УДК 662.613.12:669.046.44(024.2)
DOI: https://doi.org/10.52363/2524-2636.2025.9.1.7

Вікторія КОВБАСА[1] *(ORCID: 0000-0002-9479-669X)*
Оксана КИРИЧЕНКО[1]*, д-р техн. наук, професор (ORCID: 0000-0002-0240-1807)*
Марія КУЦЕНКО[1]*, канд. екон. наук, доцент (ORCID:0000-0001-6879-9187)*
Вячеслав ВАЩЕНКО[2]*, д-р техн. наук, професор (ORCID: 0000-0003-0722-9353)*
Андрій БЕРЕЗОВСЬКИЙ[1]*, канд. техн. наук, доцент ((ORCID: 0000-0002-4043-1206)*
Євгеній ШКОЛЯР[1]*, канд. психол. наук (ORCID:0000-0002-7304-1677)*
Марина ТОМЕНКО[1]*, канд. пед. наук (ORCID:0000-0002-2354-9106)*
[1]*Національний університет цивільного захисту України*
[2]*Черкаський державний технологічний університет*

КЕРОВАНА БАЗА ДАНИХ ПО ЧАСАМ ЗГОРЯННЯ ЧАСТИНОК МЕТАЛЕВИХ ПАЛЬНИХ В ПРОДУКТАХ ТЕРМІЧНОГО РОЗКЛАДАННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ МЕТАЛІЗОВАНИХ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ ФТОРОПЛАСТІВ

Аналіз новітніх досліджень виявив закономірності, як різні параметри впливають на час горіння частинок магнію, алюмінію та цирконію в продуктах розкладання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів. Вперше були створені експериментально-статистичні моделі для передбачення впливу технологічних параметрів на час горіння частинок металів, що дало змогу сформувати базу даних про пожежонебезпечні властивості в умовах зовнішніх термічних дій.

Для виконання завдання використовувалися методи експериментально-статистичного моделювання та спеціалізоване програмне забезпечення, яке дозволяє розраховувати часи згоряння металевих частинок у продуктах розкладання сумішей, підвищуючи точність прогнозування пожежонебезпечних властивостей в умовах інтенсивного зовнішнього нагрівання. Отримані результати забезпечують практичне використання моделей для оцінювання та зниження пожежонебезпечних ризиків. Крім того, такі моделі сприятимуть розробці нових, більш безпечних піротехнічних матеріалів та виробів. Це дослідження є важливим кроком у забезпеченні належного рівня захисту під час транспортування, зберігання та використання піротехнічних виробів у різних умовах. Завдяки цим результатам можна також оптимізувати технологічні процеси виробництва та підвищити ефективність використання ресурсів.

Моделі враховують вплив ключових керованих параметрів, таких як розмір частинок металевого пального, коефіцієнт надлишку окиснювача, зовнішній тиск та швидкість потоку, на час згоряння частинок металів, включаючи магній, алюміній та цирконій, у продуктах термічного розкладання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів. Під час розробці моделей також враховані зовнішні термічні впливи на поверхню виробів.

Ключові слова: *пожежна безпека, термічне розкладання, піротехнічні металізовані суміші, фторопласти, горіння металів.*

Постановка проблеми. Проблема полягає в надзвичайній небезпеці, яку становлять піротехнічні суміші, що включають металеві пальні матеріали, такі як магній, алюміній і цирконій, у поєднанні з фторопластами (Ф-3, Ф-4 тощо) під дією зовнішнього примусового нагрівання. Такі умови можуть виникати під час зберігання, транспортування, пострілу та польоту піротехнічних виробів. У результаті нагрівання такі суміші здатні займатися, що приводить до неконтрольованого горіння, яке відрізняється стрімким поширенням та утворенням високотемпературних продуктів згоряння.

Ці продукти згоряння розлітаються з великою швидкістю, створюючи серйозну загрозу для технічних об’єктів, зокрема будівель, пускових установок, а також для обслуговуючого персоналу. Подібні ситуації можуть призвести до руйнування виробів, що не лише ставить під загрозу матеріальні об'єкти, але й створює значні ризики для життя та здоров’я людей, які перебувають у зоні впливу.

Крім того, такі процеси спричиняють ускладнення в контролі та прогнозуванні характеристик горіння металевих частинок у складі піротехнічних сумішей. Зокрема, це стосується визначення часу горіння частинок у газоподібних продуктах розкладання, що є ключовим для розробки ефективних заходів безпеки. Відсутність систематизованих знань про ці параметри робить неможливим належний контроль над пожежними ризиками, які виникають при експлуатації та застосуванні таких матеріалів.

Отже, проблема дослідження полягає у необхідності поглибленого аналізу та розробки методів прогнозування пожежонебезпечних властивостей піротехнічних сумішей, зокрема в умовах примусового нагрівання. Це дозволить розв’язати низку практичних завдань, пов'язаних із забезпеченням техногенної безпеки в галузях, де використовуються подібні матеріали, а також з мінімізацією ризиків для персоналу, інфраструктури та довкілля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наразі інформація про часи горіння частинок металів, таких як магній, алюміній і цирконій, у газоподібних середовищах під дією підвищених температур розпорошена в різних наукових джерелах.

Зокрема, у [1] розглядаються фундаментальні аспекти горіння металізованих систем, зокрема механізми термічного розкладання й горіння. Це дослідження є важливим для розуміння впливу металевих компонентів, таких як магній і алюміній, на тривалість горіння частинок та утворення високотемпературних продуктів. Ці аспекти слугують основою для аналізу фізико-хімічних параметрів, які необхідні для розробки керованої бази даних.

У [2] акцент зроблено на аспектах пожежної безпеки піротехнічних виробів у випадках зовнішніх теплових впливів. У роботі аналізується взаємодія компонентів, що дозволяє прогнозувати тривалість горіння частинок у продуктах розкладання піротехнічних сумішей на основі фторопластів. Методики, наведені авторами, можуть стати базою для структурування даних у контексті вашої теми.

Автори [3] зосереджуються на вивченні впливу механічних характеристик піротехнічних зарядів на їхню горючість і пожежну безпеку. Ця робота допомагає дослідити параметри піротехнічних сумішей із металевими частинками та визначити ключові чинники, що впливають на час горіння частинок у продуктах термічного розкладання, що є цінним для створення відповідної бази даних.

У [4] розглядаються процеси горіння алюмінієвого порошку в складі піротехнічних сумішей, з акцентом на характеристиках горіння частинок алюмінію. Це безпосередньо пов’язано з нашою темою, оскільки дослідження надає важливі дані про параметри горіння металевих компонентів, які є ключовими для створення керованої бази даних.

Автори [5] провели термодинамічні розрахунки для визначення температури продуктів горіння піротехнічних виробів. Отримані результати дозволяють оцінити вплив складу піротехнічних сумішей на швидкість реакції та температуру горіння, що сприяє ефективному моделюванню цих процесів у рамках бази даних.

Робота [6] присвячена методам запобігання передчасному займанню піротехнічних виробів. Аналіз умов, що призводять до передчасного згоряння металевих компонентів, є важливим для врахування потенційних ризиків і адаптації даних при створенні бази.

У [7] представлено модель розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей, які включають металеві пальні та оксиди металів. Ця модель забезпечує глибоке розуміння механізмів горіння, що сприяє точному прогнозуванню часових характеристик горіння в умовах термічного розкладання, що безпосередньо відповідає завданням дослідження.

Усі проаналізовані джерела дійсно є цінними для дослідження, адже вони висвітлюють ключові параметри горіння піротехнічних сумішей, а також пропонують методики аналізу й моделі, які можуть бути інтегровані у створення керованої бази даних.

Однак їхнє застосування у специфічному контексті дослідження пожежонебезпечних властивостей сумішей за умов інтенсивного зовнішнього нагрівання стикається з низкою обмежень. Основна складність полягає в адаптації існуючих методів до умов, що характеризуються високими температурами нагрівання, швидкими термічними змінами та різноманіттям продуктів розкладання, які значною мірою впливають на динаміку процесу горіння.

Тому, хоча ці праці формують важливу теоретичну основу, є необхідність подальшого опрацювання специфічних характеристик, притаманних саме таким екстремальним умовам, і розробки додаткових методів прогнозування, що враховують особливості зовнішнього примусового нагрівання. Це може передбачати створення нових експериментальних даних та модифікацію існуючих моделей для отримання повноцінної картини поведінки піротехнічних матеріалів у критичних умовах.

Постановка задачі та її розв'язання. У результаті аналізу літературних джерел, була поставлена мета узагальнити наявні дані про часи горіння частинок металів (магній, алюміній, цирконій) у продуктах термічного розкладання піротехнічних сумішей, що, у свою чергу, дозволяє створити керовану базу даних для практичного застосування. Це сприятиме прогнозуванню поведінки таких матеріалів в екстремальних умовах, підвищуючи безпеку їх використання. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– узагальнити наявну інформацію про ключові параметри горіння частинок металів у продуктах термічного розкладання;

– розробити експериментально-статистичні моделі, які описують ці параметри з використанням методів регресії та інтерполяції;

– адаптувати отримані моделі до програмного забезпечення, що дозволяє проводити розрахунки в режимі діалогу;

– створити інтерактивну базу даних для підтримки прогнозів та аналізу безпечності процесів за різних умов експлуатації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для розрахунку залежностей часу горіння ($\tau_г$, с) від розміру частинок металу ($d_м$, мкм), коефіцієнта надлишку окиснювача (α) в суміші, швидкості потоку (V, м/с) та зовнішнього тиску (P, Па) розроблені відповідні моделі. У дослідженні розглядаються експериментальні дані для температур навколишнього середовища від 1100 до 1300 К, характерних для реакційної зони та температури поверхні горіння розглянутих сумішей [5, 8, 9]. Використані експериментальні дані були отримані на стандартному піротехнічному обладнанні із застосуванням відомих фотографічних методів, а також методів мікрокінозйомки (кінокамера СКС-1М, швидкість зйомки 3000...5000 кадр/с) [6 – 8].

Моделі для розглядуваних металів, зокрема магнію, алюмінію та цирконію, наведені нижче. Відносна похибка цих моделей становить 5-7%, що забезпечує високу точність прогнозування часу згоряння частинок металів у продуктах термічного розкладання піротехнічних сумішей на основі фторопластів за умов зовнішніх термічних впливів. Перераховані моделі стали основою для прогнозування поведінки піротехнічних сумішей за різних умов, що дозволяє оптимізувати процеси виробництва та підвищити безпеку експлуатації піротехнічних виробів. Вони також забезпечують інструмент для подальших досліджень, що можуть бути використані для розробки нових, більш безпечних матеріалів та технологій.

<u>Магній</u>

$$\tau_г(d_м, \alpha, V, P) = \left(0{,}019 - 4{,}3\frac{P}{V}\right)\alpha^2 + (0{,}47 + 0{,}01PV^{0{,}01})\alpha +$$

$$+0{,}84 + 0{,}2VP^{0{,}3} + 10^{-5}\frac{d_м}{P} + P^{0{,}2}(0{,}03 + 0{,}1V^{1{,}1})(V + \alpha + 0{,}5)^{-1}. (1)$$

<u>Алюміній</u>

$$\tau_{\text{г}}(d_{\text{м}}, \alpha, V, P) = \left(0{,}021 - 4{,}2\frac{P}{V}\right)\alpha^2 + (1{,}17 + 0{,}01 \cdot P \cdot V^{0{,}02})\alpha$$

$$+0{,}87 + 0{,}4VP^{0{,}3} + 2 \cdot 10^{-5}\frac{d_{\text{м}}}{P} + P^{0{,}3}(0{,}13 + 0{,}07 \cdot V^{1{,}23})(V + \alpha + 0{,}15)^{-1}. (2)$$

<u>Цирконій</u>

$$\tau_{\text{г}}(d_{\text{м}}, \alpha, V, P) = \left(0{,}017 - 3{,}4\frac{P}{V}\right)\alpha^2 + (0{,}27 + 0{,}03 \cdot P \cdot V^{0{,}01})\alpha +$$

$$+0{,}65 + 0{,}07 \cdot V \cdot P^{0{,}2} + 9 \cdot 10^{-6}\frac{d_{\text{м}}}{P} + P^{0{,}54}(0{,}021 + 0{,}09V^{1{,}25})(V + \alpha + 0{,}18)^{-1}. (3)$$

Результати розрахунків що здійснювалися за формулами (1) – (3) продемонстровано на рис. 1 – 3. Ці дослідження дозволили встановити діапазони зміни часу горіння металевих частинок у продуктах термічного розкладання піротехнічних нітратно-металевих сумішей за різних умов. Визначено, що тривалість горіння суттєво залежить від природи металевого пального, дисперсності частинок, концентрації окиснювача та параметрів зовнішнього середовища, таких як температура та тиск (α = 0,5 – 1,5; P = 10^5 – 10^7 Па; V = 1 – 10 м/с):

<u>для частинок магнію</u> $\tau_{\text{г}}$ = $3{,}45 \cdot 10^{-2}$...$41{,}2 \cdot 10^{-2}$ с при $d_м$ = 50...300 мкм;
<u>для частинок алюмінію</u> $\tau_{\text{г}}$ = $1{,}5 \cdot 10^{-2}$...$5{,}9 \cdot 10^{-2}$ с при $d_м$ = 50...300 мкм;
<u>для частинок цирконію</u> $\tau_{\text{г}}$ = $7{,}8 \cdot 10^{-3}$... $2{,}7 \cdot 10^{-2}$ с при $d_м$ = 5...15 мкм.

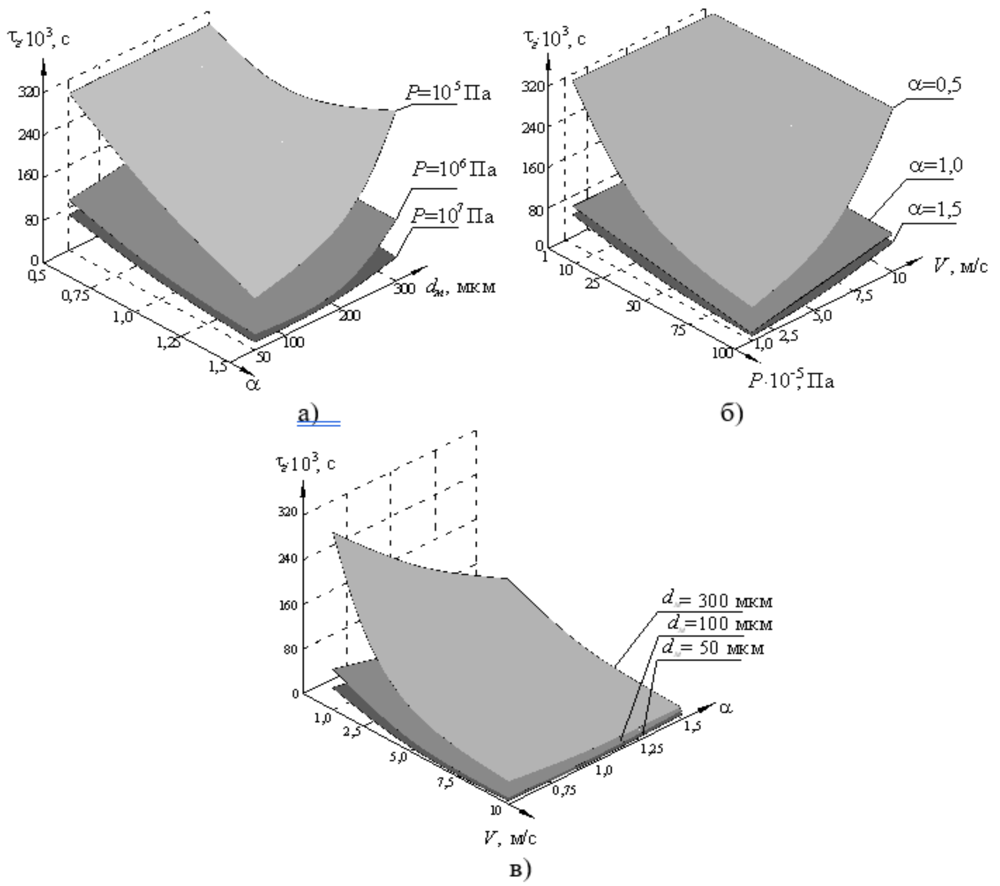

Рисунок 1 – Тривимірне зображення залежностей часу згоряння частинок магнію від таких параметрів: *а* – від $d_м$ та α (V = 1 м/с); *б* – від V та P ($d_м$ = 50 мкм); *в* – від α та V (P = 10^5 Па)

Також, результати розрахунків для діапазонів зміни параметрів ($d_м$, α, P та V), що мають застосування в практичній складовій, демонструють, що механізм горіння частинок металів відбувається стало без вибухових фрагментацій. Модифікація згаданих параметрів значуще впливає на час згоряння частинок металів. Наприклад, збільшення розміру частинок металу $d_м$ призводить до значного зростання часу згоряння $\tau_г$ (у 9 – 11 разів). З іншого боку, збільшення коефіцієнта надлишку окиснювача α, зовнішнього тиску P та швидкості потоку V, призводить до зменшення часу згорянням $\tau_г$ відповідно у 1,6 – 1,9 разу (для V), у 1,9 – 3,2 разу (для α) та у 10 – 12 разів (для P).

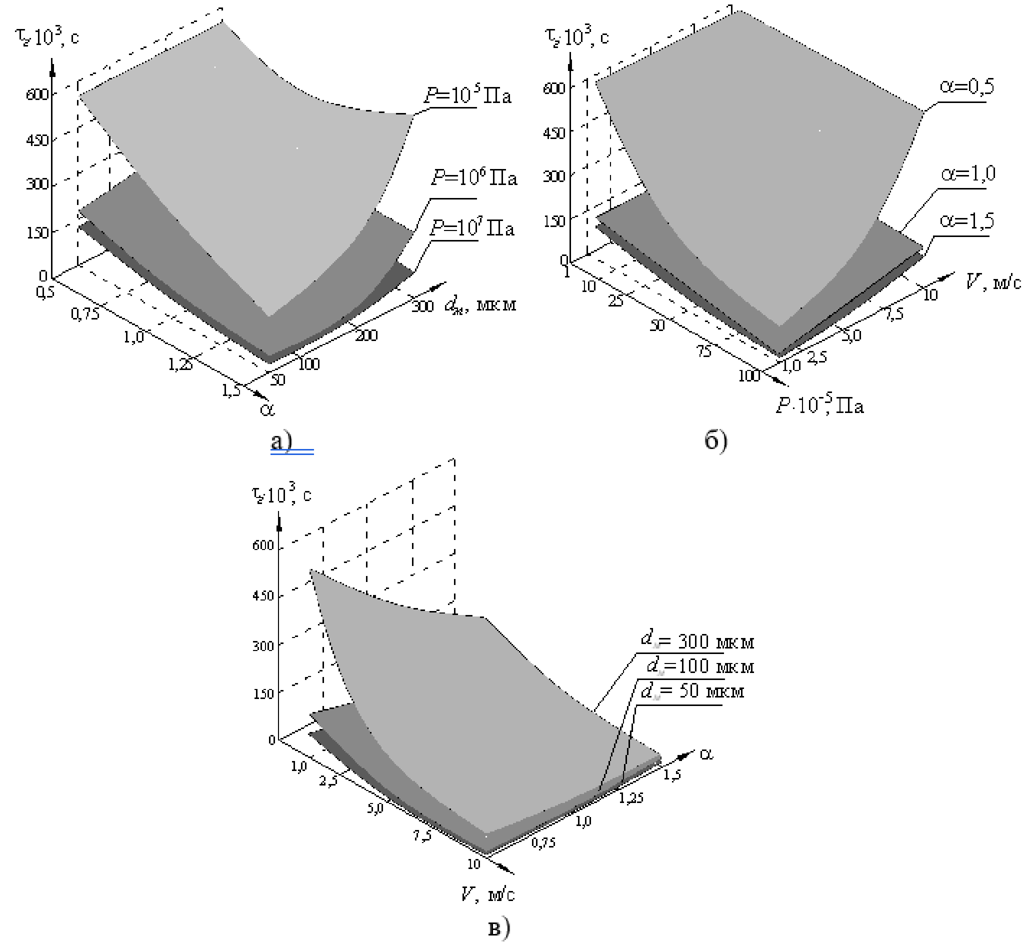

Рисунок 2 – Тривимірне зображення залежностей часу згоряння частинок алюмінію від таких параметрів: *а* – від $d_м$ та α (V = 1 м/с); *б* – від V та P ($d_м$ = 50 мкм); *в* – від α та V (P = 10^5 Па)

Розроблені експериментально-статистичні моделі (1) – (3) дають можливість створювати керовану базу даних щодо часу згоряння металевих частинок у продуктах термічного розкладання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів під впливом зовнішнього нагріву. Це стало можливим завдяки застосуванню стандартного спеціалізованого програмного забезпечення, що працює у діалоговому режимі на персональних комп’ютерах.

Дані моделі дозволяють оперативно аналізувати вплив технологічних параметрів сумішей (дисперсності металевого пального, співвідношення компонентів, природи окиснювача) та зовнішніх умов (температури середовища, тиску) на швидкість і тривалість процесу горіння.

Розроблена база даних може слугувати основою для створення загальної керованої системи експериментально-статистичних даних, призначеної для прогнозування пожежонебезпечних характеристик піротехнічних виробів різного призначення в умовах впливу зовнішніх термічних факторів. Це стосується ситуацій, пов'язаних із тепловим випромінюванням і конвекцією, що виникають під час пожеж, а також із впливом ударних термових дій надзвукових газових потоків на поверхню виробу в процесі пострілу та польоту.

Такі моделі та бази даних є важливими для подальшого розвитку безпечних піротехнічних матеріалів та технологій. Завдяки їм можна ефективніше прогнозувати поведінку піротехнічних виробів в екстремальних умовах, що сприятиме підвищенню їх безпеки та надійності.

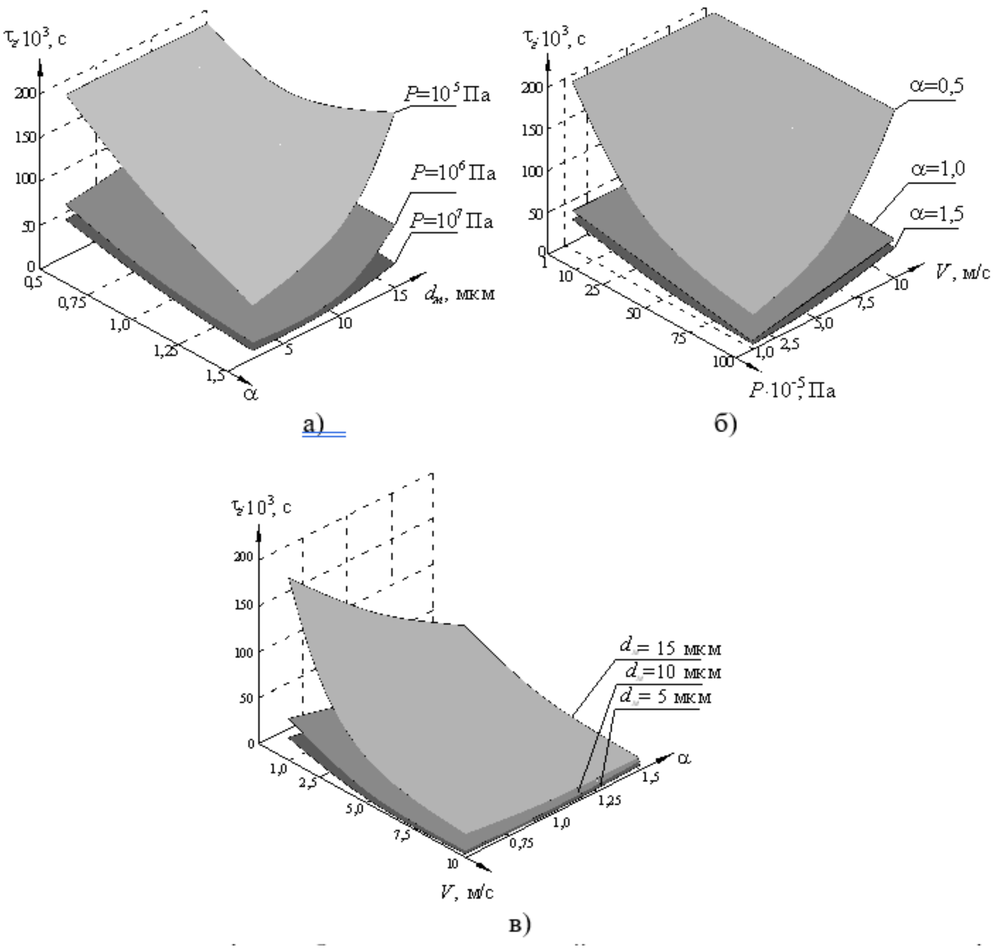

Рисунок 3 – Тривимірне зображення залежностей часу згоряння частинок цирконію від таких параметрів: *а* – від $d_м$ та α (V = 1 м/с); *б* – від V та P ($d_м$ = 5 мкм); *в* – від α та V (P = 10^5 Па)

Усі представлені графіки надають цілісне та глибоке уявлення про взаємодію ключових фізичних параметрів, таких як середній діаметр частинок, коефіцієнт теплопередачі, швидкість газового потоку і тиск, на процес горіння частинок металів. Ця інформація є критично важливою для розробки високоточних математичних моделей, які враховують специфічні умови горіння піротехнічних сумішей у газоподібному середовищі. Виявлення закономірностей та побудова таких моделей дозволяє прогнозувати динаміку горіння частинок металів, що особливо актуально для оцінки пожежонебезпечних характеристик піротехнічних сумішей у різноманітних умовах їх експлуатації. Це не тільки сприяє підвищенню безпеки використання таких матеріалів, але й відкриває нові можливості для удосконалення їх складу та розробки більш стабільних технологічних процесів.

Висновки. Встановлено закономірність комплексного впливу різних фізичних параметрів на тривалість горіння частинок металів (магній, алюміній, цирконій) у продуктах термічного розкладання піротехнічних сумішей. Зокрема, збільшення розміру частинок металевого пального від 5 мкм до 300 мкм незалежно від коефіцієнта надлишку окиснювача, швидкості потоку продуктів розкладання та зовнішнього тиску значно подовжує час їх горіння, збільшуючи його у 9–11 разів. У свою чергу, зростання коефіцієнта надлишку окиснювача від 0,5 до 1,5, швидкості потоку від 2 м/с до 9 м/с та зовнішнього тиску від 10^5 Па до 10^7 Па незалежно від розміру частинок металу призводить до зменшення часу їх горіння у 1,9–3,2 разу для коефіцієнта α, у 1,6–1,9 разу для швидкості та у 10–12 разів для тиску. Розроблено нові експериментально-статистичні моделі з відносною похибкою 5–7%, які враховують вплив основних керованих параметрів, таких як розмір частинок металевого пального, коефіцієнт надлишку окиснювача, зовнішній тиск та швидкість потоку, на тривалість горіння частинок металів у продуктах термічного розкладання піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів за умов зовнішніх термічних впливів на поверхню виробів. Створено інтерактивну базу розрахункових даних, яка дозволяє проводити точні розрахунки часу горіння частинок металів, що забезпечує практичне застосування отриманих результатів для прогнозування поведінки піротехнічних сумішей в екстремальних умовах. Виконані дослідження сприяють удосконаленню процесів та розробці більш безпечних матеріалів, мінімізуючи ризики пожежонебезпечних ситуацій у реальних умовах використання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ващенко В. А., О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. І. Заїка. Процеси горіння металізованих конденсованих систем. Монографія.– К.: Наукова думка, 2008 – 745 с.

2. Кириченко О. В., П. С. Пашковський, В. А. Ващенко, Ю. Г. Лега. Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратовмісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів. Монографія. – К.: Наукова думка, 2012 – 318 с.

3. Кириченко О.В., Діброва О.С., Мотрічук Р.Б., Ващенко В.А., Колінько С.О. Цибулін В.В. Дослідження впливу міцності зарядів піротехнічних нітратно-металевих сумішей на пожежну безпеку виробів на їх основі. Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки. 2019. № 3, С. 56-67. https://doi.org/10.24025/2306-4412.3.2019.176874

4. Belikov, A., Shkoliar, Ie., Motrychuk, R., Tomenko, M. Combustion processes of aluminum powder in pyrotechnic mixtures. Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація», 2024. №8(1), 122-130. http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21888

5. Kyrychenko, O.V., Zemliansky, O.M., Motrychuk, R.B., Shkoliar, Ie.V., Kovbasa V.O. Thermodynamic calculations for determining the temperature of combustion products of pyrotechnic products based on aluminum-magnesium alloy powder. Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація», 2023. №7(1), 191-201. http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21883

6. Кириченко Є., Гвоздь В., Кириченко О., Дядюшенко О. Попередження передчасного спрацьовування піротехнічних виробів на основі сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів в умовах зовнішніх термічних дій. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2022. № 2 (14) С. 35-43. https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.35-43

7. Кириченко Є. П., Ковалишин В. В., Гвоздь В. М., Ващенко В. А., Колінько С. О., Цибулін В. В. Дослідження механізму та розробка моделі розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей металеве пальне + оксид металу при зовнішніх термічних діях.

Вісник Черкаського державного технологічного університету. 2021. № 4. С. 68-82. https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.251602

8. N. Kozyar, O. Kyrychenko, I. Romaniuk, Ya. Ballo, V. Vaschenko, Ie. Shkoliar. Mathematical modelling of the combustion process of particles of two-component metal alloys in the decomposition products of pyrotechnic mixtures. Вісті Донецького гірничого інституту, 2024. №1(54), 50-62. http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21894

9. Н. Козяр, О. Кириченко, В. Ващенко, Є. Школяр, М. Куценко. Закономірності процесу горіння частинок металевого пального у продуктах розкладання піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей. Вісті Донецького гірничого інституту, .2024. №2(55), 92-105 http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/24568

REFERENCES

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

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

3. Kyrychenko, O.V., Dibrova, O.S., Motrychuk, R.B., Vashchenko, V.A., Kolinko, S.O., Tsybulin, V.V.. Investigation of the influence of strength of charges of pyrotechnic nitrate-metal mixtures on fire safety of products on their basis, Bulletin of the Cherkasy State Technological University, 2019. №3, 56-67. https://doi.org/10.24025/2306-4412.3.2019.176874

4. Belikov, A., Shkoliar, Ie., Motrychuk, R., Tomenko, M. Combustion processes of aluminum powder in pyrotechnic mixtures. Collection of scientific works of the Cherkasy Institute of Fire Safety, 2024. №8(1), 122-130. http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21888

5. Kyrychenko, O.V., Zemliansky, O.M., Motrychuk, R.B., Shkoliar, Ie.V., Kovbasa V.O. Thermodynamic calculations for determining the temperature of combustion products of pyrotechnic products based on aluminum-magnesium alloy powder. Collection of scientific works of the Cherkasy Institute of Fire Safety, 2023. №7(1), 191-201. http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21883

6. Kyrychenko, I., Hvozd, V.., Kyrychenko, O., & Diadiushenko, O.. Prevention of previous operation of charges of pyrotechnical products based on mixtures of magnesium, aluminum powder and metal waste in the conditions of external thermal actions, Civil defense and fire safety, 2022. №2(14), 35-43. https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.35-43

7. Kyrychenko, Y.P., Kovalyshyn, V.V., Gvozd, V.M., Vashchenko, V.A., Kolinko, S.O., Tsybulin, V.V.. Study of the mechanism and development of a model of the development of the combustion process of pyrotechnic mixtures of metal fuel + metal oxide under external thermal effects. Bulletin of the Cherkasy State Technological University, 2021. №4, 68-82. https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.251602.

8. N. Kozyar, O. Kyrychenko, I. Romaniuk, Ya. Ballo, V. Vaschenko, Ie. Shkoliar. Mathematical modelling of the combustion process of particles of two-component metal alloys in the decomposition products of pyrotechnic mixtures. Visti Donetskoho hirnychoho instytutu, 2024. № 1(54), 50-62. http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21894

9. N. Kozyar, O. Kyrychenko, V. Vaschenko, Ie. Shkoliar, Kutsenko M. Regularities of the combustion process of metallic fuel particles in the decomposition products of pyrotechnic multicomponent nitrate-metallized mixtures. Visti Donetskoho hirnychoho instytutu, 2024. №2(55), 92-105. http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/24568

Viktoriia KOVBASA[1]
Oksana KYRYCHENKO[1], *doctor of technical sciences, professor*
Mariia KUTSENKO[1], *PhD in economics sciences, dotsent*
Viacheslav VASHCHENKO[2], *doctor of technical sciences, professor*
Andriy BEREZOVSKYI[1], *PhD in technical sciences, dotsent*
Ievgenii SHKOLIAR[1], *PhD in psychological sciences*
Maryna TOMENKO[1], *PhD in pedagogical sciences*
[1]*National University of Civil Defense of Ukraine*
[2] *Cherkasy State Technological University*

CONTROLLED DATABASE ON THE BURNING TIME OF METAL PARTICLES IN THE DECOMPOSITION PRODUCTS OF FLUOROPLAST-BASED METALLIZED PYROTECHNIC MIXTURES

The article explores new patterns in the complex influence of various parameters on the burning time of magnesium, aluminum, and zirconium particles in the decomposition products of fluoroplastic-based metallized pyrotechnic mixtures. Experimentally-statistical models have been developed for predicting the influence of technological parameters on the burning time of metal particles, enabling the formation of a database of fire hazard properties under external thermal effects. Under forced external heating conditions, pyrotechnic mixtures may ignite, causing accelerated combustion and destruction of products, posing a fire hazard to surrounding objects. Systematizing the obtained data allows for more accurate prediction of the fire hazard properties of pyrotechnic mixtures and the development of effective risk reduction measures.

To address the task, experimental-statistical modeling methods and specialized software were used to calculate the burning times of metal particles in the decomposition products of mixtures, enhancing the accuracy of predicting fire hazard properties under intense external heating conditions. The obtained results provide practical use of models for assessing and reducing fire hazard risks. Additionally, these models will contribute to the development of new, safer pyrotechnic materials and products. This research is an important step in ensuring safety during the transportation, storage, and use of pyrotechnic products in various conditions.

The obtained results ensure the practical application of models for evaluating and reducing fire hazard risks. Additionally, these models will contribute to the development of new, safer pyrotechnic materials and products. This research is an important step in ensuring safety during the transportation, storage, and use of pyrotechnic products under various conditions. These results also provide an opportunity to optimize technological production processes and improve resource efficiency.

The models take into account the influence of key controllable parameters ($d_м$, α, P, and V) on the burning time of metal fuel particles (magnesium, aluminum, zirconium) in the thermal decomposition products of fluoroplastic-based metallized pyrotechnic mixtures. External thermal effects on the surface of the products were also considered in the development of the models.

Key words: *pyrotechnic mixtures, metal fuels, nitrate-containing oxidizers, organic and inorganic substances, ignition and burning processes.*