

УДК 614.841:536.46

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.1.23.34>

*Назарій КОЗЯР*, кандидат технічних наук (ORCID: 0000-0001-9082-0771),  
Національний університет цивільного захисту України

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ОТРИМАННЯ БАЗИ ДАНИХ ПО ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗАРЯДІВ ПРОТЕХНІЧНИХ НІТРАТНО-МЕТАЛІЗОВАНИХ СУМІШЕЙ НА ЗАЛЕЖНОСТІ ШВИДКОСТІ ЇХ ГОРІННЯ ВІД ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР НАГРІВУ ТА ЗОВНІШНІХ ТИСКІВ**

*Представлено експериментально-статистичні моделі для оцінки впливу технологічних параметрів зарядів піротехнічних нітратно-металізованих сумішей на швидкість та вибухонебезпечні режими розвитку їх горіння при підвищених температурах нагріву та зовнішніх тисках.*

*Розроблено нові експериментально-статистичні моделі, які дозволяють формувати базу даних з відносною похибкою 3–5 % щодо впливу технологічних параметрів на заряди піротехнічних нітратно-металізованих сумішей. Ці параметри включають співвідношення компонентів, дисперсність компонентів та коефіцієнт ущільнення суміші.*

*Ці моделі дозволяють аналізувати вплив зовнішніх термічних факторів, таких як підвищені температури нагріву та зовнішні тиски, на швидкість горіння та вибухонебезпечні режими розвитку горіння цих сумішей. Крім того, вони дозволяють визначати критичні діапазони зміни параметрів, перевищення яких може призвести до різкого зростання швидкості горіння та пожежовибухонебезпечного руйнування виробів.*

**Ключові слова:** *піротехнічні суміші, металеві пальні, нітратовмісні окиснювачі, процес горіння.*

**Постановка проблеми.** Для практичного використання отриманих результатів щодо горіння широко використовуваних у піротехнічних виробках різного призначення (освітлювальних, сигнальних та трасувальних засобах, ПЧ-випромінювачах, елементах ракетно-космічної техніки та ін.) механічно ущільнених сумішей порошків металевих паливних та нітратовмісних окиснювачів (наприклад, нітратів лужних та лужноземельних металів та ін.) [1 – 11], 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 з отриманих даних, представлених на рисунках 1-8 випливає, що вибухонебезпечні режими горіння сумішей характеризуються різким зростанням швидкості їх горіння із зростанням температури нагріву та зовнішнього тиску, що призводить до швидкого накопичення під металічними оболонками виробів високотемпературних продуктів згорання під високим тиском і вибухового руйнування корпусів та викиду у різні боки цих продуктів з залишками корпусів та окремих частин основних зарядів виробів, що продовжують горіти. Для отримання такої бази даних необхідно систематизувати дані щодо горіння сумішей, що розглядаються, (і в першу чергу, щодо швидкості горіння) у вигляді нескладних експериментально-статистичних моделей, зручних для практичних оцінок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Як було встановлено, дисперсність порошку окиснювача впливає на швидкість та режими горіння сумішей тільки у

вужькому діапазоні зміни коефіцієнта надлишку окиснювача:  $\alpha = 0,2...0,5$  (вміст металічного пального до 70...80 %), який на практиці рідко використовується, оскільки знаходиться поблизу верхньої концентраційної межі горіння  $\alpha_{ВМГ} = 0,15...0,3$ , що відповідає нестійкому, вибухонебезпечному режиму горіння. Тому, в основному, використовуються на практиці суміші з  $\alpha > 0,5...0,6$  та з заданою дисперсністю металевого пального та окиснювача.

Тому для бази даних найбільший практичний інтерес представляють дані щодо швидкості горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей метал + нітрат натрію при підвищених температурах нагріву та зовнішніх тисках (наприклад, при коефіцієнтах ущільнення  $K_U = 0,95...0,96$ , середньому розмірі частинок окиснювача  $d_N = 106$  мкм,  $\alpha > 0,5...0,6$  для дрібнодисперсних порошків металевих пальных з  $(d_M)_{min}$ ).

Нині вказана база даних, основу якої складає комплекс експериментально-статистичних моделей для визначення впливу основних параметрів зовнішніх термічних дій на швидкість розвитку процесу горіння сумішей, відсутня.

**Постановка задачі та її розв'язання.** Тому метою даної роботи є отримання такої бази даних щодо швидкості горіння сумішей в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків у вигляді нескладних експериментально-статистичних моделей, зручних для практичних оцінок.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для розв'язання цієї задачі були використані відомі експериментально-статистичні методи та стандартне програмне забезпечення [1, 2], які дозволяють в діалоговому режимі на ПК за отриманими моделями розраховувати рівні швидкості горіння розглядуваних сумішей, що характеризують їх здатність до прискорення процесу горіння в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків.

Нижче наводяться отримані експериментально-статистичні моделі (відносна похибка 3-5 %):

$$u(T_0, P) = A_0 + A_1 \cdot P + A_2 \cdot T_0 + A_3 \cdot P^2 + A_4 \cdot T_0^2 + A_5 \cdot P^3 + A_6 \cdot P \cdot T_0 + A_7 \cdot P \cdot T_0^2 + A_8 \cdot P^2 \cdot T_0 + A_9 \cdot P^2 \cdot T_0 + A_{10} \cdot P^3 \cdot T_0 + A_{11} \cdot P^3 \cdot T_0^2 \quad (1)$$

де  $A_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, 11$ ) – емпіричні коефіцієнти, які отримані для двох найбільш характерних значень  $\alpha$  для розглядуваних сумішей:  $\alpha_{ВМГ}$  характеризує нестійкий, вибухонебезпечний режим горіння сумішей;  $\alpha = 1,0$  – стійке стабільне їх горіння;  $\alpha_{НМГ}$  характеризує нестійке, затухаюче горіння сумішей (таблицях 1-3). Результати розрахунків по формулі (1) дозволили встановити наступні діапазони зміни швидкостей горіння сумішей:  $u = 2 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-1}$  м/с – суміш Mg + NaNO<sub>3</sub> (для порошків магнію з  $(d_M)_{min} = 74,5$  мкм);  $u = 5,6 \cdot 10^{-4} \dots 2,8 \cdot 10^{-2}$  м/с – суміш Al + NaNO<sub>3</sub> (для порошків алюмінію з  $(d_M)_{min} = 56$  мкм).

Порівняння результатів розрахунків по моделям (1) з отриманим масивом експериментальних даних показує, що відмінності між ними не перевищують 1...3 %.

Розрахунки за формулами (1) у тривимірному вигляді дозволяють комплексно оцінювати критичні діапазони зміни технологічних параметрів ( $\alpha^{(1)} \leq \alpha \leq \alpha^{(2)}$ , де  $\alpha^{(i)}$  ( $i = 1, 2$ ) – граничні значення критичних діапазонів зміни параметра  $\alpha$  (при заданих  $K_U$ ,  $d_N$  та  $d_M$ )), перевищення яких призводить до різкого збільшення швидкості горіння сумішей із зростанням температури нагріву та зовнішнього тиску, що спостерігається при вимушеному спрацьовуванні виробів в умовах зовнішніх теплових впливів (рис. 9-11).

Таблиця 1 – Значення емпіричних коефіцієнтів у формулі (1) при  $\alpha = \alpha_{ВМГ}$

| Коефіцієнт             | $A_0$                 | $A_1$                  | $A_2$                  | $A_3$                  | $A_4$                  | $A_5$                  |
|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Суміш                  |                       |                        |                        |                        |                        |                        |
| Mg + NaNO <sub>3</sub> | -6,5                  | $1,45 \cdot 10^{-6}$   | $9,33 \cdot 10^{-2}$   | $4,41 \cdot 10^{-12}$  | $3,42 \cdot 10^{-3}$   | $-2,89 \cdot 10^{-19}$ |
| Al + NaNO <sub>3</sub> | -2,67                 | $1,41 \cdot 10^{-6}$   | $2,5 \cdot 10^{-2}$    | $-3,14 \cdot 10^{-13}$ | $-4,21 \cdot 10^{-6}$  | $1,3 \cdot 10^{-20}$   |
| Коефіцієнт             | $A_6$                 | $A_7$                  | $A_8$                  | $A_9$                  | $A_{10}$               | $A_{11}$               |
| Суміш                  |                       |                        |                        |                        |                        |                        |
| Mg + NaNO <sub>3</sub> | $-9,51 \cdot 10^{-8}$ | $-7,91 \cdot 10^{-11}$ | $2,49 \cdot 10^{-14}$  | $2,08 \cdot 10^{-17}$  | $1,65 \cdot 10^{-21}$  | $-1,37 \cdot 10^{-24}$ |
| Al + NaNO <sub>3</sub> | $-1,29 \cdot 10^{-9}$ | $1,07 \cdot 10^{-12}$  | $-1,85 \cdot 10^{-16}$ | $-1,57 \cdot 10^{-19}$ | $-1,14 \cdot 10^{-23}$ | $8,57 \cdot 10^{-27}$  |

Таблиця 2 – Значення емпіричних коефіцієнтів у формулі (1) при  $\alpha=1,0$  (стехіометрія)

| Коефіцієнт             | $A_0$                  | $A_1$                  | $A_2$                  | $A_3$                  | $A_4$                 | $A_5$                  |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Суміш                  |                        |                        |                        |                        |                       |                        |
| Mg + NaNO <sub>3</sub> | -0,11                  | $8,07 \cdot 10^{-6}$   | $5,7 \cdot 10^{-2}$    | $-2,37 \cdot 10^{-13}$ | $-2,45 \cdot 10^{-6}$ | $1,2 \cdot 10^{-20}$   |
| Al + NaNO <sub>3</sub> | -2,21                  | $1,23 \cdot 10^{-6}$   | $2,5 \cdot 10^{-2}$    | $-2,37 \cdot 10^{-13}$ | $-2,47 \cdot 10^{-6}$ | $1,1 \cdot 10^{-20}$   |
| Коефіцієнт             | $A_6$                  | $A_7$                  | $A_8$                  | $A_9$                  | $A_{10}$              | $A_{11}$               |
| Суміш                  |                        |                        |                        |                        |                       |                        |
| Mg + NaNO <sub>3</sub> | $2,27 \cdot 10^{-8}$   | $-2,21 \cdot 10^{-11}$ | $-2,83 \cdot 10^{-16}$ | $4,11 \cdot 10^{-20}$  | $1,85 \cdot 10^{-25}$ | $-2,75 \cdot 10^{-27}$ |
| Al + NaNO <sub>3</sub> | $-1,87 \cdot 10^{-10}$ | $-7,31 \cdot 10^{-14}$ | $-1,83 \cdot 10^{-16}$ | $7,11 \cdot 10^{-20}$  | $1,35 \cdot 10^{-25}$ | $-4,73 \cdot 10^{-27}$ |

Таблиця 3 – Значення емпіричних коефіцієнтів у формулі (1) при  $\alpha = \alpha_{НМГ}$

| Коефіцієнт             | $A_0$                 | $A_1$                  | $A_2$                  | $A_3$                  | $A_4$                  | $A_5$                  |
|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Суміш                  |                       |                        |                        |                        |                        |                        |
| Mg + NaNO <sub>3</sub> | 6,61                  | $-6,35 \cdot 10^{-6}$  | $1,1 \cdot 10^{-2}$    | $1,61 \cdot 10^{-12}$  | $4,75 \cdot 10^{-6}$   | $1,19 \cdot 10^{-20}$  |
| Al + NaNO <sub>3</sub> | -2,11                 | $1,19 \cdot 10^{-6}$   | $1,8 \cdot 10^{-2}$    | $-2,15 \cdot 10^{-13}$ | $-2,47 \cdot 10^{-6}$  | $1,1 \cdot 10^{-20}$   |
| Коефіцієнт             | $A_6$                 | $A_7$                  | $A_8$                  | $A_9$                  | $A_{10}$               | $A_{11}$               |
| Суміш                  |                       |                        |                        |                        |                        |                        |
| Mg + NaNO <sub>3</sub> | $6,25 \cdot 10^{-8}$  | $-4,81 \cdot 10^{-11}$ | $-1,31 \cdot 10^{-14}$ | $1,07 \cdot 10^{-17}$  | $8,61 \cdot 10^{-22}$  | $-6,85 \cdot 10^{-25}$ |
| Al + NaNO <sub>3</sub> | $-1,33 \cdot 10^{-8}$ | $-1,57 \cdot 10^{-13}$ | $1,82 \cdot 10^{-16}$  | $1,53 \cdot 10^{-19}$  | $-9,21 \cdot 10^{-24}$ | $-1,15 \cdot 10^{-26}$ |

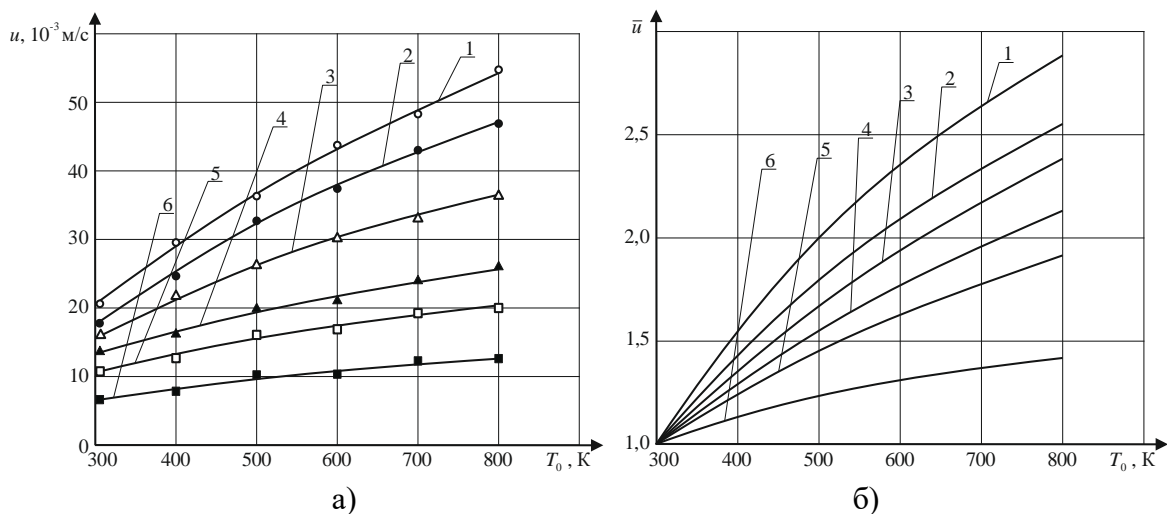


Рисунок 1 – Вплив коефіцієнту надлишку окиснювача  $\alpha$  на залежність швидкості горіння сумішей магній + нітрат натрію від температури нагріву ( $d_M = 74,5$  мкм;  $d_N = 106$  мкм;  $P = 10^5$  Па): 1 –  $\alpha = 0,25$ ; 2 –  $\alpha = 0,5$ ; 3 –  $\alpha = 1,0$ ; 4 –  $\alpha = 1,5$ ; 5 –  $\alpha = 2,0$ ; 6 –  $\alpha = 3,0$ ;  $\circ$ ,  $\bullet$ ,  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$ ,  $\square$  – експериментальні дані; а) – залежності абсолютної швидкості горіння  $u(T_0)$ ; б) – залежності відносної швидкості горіння  $\bar{u}(T_0)$  ( $\bar{u} = u/u_{T_0=300}$ , де  $u_{T_0=300}$  – значення швидкості горіння при  $T_0 = 300$  К)

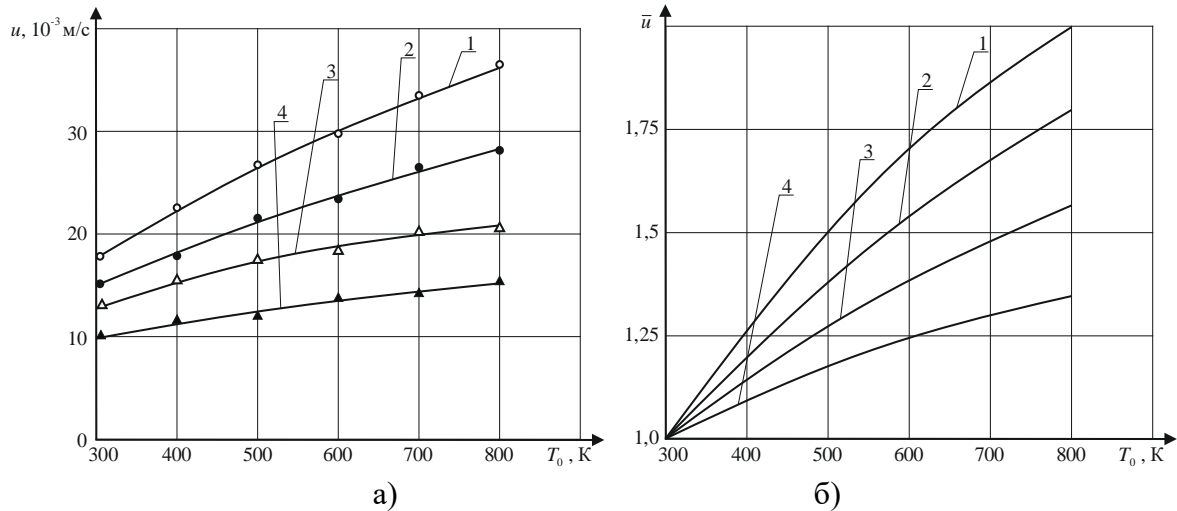


Рисунок 2 – Вплив дисперсності порошку металевого пального на залежність швидкості горіння стехіометричних сумішей магній + нітрат натрію від температури нагріву ( $\alpha = 1,0$ ;  $d_N = 106$  мкм;  $P = 10^5$  Па): 1 –  $d_m = 74,5$  мкм; 2 –  $d_m = 135$  мкм; 3 –  $d_m = 182$  мкм; 4 –  $d_m = 305$  мкм (решта позначень аналогічні рисунку 1)

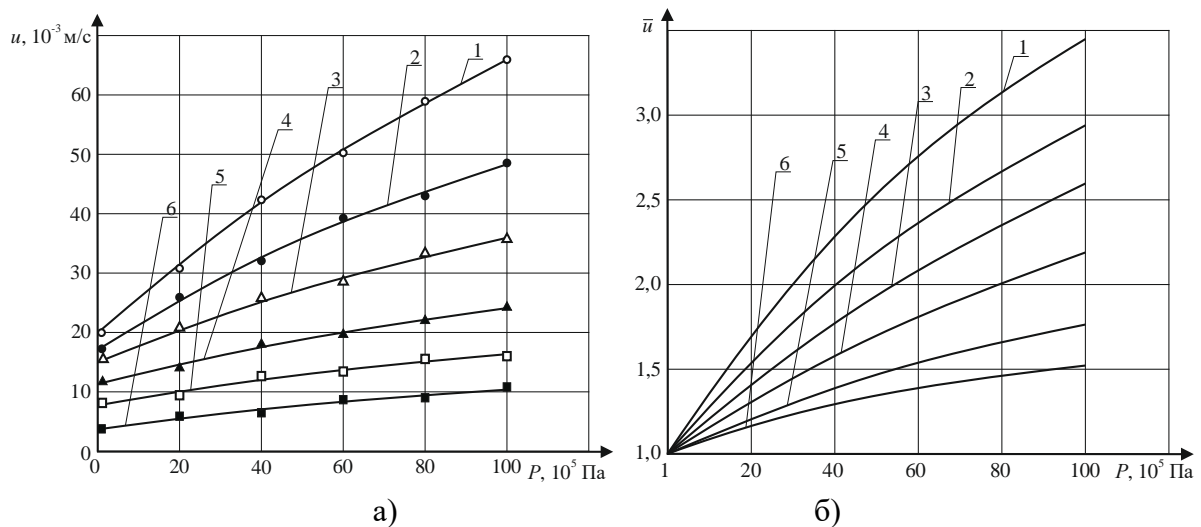


Рисунок 3 – Вплив коефіцієнту надлишку окиснювача  $\alpha$  на залежність швидкості горіння сумішей магній + нітрат натрію від зовнішнього тиску ( $d_m = 74,5$  мкм;  $d_N = 106$  мкм;  $T_0 = 293$  К): 1 –  $\alpha = 0,25$ ; 2 –  $\alpha = 0,5$ ; 3 –  $\alpha = 1,0$ ; 4 –  $\alpha = 1,5$ ; 5 –  $\alpha = 2,0$ ; 6 –  $\alpha = 3,0$ ;  $\circ$ ,  $\bullet$ ,  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\blacksquare$ ,  $\square$  – експериментальні дані; а) – залежності абсолютної швидкості горіння  $u(P)$ ; б) – залежності відносної швидкості горіння  $\bar{u}(P)$  ( $\bar{u} = u/u_{P=10^5}$ , де  $u_{P=10^5}$  – значення швидкості горіння при  $P = 10^5$  Па)

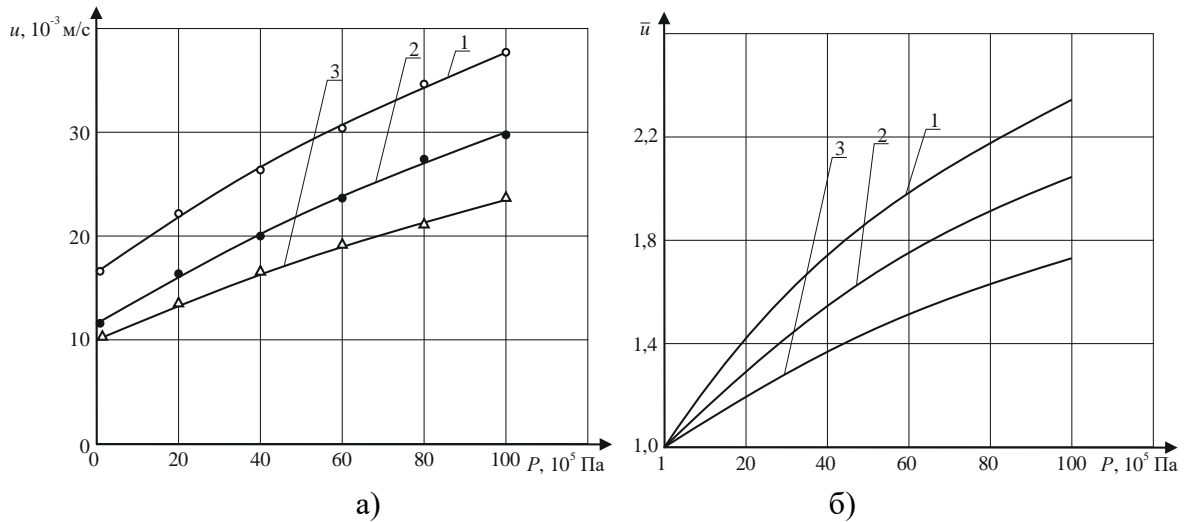


Рисунок 4 – Вплив дисперсності порошку металевого пального на залежність швидкості горіння стехіометричних сумішей магній + нітрат натрію від зовнішнього тиску ( $\alpha = 1,0$ ;  $d_N = 106$  мкм;  $T_0 = 293$  К): 1 –  $d_m = 74,5$  мкм; 2 –  $d_m = 182$  мкм; 3 –  $d_m = 305$  мкм (решта позначень аналогічні рисунку 3)

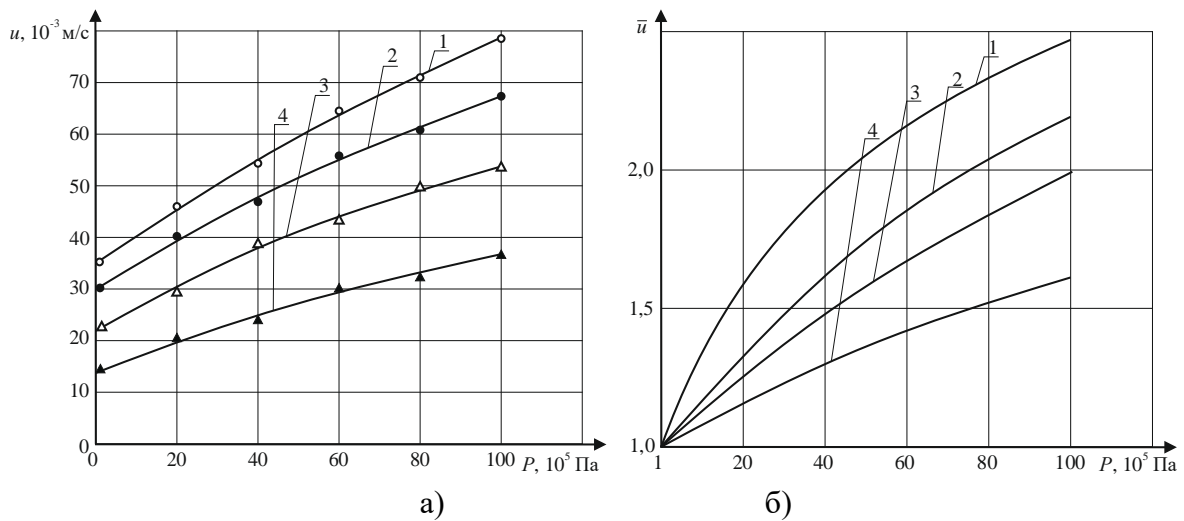


Рисунок 5 – Вплив температури нагріву на залежність швидкості горіння стехіометричної суміші магній + нітрат натрію від зовнішнього тиску ( $\alpha = 1,0$ ;  $d_m = 74,5$  мкм;  $d_N = 106$  мкм): 1 –  $P = 10^7$  Па; 2 –  $P = 5 \cdot 10^6$  Па; 3 –  $P = 10^6$  Па; 4 –  $P = 10^5$  Па (решта позначень аналогічні до рисунка 3)

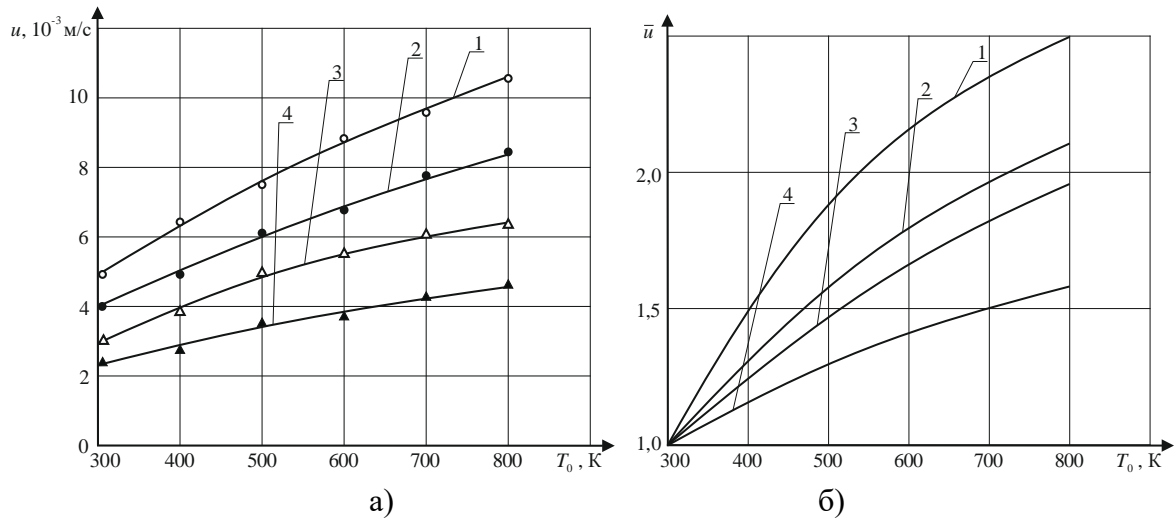


Рисунок 6 – Вплив дисперсності порошку металевого пального на залежність швидкості горіння стехіометричних сумішей алюміній + нітрат натрію від температури нагріву при зовнішньому тиску  $P = 10^5$  Па ( $\alpha = 1,0$ ;  $d_N = 106$  мкм): 1 –  $d_M = 56$  мкм; 2 –  $d_M = 105$  мкм; 3 –  $d_M = 179$  мкм; 4 –  $d_M = 306$  мкм (решта позначень аналогічні до рис. 1)

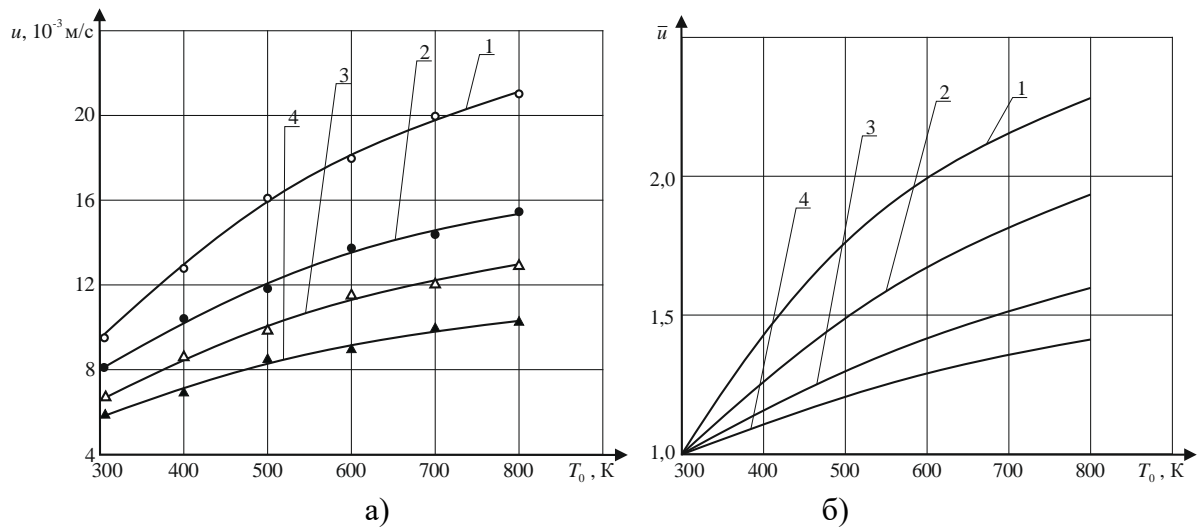


Рисунок 7 – Вплив дисперсності порошку металевого пального на залежність швидкості горіння стехіометричних сумішей алюміній + нітрат натрію від температури нагріву при зовнішньому тиску  $P = 10^7$  Па (решта позначень аналогічні до рисунка 1)

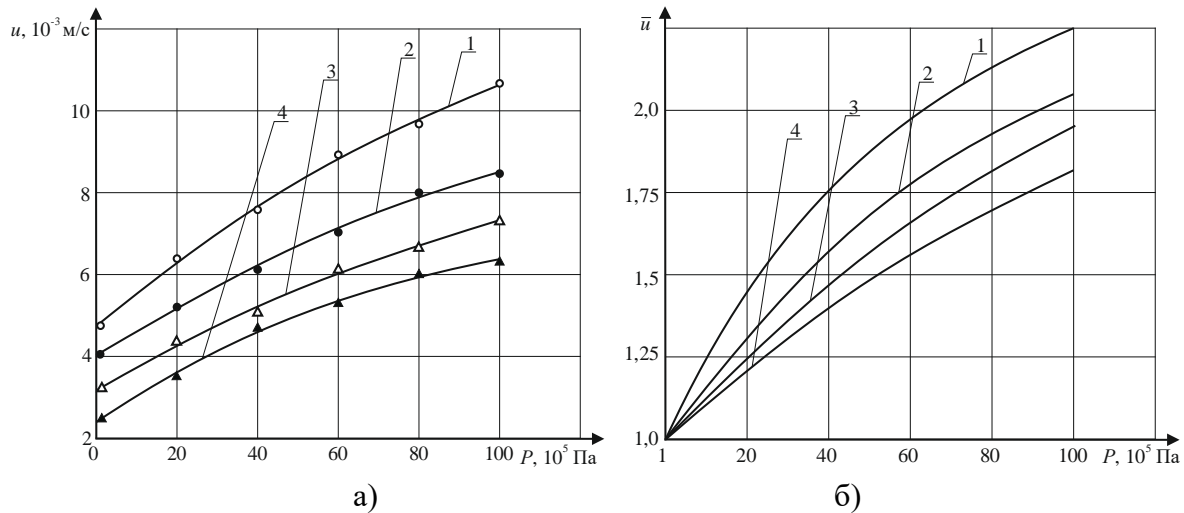


Рисунок 8 – Вплив дисперсності порошку металевого пального на залежність швидкості горіння стехіометричних сумішей алюміній + нітрат натрію від зовнішнього тиску при  $T_0 = 300$  К ( $\alpha = 1,0$ ;  $d_N = 106$  мкм): 1 –  $d_M = 56$  мкм; 2 –  $d_M = 105$  мкм; 3 –  $d_M = 179$  мкм; 4 –  $d_M = 306$  мкм (решта позначень аналогічні до рисунка 1)

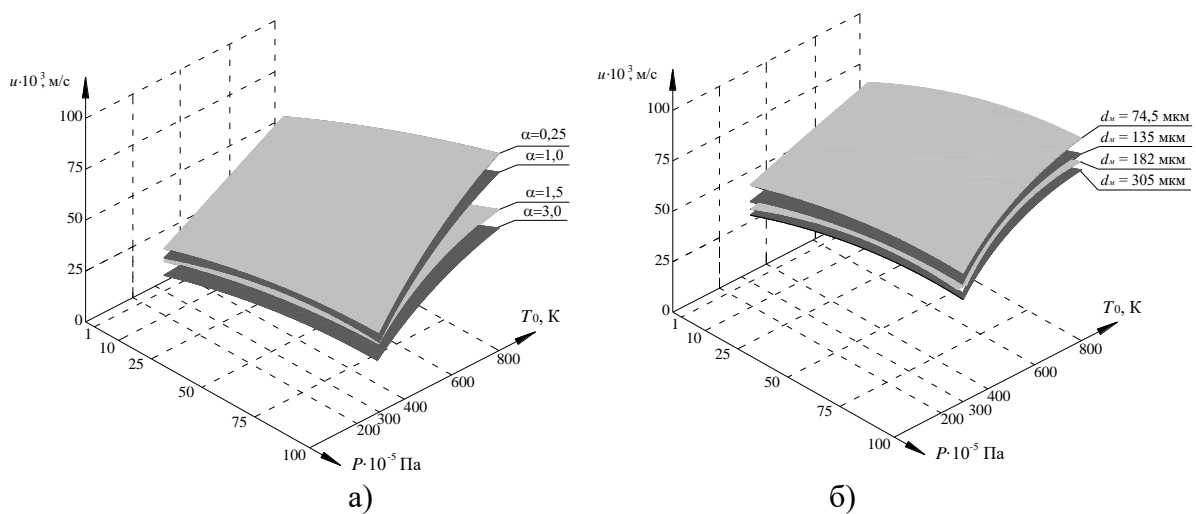


Рисунок 9 – Тривимірне зображення залежностей швидкості горіння суміші магній + нітрат натрію від температури нагріву та зовнішнього тиску для різних значень коефіцієнту надлишку окиснювача (а) (для  $d_m = 74,5$  мкм) та середнього розміру частинок металевого пального (б) (для  $\alpha = 1,0$ )

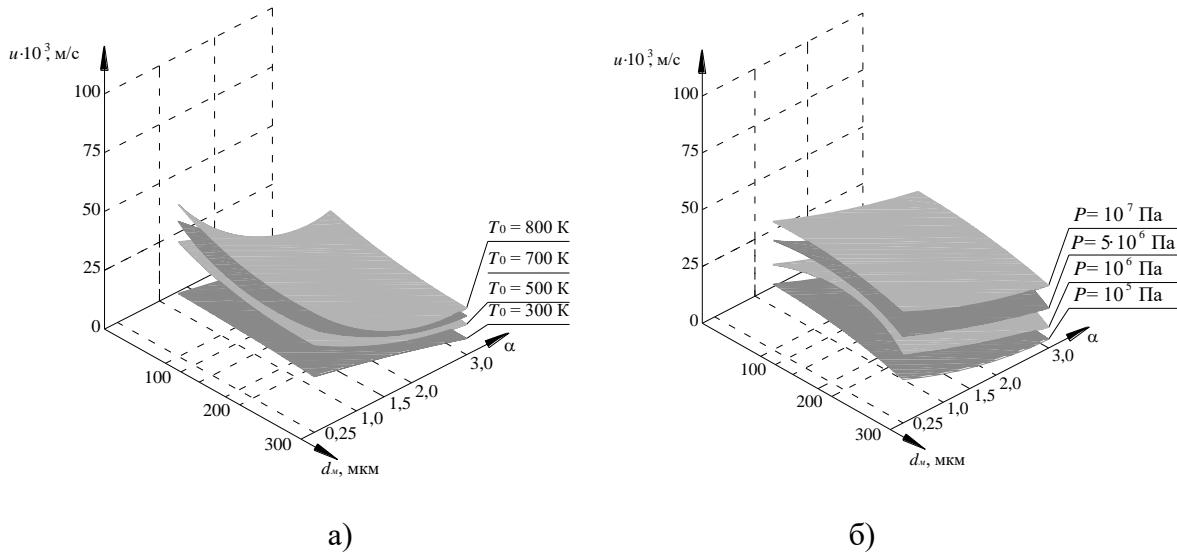


Рисунок 10 – Тривимірне зображення залежностей швидкості горіння суміші магній + нітрат натрію від коефіцієнту надлишку окиснювача та середнього розміру частинок порошку металевого пального для різних значень температур нагріву (а) (для  $P = 10^6$  Па) та зовнішнього тиску (б) (для  $T_0 = 400$  К)

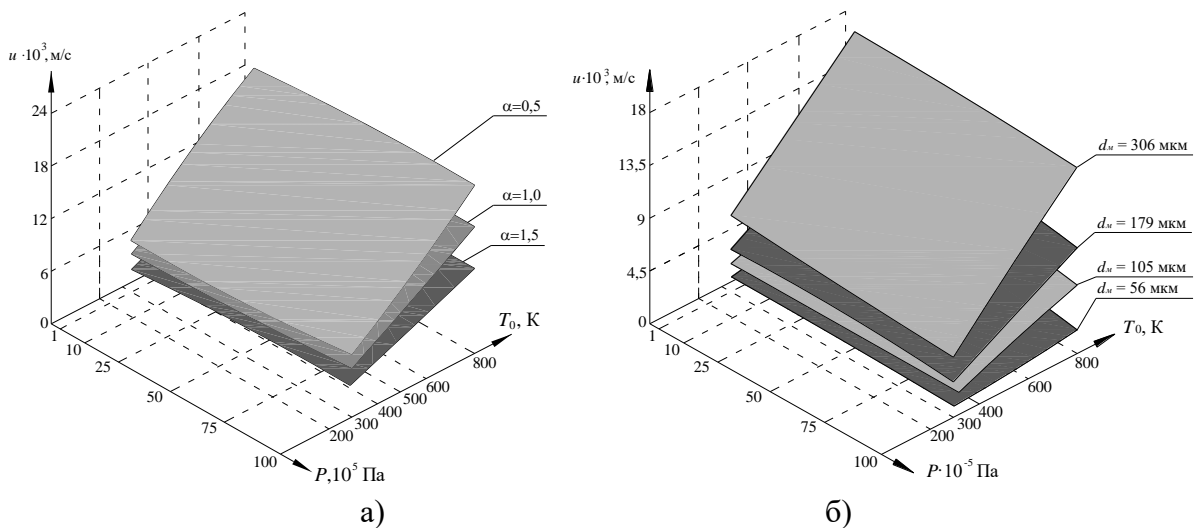


Рисунок 11 – Тривимірне зображення залежностей швидкості горіння суміші алюміній + нітрат натрію від температури нагріву та зовнішнього тиску для різних значень коефіцієнту надлишку окиснювача (а) (для  $d_m = 56$  мкм) та середнього розміру частинок металевого пального (б) (для  $\alpha = 1,0$ )

**Висновки.**

Розроблено нові експериментально-статистичні моделі для формування з відносною похибкою 3...5 % бази даних по впливу технологічних параметрів зарядів піротехнічних нітратно-металізованих сумішей (співвідношення компонентів та їх дисперсності, коефіцієнта ущільнення суміші) на швидкість та вибухонебезпечні режими розвитку їх горіння в умовах зовнішніх термічних впливів (підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків), які дозволяють визначати критичні діапазони їх зміни, перевищення яких призводить до різкого зростання швидкості горіння та пожежовибухонебезпечного руйнування виробів.



### **ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Ващенко В. А. Процеси горіння металізованих конденсованих систем / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. І. Заїка, І. В. Яценко, В. В. Цибулін. – К.: Наукова думка, 2008. – 745 с.
2. 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.
3. Молодик А. В. Досвід та перспективи вирішення теплофізичних проблем створення оптико-електронних спецвиробів ПЧ-техніки / А. В. Молодик, Н. І. Носов, Г. А. Смоляр, Д. В. Лозбин // Збірник тез доповідей 2-ї Української науково-технічної конференції “Спеціальне приладобудування: стан та перспективи”. – К.: КП СПБ “Арсенал”. 6 – 7 грудня 2016 р. – С. 54 – 56.
4. Фатєєв В. М. Піротехніка [Текст]: курс лекцій / В. М. Фатєєв, Ю. П. Приходько, Л. І. Таборов ; за заг. ред. д-ра юрид. наук, проф. С. С. Чернявського. – Київ, 2017. – 470 с.
5. Звіт про науково-дослідну роботу “Дослідження тенденцій і закономірностей динаміки основних показників статистики пожеж в Україні за територіальним принципом”. К.: УкрНДІЦЗ, 2018.
6. Ковалишин В. В. Використання екологічно прийнятних вогнегасних речовин / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Т. М. Войтович, Б. М. Гусар // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції “Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи” ДУБЖД, 2018.
7. Кириченко О. В. Визначення допустимих режимів нагріву піротехнічних сумішей при їх експлуатації / О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, Є. О. Тищенко, В. В. Цибулін // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2018. – № 2. – С. 5 – 11.
8. Kyrychenko O. V. Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels / O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko // Scientific Bulletin Civil Protection and Fire Safety, 2019. – No. 2 (8). – P. 81 – 85.
9. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. Чинний від 01.01.2020. К.: ДП УкрНДНЦ, 2019.
10. ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. Чинний від 01.01.2020. К.: ДП УкрНДНЦ, 2019.
11. Кириченко О. В. Визначення критичних режимів розвитку процесів горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій / О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, Т. І. Бутенко, В. В. Цибулін // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2020. – № 2. – С. 123 – 133.
12. Діброва О. С. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій / О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко // International Scientific Journal “Intenauka” <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5799.
13. Діброва О. С. Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій / О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко // International Scientific Journal “Intenauka” <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5798.

14. Dibrova O. Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions / O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, V. Melnyk // *Technology audit and production reserves*, 2020. – № 1/1(51). – P. 44 – 49.

15. Кириченко Є. Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах пострілу та польоту / Є. Кириченко // *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України “Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація”*, 2021. – том 5. – № 2. – С. 37 – 51.

16. Кириченко Є. П. Методика визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах експлуатації / Є. П. Кириченко // *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, 2022. – № 2. – С. 53 – 63.

17. Ващенко В. А. Комплекс експериментальних установок та методик для визначення швидкості та меж горіння металізованих конденсованих систем у динамічних умовах експлуатації / В. А. Ващенко, П. І. Заїка, Д. М. Краснов // *Вісник Сумського державного університету*, 2001. – № 19. – С. 112 – 124.

18. Ващенко В. А. Комплекс випробувальних установок, що моделюють реальні умови застосування піротехнічних нітратовмісних виробів / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, В. Д. Акіншин, В. В. Цибулин, І. В. Яценко // *Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки*, 2009. – № 1(19). – С. 127 – 137.

19. Ващенко В. А. Теоретичні засади теплотехніки. Курс лекцій/В. А. Ващенко. – Черкаси: ЧДТУ, 2003. – 80 с.

20. Ващенко В. А. Теплові процеси під час електронної обробки оптичних матеріалів та експлуатації виробів на їх основі. Монографія / В. А. Ващенко, Д. І. Котельников, Ю. Г. Лега, Д. М. Краснов, І. В. Яценко, О. В. Кириченко. – К.: Наукова думка, 2006. – 368 с.

## REFERENCES

1. Vashchenko V. A. Protsesy horinnia metalizovanykh kondensovanykh system / V. A. Vashchenko, O. V. Kyrychenko, Yu. H. Leha, P. I. Zaika, I. V. Yatsenko, V. V. Tsybulyn. – K.: Naukova dumka, 2008. – 745 s.

2. Kyrychenko O. V. Osnovy pozheznoi bezpeky pirotekhnichnykh nitratovmisnykh vyrobiv v umovakh zovnishnykh termovplyviv. Monohrafiia / O. V. Kyrychenko, P. S. Pashkovskiy, V. A. Vashchenko, Yu. H. Leha. – K.: Naukova dumka, 2012. – 318 s.

3. Molodyk A. V. Dosvid ta perspektyvy vyrishennia teplofizychnykh problem stvorennia optyko-elektronnykh spetsvyrobiv ICh-tekhniky / A. V. Molodyk, N. I. Nosov, H. A. Smoliar, D. V. Lozbyn // *Zbirnyk tez dopovidei 2-yi Ukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii “Spetsialne prykladobuduvannia: stan ta perspektyvy”*. – K.: KP SPB “Arsenal”. 6 – 7 hrudnia 2016 r. – S. 54 – 56.

4. Fatieiev V. M. Pirotekhnika [Tekst]: kurs leksii / V. M. Fatieiev, Yu. P. Prykhodko, L. I. Taborov ; za zah. red. d-ra yuryd. nauk, prof. S. S. Cherniavskoho. – Kyiv, 2017. – 470 s.

5. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu “Doslidzhennia tendentsii i zakonimirostey dynamiky osnovnykh pokaznykiv statystyky pozhez v Ukraini za terytorialnym pryntsyptom”. K.: UkrNDITsZ, 2018.

6. Kovalyshyn V. V. Vykorystannia ekolohichno pryiniatnykh vohnehasnykh rehovyn / V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, T. M. Voitovych, B. M. Husar // *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii “Ekolohichna bezpeka yak osnova staloho rozvytku suspilstva. Yevropeyskyi dosvid i perspektyvy” DUBZhD*, 2018.

7. Kyrychenko O. V. Vyznachennia dopustymykh rezhymiv nahrivu pirotekhnichnykh sumishei pry yikh ekspluatatsii / O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, Ye. O. Tyshchenko, V. V. Tsybulin // *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*, 2018. – № 2. – С. 5 – 11.
8. Kyrychenko O. V. Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels / O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko // *Scientific Bulletin Civil Protection and Fire Safety*, 2019. – No. 2 (8). – P. 81 – 85.
9. DSTU 8828:2019. Pozhezhna bezpeka. Zahalni polozhennia. Chynnyi vid 01.01.2020. K.: DP UkrNDNTs, 2019.
10. DSTU 8829:2019. Pozhezhovybukhonebezpechnist rehovyn i materialiv. Nomenklatura pokaznykiv i metody yikhnoho vyznachennia. Klasyfikatsiia. Chynnyi vid 01.01.2020. K.: DP UkrNDNTs, 2019.
11. Kyrychenko O. V. Vyznachennia krytychnykh rezhymiv rozvytku protsesiv horinnia pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishei v umovakh zovnishnikh termichnykh dii / O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, T. I. Butenko, V. V. Tsybulin // *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*, 2020. – № 2. – S. 123 – 133.
12. Dibrova O. S. Pidvyshchennia pozhezhnoi bezpeky pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishei v umovakh zovnishnikh termichnykh dii / O. S. Dibrova, O. B. Kyrychenko, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko // *International Scientific Journal “Intenauka”* <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5799.
13. Dibrova O. S. Zakonomirnosti vplyvu tekhnolohichnykh parametriv na pozhezhnu bezpeku pirotekhnichnykh nitratno-tytanovykh sumishei v umovakh zovnishnikh termichnykh dii / O. S. Dibrova, O. V. Kyrychenko, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko // *International Scientific Journal “Intenauka”* <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5798.
14. Dibrova O. Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions / O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, V. Melnyk // *Technology audit and production reserves*, 2020. – № 1/1(51). – P. 44 – 49.
15. Kyrychenko Ye. Doslidzhennia protsesiv zovnishnikh termoudarnykh dii na pirotekhnichni metaloksydni vyroby v umovakh postrilu ta polotu / Ye. Kyrychenko // *Zbirnyk naukovykh prats Cherkaskoho instytutu pozhezhnoi bezpeky im. Heroiv Chornobylia Natsionalnoho universytetu tsyvilnoho zakhystu Ukrainy “Nadzvychni situatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia”*, 2021. – tom 5. – № 2. – S. 37 – 51.
16. Kyrychenko Ye. P. Metodyka vyznachennia krytychnykh znachen parametriv zovnishnikh termichnykh dii na pirotekhnichni metalooksydni vyroby v umovakh ekspluatatsii / Ye. P. Kyrychenko // *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*, 2022. – № 2. – S. 53 – 63.
17. Vashchenko V. A. Kompleks eksperymentalnykh ustanovok ta metodyk dlia vyznachennia shvydkosti ta mezh horinnia metalizovanykh kondensovanykh system u dynamichnykh umovakh ekspluatatsii / V. A. Vashchenko, P. I. Zaika, D. M. Krasnov // *Visnyk Sumskoho derzhavnoho universytetu*, 2001. – № 19. – S. 112 – 124.
18. Vashchenko V. A. Kompleks vyprobuvalnykh ustanovok, shcho modeliuut realni umovy zastosuvannia pirotekhnichnykh nitratovmisnykh vyrobiv / V. A. Vashchenko, O. V. Kyrychenko, V. D. Akinshyn, V. V. Tsybulyn, I. V. Yatsenko // *Naukovi visnyk Ukrainського naukovo-doslidnoho instytutu pozhezhnoi bezpeky*, 2009. – № 1(19). – S. 127 – 137.
19. Vashchenko V. A. Teoretychni zasady teplotekhniky. Kurs lektsii/V. A. Vashchenko. – Cherkasy: ChDTU, 2003. – 80 s.
20. Vashchenko V. A. Teplovi protsesy pid chas elektronnoi obrobky optychnykh materialiv ta ekspluatatsii vyrobiv na yikh osnovi. Monohrafiia / V. A. Vashchenko, D. I. Kotelnikov, Yu. H. Leha, D. M. Krasnov, I. V. Yatsenko, O. V. Kyrychenko. – K.: Naukova dumka, 2006. – 368 s.

UDC 614.841:536.46

*Nazarii Koziar, PhD in technical sciences (ORCID: 0000-0001-9082-0771),  
National University of Civil Protection of Ukraine*

## **PREVENTION OF PREMATELY FIRE EXPLOSION AND UNSAFE USE OF PYROTECHNIC MIXTURES IN THE CONDITIONS OF SHOT AND FLIGHT**

*The regularities of the effect of external thermal shock effects of supersonic blowing with an air stream on metal hemispherical shells of charges of nitrate-metallized mixtures with additives of organic and inorganic substances, which are used to equip pyrotechnic products (pyrotechnic IR emitters, elements of rocket and space technology, etc.) have been established. Temperature distributions along the outer and inner shells and along their thickness were studied. The critical values of air blowing speeds and times of its thermal shock effect were determined, exceeding which leads to premature ignition of mixture charges, a sharp acceleration of their combustion under the shells and, ultimately, to fire-explosive destruction of the products.*

*For the first time, the existence of the maximum permissible ranges of changes in the main parameters of the external shock thermodynamics of the supersonic air flow on the surface of the hemispherical metal shells of mixture charges (blowing speed, time of its influence ( $j = 1, 2, \dots$ )), exceeding which leads to premature self-heating of the mixture charges as a result the process of exothermic oxidation of metal fuel particles in gaseous products of thermal decomposition of the oxidizer and additives of organic and inorganic substances, which leads to their ignition, the occurrence of combustion in closed volumes with its further acceleration and, ultimately, to premature activation and fire-hazardous destruction of pyrotechnic products with the release of high-temperature combustion products into the environment.*

*A comparison of the results of calculations of temperature fields in metal cases of products (hemispherical shells) during shock thermodynamics of an external supersonic air flow with the obtained experimental data showed that the developed mathematical models can be used in practice as more accurate methods (the relative error is reduced to 7...9% instead of 10...15% - in existing methods) for predicting dangerous areas on the surface of products with maximum thermal effects, where they are subjected to the most intensive heating; temperature levels on the inner surface of the product bodies, which is in contact with the charges of pyrotechnic mixtures, and the permissible values of both the parameters of external thermodynamics and the technological parameters of the mixtures by applying the necessary data on the ignition temperatures of metal particles in the gaseous decomposition products of the oxidizer and additives of organic and inorganic substances.*

**Key words:** *fire safety, pyrotechnic nitrate-metallized mixtures, gas dynamic processes, methods of the theory of thermal conductivity.*