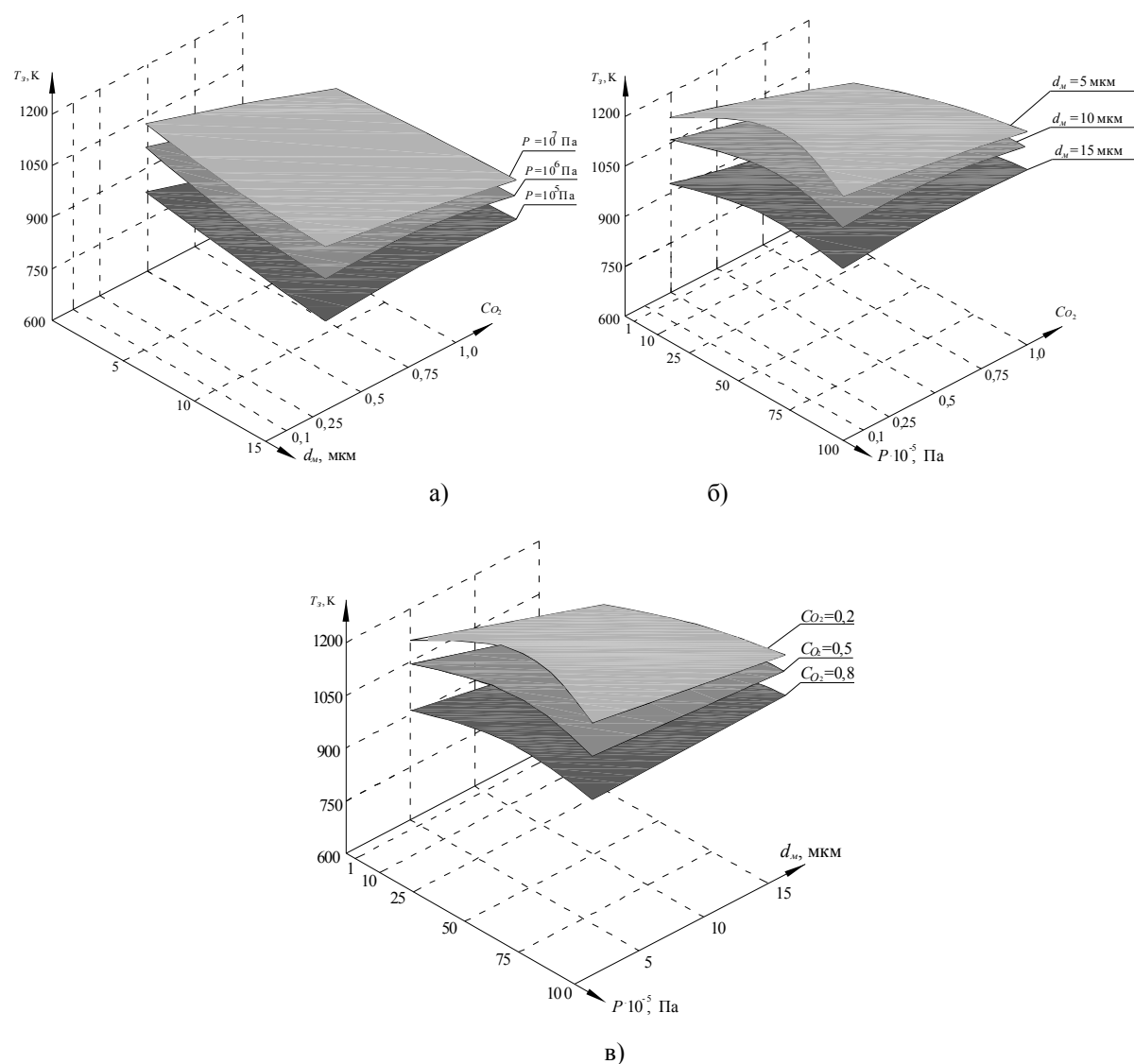


Рис. 12. Зображення залежностей температури займання частинки цирконію в газовому середовищі $O_2 + N_2$ від таких параметрів: а) від C_{O_2} та d_m ; б) від C_{O_2} та P ; в) від P та d_m

Висновки:

1. В результаті проведених експериментальних досліджень вперше встановлено наступні закономірності комплексного впливу на температуру займання частинок металів таких параметрів: збільшення розміру частинок від $d_m = 5$ мкм до $d_m = 300$ мкм і відносного вмісту кисню від $CO_2 = 0,2$ до $CO_2 = 0,8$ призводить до зменшення T_z в 1,2...1,7 разу, а зростання зовнішнього тиску від $P = 10^5$ Па до $P = 10^7$ Па – до збільшення T_z в 1,4...1,6 разу. При цьому було встановлено діапазони зміни температури займання частинок металів, характерні для подальшого розвитку стійкого, не вибухонебезпечного їх згорання (для частинок магнію – $T_z = 780...1330$ К (при $54 \leq d_m \leq 305$ мкм; $0,2 \leq CO_2 \leq 0,8$; $10^5 \leq P \leq 10^7$ Па); для частинок алюмінію – $T_z = 1170...1900$ К (при $56 \leq d_m \leq 310$ мкм; $0,2 \leq CO_2 \leq 0,8$; $10^5 \leq P \leq 10^7$ Па); для частинок цирконію – $T_z = 625...1100$ К (при $5 \leq d_m \leq 15$ мкм; $0,2 \leq CO_2 \leq 0,8$; $10^5 \leq P \leq 10^7$ Па)).

2. Розроблено нові експериментально-статистичні моделі для визначення залежностей температури займання частинок металевих палив у продуктах термічного розкладання піротехнічних сумішей в умовах зовнішніх термодій від основних параметрів (d_m , CO_2 , P). Ці моделі дозволяють з відотною похибкою 8...10 % формувати базу даних по критичних значеннях технологічних параметрів зарядів джерел запалювання (співвідношення та дисперсності компонентів), перевищення яких призводить до займання частинок металу та передчасного пожежовибухонебезпечного спрацьовування джерела запалювання.

Список літератури

1. Вспомогательные системы ракетно-космической техники / [пер. с англ. ; под ред. И. В. Тишунина]. – М. : Мир, 1970. – 400 с.
2. Ващенко В. А. Процессы горения металлизированных конденсированных систем / [В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега и др.]. – К. : Наукова думка, 2008 – 745 с.
3. Кириченко О. В. Пожежонебезпечні термовпливи на поверхню металевих корпусів піротехнічних виробів в умовах пострілу та польоту / О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін // Проблеми пожежної безпеки. – Харьков : НУГЗУ, 2012. – № 32. – С. 98–112.
4. Швидкість та межі горіння піротехнічних нітратно-магнієвих сумішей в умовах зовнішніх термовпливів / О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін, В. М. Тупицький // Проблеми пожежної безпеки. – Харьков : НУГЗУ, 2013. – № 34. – С. 73–95.
5. Кириченко О. В. Залежність вмісту неокисленого алюмінію в продуктах згорання піротехнічних нітратно-алюмінієвих сумішей від співвідношення компонентів та зовнішнього тиску / О. В. Кириченко // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2011. – № 1 (23). – С. 60–68.
6. Кириченко О. В. Залежність вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згорання піротехнічних сумішей алюмінію з нітратовмісними окислювачами від співвідношення компонентів та зовнішнього тиску / О. В. Кириченко // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2011. – № 1. – С. 119–124.
7. Спалахування частинок алюмінію в продуктах розкладання нітратовмісних окиснювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при підвищених температурах нагріву / О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, В. Д. Акіньшин, В. В. Цибулін // Пожежна безпека: теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси : АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2011. – № 9. – С. 17–25.
8. 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.
9. Кириченко О. В. Термічне розкладання добавок органічних речовин в піротехнічних сумішах в умовах зовнішніх термовпливів / О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2011. – № 4. – С. 116–120.

10. Високотемпературне окислення алюмінію в продуктах розкладання окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей в умовах зовнішнього нагріву / О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін, В. М. Тупицький // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2011. – № 1 (24). – С. 47–53.
 11. Спалахування частинок металічних палих в продуктах розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при зовнішніх термовпливах / О. В. Кириченко, В. Д. Акіншин, В. М. Тупицький та ін. // Пожежна безпека: теорія і практика: матеріали І Міжнар. наук.-практ. конф., (м. Черкаси, 7 жовт. 2011 р.). – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2011. – С. 30–33.
 12. Кириченко О. В. Термічне розкладання нітратовмісних окислювачів піротехнічних сумішей в умовах зовнішніх термовпливів / О. В. Кириченко // Науковий вісник УкрНДІПБ, 2012. – № 1 (25). – С. 126–136.
- ### References
1. Auxiliary systems of space-rocket hardware (1970). In: I. V. Tishunin (Ed.). Moscow: Mir, 400 p. [in Russian].
 2. Vaschenko, V. A., Kiritchenko, O. V., Lega, Yu. G. et al. (2008). Processes of the combustion of metalized condensed systems. Kiev: Naukova dumka, 745 p. [in Russian].
 3. Kirichenko, O. V., Vaschenko, V. A. and Tsybulin, V. V. (2012). Flammable thermo-influences on the surface of metal buildings of pyrotechnic products in the conditions of shot and flight. *Problemy pozharnoy bezopasnosti*. Kharkov: NUGZU, (32), pp. 98–112 [in Ukrainian].
 4. Kirichenko, O. V., Vaschenko, V. A., Tsybulin, V. V. and Tupitskij, V. M. (2013). Speed and limits of burning of pyrotechnic nitrate-magnesium compounds in terms of external thermo-influences. *Problemy pozharnoy bezopasnosti*. Kharkov: NUGZU, (34), pp. 73–95 [in Ukrainian].
 5. Kirichenko, O. V. (2011). The dependence of the content of unoxidized aluminium in products of the combustion of pyrotechnic nitrate-aluminum mixtures from the ratio of components and external pressure. *Naukovyi visnyk UkrNDIPB*, 1, (23), pp. 60–68 [in Ukrainian].
 6. Kirichenko, O. V. (2011). The dependence of the content of high-temperature condensate in products of the combustion of aluminium pyrotechnic mixtures with nitrate-containing oxidants from the ratio of components and external pressure. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologich-nogo universitetu*, (1), pp. 119–124 [in Ukrainian].
 7. Kirichenko, O. V., Vaschenko, V. A., Akinshin, V. D. and Tsybulin, V. V. (2011). The ignition of aluminum particles in products of decomposition of nitrate-containing oxidants and organic substances of pyrotechnic mixtures at elevated temperatures of heating. *Pozhezhna bezpeka: teoriya i praktyka: collection of scient. works*. Cherkasy: APB im. Heroiv Chornobylya, (9), pp. 17–25 [in Ukrainian].
 8. Kirichenko, O. V., Vaschenko, V. A., Tsybulin, V. V. and Tischenko, E. O. (2011). High temperature oxidation of magnesium in products of decomposition of nitrate-containing oxidizers and organic substances of pyrotechnic mixtures at external thermo-influences. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, (3), pp. 115–120 [in Ukrainian].
 9. Kirichenko, O. V., Vaschenko, V. A. and Tsybulin, V. V. (2011). Thermal decomposition of organic substances additives in pyrotechnic mixtures in the conditions of external thermo-influences. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, (4), pp. 116–120 [in Ukrainian].
 10. Kirichenko, O. V., Vaschenko V. A., Tsybulin, V. V. and Tupitskij, V. M. (2011). High temperature oxidation of aluminum in products of decomposition of oxidizers and organic substances of pyrotechnic mixtures in the conditions of external heating. *Naukovyi visnyk UkrNDIPB*, 1 (24), pp. 47–53 [in Ukrainian].
 11. Kirichenko, O. V., Akinshin, V. D., Tupitskij, V. M. et al. (2011) The ignition of particles of metallic fuel in products of decomposition of nitrate-containing oxidizers and organic substances of pyrotechnic mixtures at external thermo-influences. *Pozhezhna bezpeka: teoriya i praktyka: proceedings of the 1st Internat. scient.-pract. conf.* Cherkasy: APB im. Heroiv Chornobylya, pp. 30–33 [in Ukrainian].
 12. Kirichenko O. V. (2012). Thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers of pyrotechnic mixtures in the conditions of external thermo-influences. *Naukovyi visnyk UkrNDIPB*, 1 (25), pp. 126–136 [in Ukrainian].

O. V. Kirichenko¹, *Ph.D., associate professor,*

V. A. Vaschenko², *D.Tech.Sc., professor,*

O. M., Tyschenko¹, *Ph.D., associate professor,*

P. I. Zaika¹, *Ph.D., associate professor,*

V. V. Tsybulin², *lecturer*

¹Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes

²Cherkasy State Technological University

IGNITION TEMPERATURE OF METAL FUEL PARTICLES IN PRODUCTS OF THERMAL DECOMPOSITION OF PYROTECHNIC MIXTURES

The aim of the paper is to conduct experimental research and build experimental-statistical models for determination of the influence of ignition temperature of metal fuel particles in products of pyrotechnic mixtures decomposition on their dispersion, oxygen contents in products and external pressure.

The results of experimental research and experimental-statistical models to estimate the influence of technological parameters of charges of pyrotechnic nitrate-metal sources of ignition and external factors on ignition temperature of metal fuel particles in products of thermal decomposition of nitrate-containing oxidant and additives of organic substances are presented. Ranges of the change of ignition temperature of metal fuel particles, characteristic for the further development of their stable explosion-proof combustion are determined.

Keywords: *pyrotechnic mixtures, nitrate-metal sources of ignition.*

Стаття надійшла до редакції 27.10.2014.

Рецензенти: Столяренко Г. С., д.т.н., професор,
Поздєєв С. В., д.т.н., доцент.