

УДК 614.841:536.46

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.2.119.132>

Вікторія КОВБАСА¹ (ORCID: 0000-0002-9479-669X),
Оксана КИРИЧЕНКО¹, доктор технічних наук, професор (ORCID: 0000-0002-0240-1807),
Вячеслав ВАЩЕНКО², доктор технічних наук, професор (ORCID: 0000-0003-0722-9353),
Євгеній ШКОЛЯР¹, кандидат психологічних наук (ORCID: 0000-0002-7304-1677),
Марина ТОМЕНКО¹, кандидат педагогічних наук (ORCID: 0000-0002-2354-9106),
Сергій КОЛІНЬКО², кандидат фізико-математичних наук, доцент
(ORCID: 0000-0002-0234-8655),
Андрій ХИЖНЯК¹, доктор філософії (ORCID: 0009-0005-1745-0432),
¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України,
²Черкаський державний технологічний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-СТАТИСТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ОТРИМАННЯ БАЗИ ДАНИХ ПО ШВИДКОСТЯМ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ПРОТЕХНІЧНИХ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ МЕТАЛЕВИХ ПАЛЬНИХ, ФТОРОПЛАСТІВ ТА ДОБАВОК ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН

Встановлено нові закономірності впливу параметрів зовнішніх термічних впливів (підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків) на швидкість розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей з порошків металевих палих (магнію, алюмінію), окиснювачів (фторопластів (Ф-3, Ф-4)) з добавками органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену) для значень технологічних параметрів, що використовуються у піротехнічному виробництві. Вперше розроблено експериментально-статистичні моделі для прогнозування впливу вказаних параметрів на швидкість розвитку процесу горіння сумішей для формування бази даних по пожежонебезпечним властивостям піротехнічних виробів в умовах зовнішніх термовпливів.

Ключові слова: пожежна безпека, піротехнічні суміші, процеси горіння, статистичне моделювання.

Постановка проблеми. В умовах вимушеного зовнішнього нагріву піротехнічних виробів (наприклад, при пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, а також при зовнішньому нагріві виробів при транспортуванні, в умовах термоударних впливів при їх пострілі та польоті тощо) їх заряди з сумішей порошків металевих палих (Mg, Al, Ti, Zr та ін.), окиснювачів (нітратів лужних та лужноземельних металів (NaNO₃, KNO₃, Ba(NO₃)₂, Sr(NO₃)₂ та ін.), оксидів металів (NiO, CuO, SiO, ZnO та ін.), фторопластів (Ф-3, Ф-4 та ін.) тощо) та добавок органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену та ін.) можуть передчасно спалахувати з різким прискоренням процесу їх горіння [1 – 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В результаті відбувається руйнування виробів з утворенням високотемпературних продуктів згорання, які розлітаються у різні боки, будучи пожежонебезпечними для навколишніх об'єктів (споруд, пускових установок з обслуговуючим персоналом тощо), що показано на рисунку 1 [9 – 17]. Тому для прогнозування пожежонебезпечних властивостей піротехнічних виробів у вказаних умовах необхідно, в першу чергу, вміти прогнозувати швидкість розвитку процесу горіння сумішей с умовах зовнішніх термічних впливів для використовуваних у піротехнічному виробництві діапазонах зміни технологічних

параметрів їх зарядів (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення сумішей та ін.).

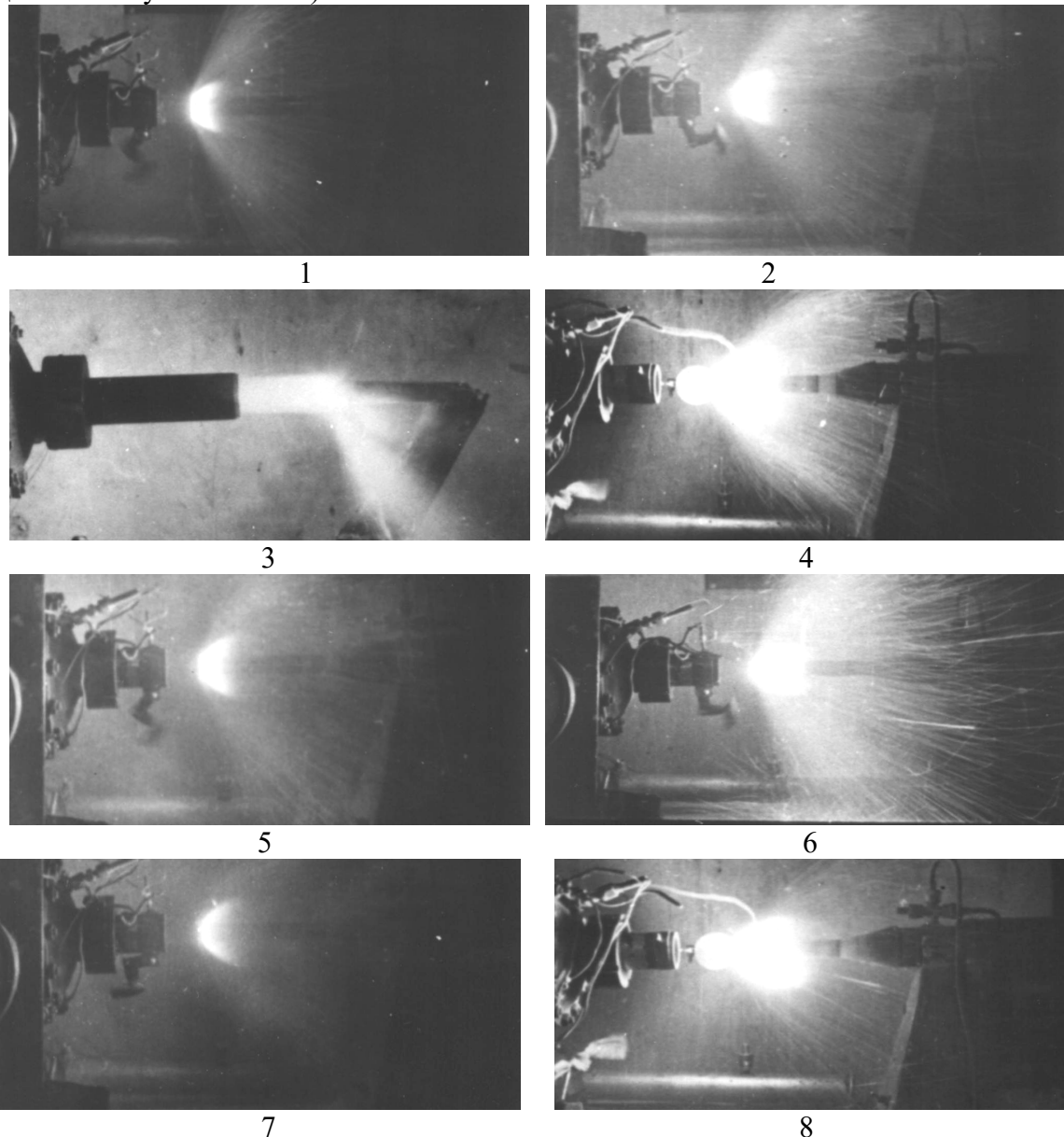


Рисунок 1. Кінокадри зйомки загальної картини передчасного займання зарядів сумішей, що призводить до пожежонебезпечного руйнування піротехнічних виробів в умовах зовнішніх термічних впливів, які отримані на стандартному піротехнічному обладнанні [1, 2]: суміші на основі Mg + Ф-3 з добавками парафіну (1) та нафталіну (2); суміші на основі Mg + Ф-4 з добавками стеарину (3) та антрацену (4); суміші на основі Al + Ф-3 з добавками парафіну (5) та стеарину (6); суміші на основі Al + Ф-4 з добавками нафталіну (7) та антрацену (8)

Нині найбільш докладно досліджено процеси горіння двокомпонентних ущільнених сумішей з порошоків металевих палих (Mg, Al, Ti, Zr, ПАМ та ін.) та кисневмісних окиснювачів (NaNO₃, KNO₃, NiO, CuO, ZnO та ін.) [18 – 24]: встановлено залежності швидкості горіння від коефіцієнту надлишку окиснювача, дисперсності металевого пального та окиснювача, коефіцієнта ущільнення, діаметра заряду та матеріалу оболонки; визначено вплив підвищених температур нагріву та зовнішнього тиску на швидкість горіння; встановлено критичні діапазони зміни технологічних

параметрів, перевищення яких призводить до вибухонебезпечного розвитку процесу горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних впливів. Є також обмежені дослідження впливу добавок органічних речовин (парафіну, нафталіну, тіоколу, каніфолі, уротропіну та ін.) на швидкість горіння вказаних вище піротехнічних двокомпонентних сумішей [1, 2, 25, 26]; встановлено вплив величини органічної добавки на швидкість горіння в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків; визначено переліки органічних добавок, що прискорюють процес горіння сумішей та призводять до вибухонебезпечного розвитку, а також перелік добавок, які зменшують швидкість та стабілізують процес горіння сумішей при різних зовнішніх умовах. Що стосується широко використовуваних піротехнічних сумішей з порошків металевих пальних та фторопластів з добавками органічних речовин, то для них вказані дослідження відступні.

Постановка задачі та її розв'язання. Тому метою даної роботи є проведення експериментальних досліджень з визначення залежностей швидкості горіння піротехнічних сумішей з порошків металевих пальних (Mg, Al), окиснювачів (фторопластів Ф-3, Ф-4) та добавок органічних речовин (парафіну, стерину, нафталіну, антрацену) від підвищених температур нагріву (до 873 К) та зовнішніх тисків (до 10^7 Па) для різних значень технологічних параметрів, а також представлення їх у вигляді керованої бази даних (експериментально-статистичні моделі, зручні для практичного використання).

Виклад основного матеріалу дослідження. Для проведення досліджень використовувались стандартні у піротехніці методи фізико-хімічного аналізу та сучасні статистичні методи експериментально-статистичного моделювання [1, 2, 27, 28]. Для моделювання впливу основних параметрів зовнішніх термічних впливів на металеві корпуси виробів використовувалось стандартне піротехнічне обладнання, що дозволяє вимірювати швидкість та межі горіння сумішей при підвищених температурах нагріву (до 873 К) та зовнішніх тисках (до 10^7 Па) з відносною похибкою 7...9 % [1, 2, 29].

Як зразки сумішей використовувались ущільнені багатокомпонентні суміші з порошків металевих пальних (магнію алюмінію), фторопластів (Ф-3, Ф-4) та добавок органічних речовин (парафіну, стеарину нафталіну, антрацену), які виготовлялись різними методами ущільнюючого формування, головним чином, пресуванням [1, 2]. Розглядалися стехіометричні суміші (коефіцієнт надлишку окиснювача $\alpha = 1,0$; величина добавки органічної речовини $\varepsilon = 0,02...0,2$) з середнім розміром частинок металевих пального d_m ($d_m = 135$ мкм (для порошків Mg) та $d_m = 179$ мкм (для горошків Al)) та окиснювача $d_{ок}$ ($d_{ок} = 50...110$ мкм (для порошків Ф-3) та $d_{ок} = 20...90$ мкм (для порошків Ф-4)). Коефіцієнт ущільнення для зразків складав $K_V = 0,95...0,96$, тобто зразки сумішей, які використовувались, мали гранично допустимі значення K_V та були фактично газонепроникними. Для дослідження впливу температури нагріву та зовнішнього тиску на швидкість та межі горіння сумішей порошки компонентів запресувались у металеві корпуси діаметром $2 \cdot 10^{-2}$ м та товщиною оболонки $2,5 \cdot 10^{-3}$ м. Для забезпечення стійких режимів горіння зразків сумішей висота запресувань у вказаному діаметрі складала $3...4 \cdot 10^{-2}$ м.

Для практичного використання отриманих результатів по горінню розглядуваних сумішей необхідно на їх основі створити базу даних, зручну для оцінок пожежонебезпечних властивостей піротехнічних виробів на основі потрійних сумішей металеві пальні (Mg, Al) + окиснювач (Ф-3, Ф-4) + органічна речовина (парафін, стерин, нафталін, антрацен) при їх застосуванні в умовах зовнішніх термічних впливів (підвищені температури нагріву та зовнішні тиски). Для отримання такої бази даних необхідно систематизувати отримані дані по горінню розглядуваних сумішей у вигляді нескладаних експериментально-статистичних моделей, зручних для практичних оцінок.

Нижче наводяться експериментально-статистичні моделі, отримані на основі встановлених експериментальних даних по швидкостям горіння сумішей при підвищених температурах нагріву T_0 (до 873 К) та зовнішніх тисках P (до 10^7 Па) за допомогою відомих методів регресії та кореляції [27, 28]. За допомогою стандартного програмного забезпечення у вигляді пакетів прикладних програм [1, 2] по отриманим моделям в режимах діалогу та реального часу можна розраховувати рівні швидкості горіння розглядуваних сумішей, які характеризують їх здатність до спалахування та згасання при підвищених температурах нагріву та зовнішніх тисках.

Моделі для розрахунку впливу органічних добавок на залежності швидкості горіння сумішей від температури нагріву мають наступний вигляд:

$$u(\varepsilon, T_0) = u_0(\varepsilon) \cdot T_0^{\gamma_0(\varepsilon)}, \quad (1)$$

де $u_0(\varepsilon)$, $\gamma_0(\varepsilon)$ – емпіричні константи, які за допомогою відомих програмних засобів [1, 2] були отримані у вигляді поліноміальних багаточленів. Остаточні експериментально-статистичні моделі для прогнозування впливу величини ε на залежності $u(T_0)$ представлені у табл. 1 – 4. Порівняння результатів розрахунків по моделям (1) з отриманим масивом експериментальних даних показує, що відмінності між ними не перевищують 5...7 %.

Моделі для розрахунку впливу органічних добавок на залежності швидкості горіння сумішей від зовнішнього тиску мають наступний вигляд:

$$u(\varepsilon, P) = u_1(\varepsilon) \cdot T_0^{\gamma_1(\varepsilon)}, \quad (2)$$

де $u_1(\varepsilon)$, $\gamma_1(\varepsilon)$ – емпіричні параметри. Вказані $u_1(\varepsilon)$ та $\gamma_1(\varepsilon)$ за допомогою програмного забезпечення [1, 2] були отримані у вигляді простих поліноміальних багаточленів. Для прогнозування впливу органічних добавок на залежності $u(P)$ були розроблені експериментально-статистичні моделі, які представлені у табл. 5 – 8. Порівняння результатів розрахунків по моделям (2) з отриманими експериментальними даними показує, що відмінності між ними не перевищують 4...6 %.

Суміші Mg +Ф-3, Ф-4 + органічна добавка. З результатів експериментальних досліджень, представлених у табл. 1 – 4 випливає, що збільшення T_0 від 293 К до 873 К для стехіометричних сумішей ($\alpha = 1,0$) призводить до зростання швидкості горіння у 1,8...1,9 разу (для сумішей на основі Mg +Ф-3) та у 1,9...2 рази (для сумішей на основі Mg +Ф-4). При цьому із зростанням T_0 залежність $u(T_0)$ у обох випадках підсилюється у 1,3...1,5 разу. Збільшення зовнішнього тиску призводить до значного зростання швидкості горіння та посилення залежності $u(T_0)$: зміна P від 10^5 Па до 10^7 Па призводить до збільшення швидкості горіння у 2,8...3,2 разу (для сумішей на основі Mg +Ф-3) та у 2,9...3,3 разу (для сумішей на основі Mg +Ф-4) та посилення залежності $u(T_0)$ у 1,5...1,6 разу. Введення у суміш добавок органічних речовин у кількості до $\varepsilon = 0,20$ (для парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену) призводить до значного зменшення швидкості горіння та послаблення залежності $u(T_0)$: у 3,2...3,3 разу для добавок антрацену, у 2,1...2,2 разу для добавок стеарину, у 1,4...1,5 разу для добавок нафталіну та у 1,2...1,3 разу для добавок парафіну, а також послаблення залежності $u(T_0)$ у 1,3...1,4 разу для усіх розглядуваних добавок та окиснювачів.

Таблиця 1. Значення температури виробів (T_w , К) залежно від швидкості обдуву повітряним потоком (V , м/с) та режиму обтікання (за даними продувок тіл різної геометричної форми в аеродинамічних трубах [1,2])

Суміш	P , Па	Експериментально-статистичні моделі
Mg + Ф-3 + парафін	10^5	$u=(3,1 \cdot 10^{-4}-1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon+6,27 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{65+1,78 \cdot \varepsilon-9,1 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,65-23,7 \cdot \varepsilon+0,43 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,13+1,84 \cdot \varepsilon-31,2 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф-3 + стеарин	10^5	$u=(2,7 \cdot 10^{-4}-3,7 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon+1,2 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,91+12,3 \cdot \varepsilon-3,4 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,71+3,19 \cdot \varepsilon-1,32 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,15+1,73 \cdot \varepsilon-3,4 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф-3 + нафталін	10^5	$u=(3,24 \cdot 10^{-5}+7,1 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon-3,4 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,94+1,83 \cdot \varepsilon-53,1 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,82-23,5 \cdot \varepsilon+41,3 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,15+1,2 \cdot \varepsilon-2,5 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф-3 + антрацен	10^5	$u=(3,4 \cdot 10^{-5}-2,5 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon+0,27 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,87+1,71 \cdot \varepsilon-21,5 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,69-21,7 \cdot \varepsilon+45,4 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,17-0,31 \cdot \varepsilon-2,4 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon^2}$

Таблиця 2. Вплив добавок органічних речовин на залежності швидкості горіння сумішей Mg + Ф-4 від температури нагріву

Суміш	P , Па	Експериментально-статистичні моделі
Mg + Ф-3 + парафін	10^5	$u=(1,1 \cdot 10^{-5}-5,3 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon+0,12 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,32+5 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-38,2 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,23-61,2 \cdot \varepsilon+0,17 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{3 \cdot 10^{-2}+0,52 \cdot \varepsilon-85,2 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф-3 + стеарин	10^5	$u=(1,2 \cdot 10^{-5}-9,6 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon+3 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,35+4,3 \cdot \varepsilon-3,14 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,29+1,41 \cdot \varepsilon-3,54 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{5 \cdot 10^{-2}+4 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-9,3 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф-3 + нафталін	10^5	$u=(1,45 \cdot 10^{-5}+3 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon-7,2 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,35+2,94 \cdot \varepsilon-11,2 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,31-47,3 \cdot \varepsilon+68,1 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{5 \cdot 10^{-2}+0,19 \cdot \varepsilon-1,12 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф-3 + антрацен	10^5	$u=(1,5 \cdot 10^{-5}-5,1 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon+0,23 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,37+0,75 \cdot \varepsilon-47,2 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,23-58,3 \cdot \varepsilon+21,7 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{6 \cdot 10^{-2}-0,85 \cdot \varepsilon+1,2 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon^2}$

Таблиця 3. Вплив добавок органічних речовин на залежності швидкості горіння сумішей Mg + Ф-3 від зовнішнього тиску

Суміш	T_0 , К	Експериментально-статистичні моделі
Mg + Ф-3 + парафін	293	$u=(0,39-0,51 \cdot \varepsilon^{0,31}) \cdot P^{0,18-0,30 \cdot \varepsilon+3,5 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(1,45-4,51 \cdot \varepsilon^{0,34}) \cdot P^{6 \cdot 10^{-2}+0,32 \cdot \varepsilon+9,4 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф-3 + стеарин	293	$u=(0,43-1,82 \cdot \varepsilon^{0,31}) \cdot P^{0,15+0,6 \cdot \varepsilon-32,0 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(1,41-6,58 \cdot \varepsilon^{6 \cdot 10^{-2}}) \cdot P^{5 \cdot 10^{-2}+1,21 \cdot \varepsilon-41,4 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф-3 + нафталін	293	$u=(0,42-2,35 \cdot \varepsilon^{0,71}) \cdot P^{0,17-1,12 \cdot \varepsilon+1,5 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(1,45-6,12 \cdot \varepsilon^{1,3}) \cdot P^{7 \cdot 10^{-2}-1,5 \cdot \varepsilon+4,3 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф-3 + антрацен	293	$u=(0,42-1,43 \cdot \varepsilon^{0,41}) \cdot P^{0,15-3,2 \cdot \varepsilon+1,45 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(1,41-4,95 \cdot \varepsilon^{0,40}) \cdot P^{5 \cdot 10^{-2}+0,41 \cdot \varepsilon-12,5 \cdot \varepsilon^2}$

Таблиця 4. Вплив добавок органічних речовин на залежності швидкості горіння сумішей Mg + Ф-4 від зовнішнього тиску

Суміш	T_0 , К	Експериментально-статистичні моделі
Mg + Ф-3 + парафін	293	$u=(0,18-1,25 \cdot \varepsilon^{1,12}) \cdot P^{5 \cdot 10^{-2}-0,90 \cdot \varepsilon+1,4 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(0,62-1,10 \cdot \varepsilon^{1,13}) \cdot P^{3 \cdot 10^{-2}+0,12 \cdot \varepsilon-5,40 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф-3 + стеарин	293	$u=(0,19-3,75 \cdot \varepsilon^{0,70}) \cdot P^{6 \cdot 10^{-2}+0,2 \cdot \varepsilon-74,5 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(0,60-14,3 \cdot \varepsilon^{0,51}) \cdot P^{2 \cdot 10^{-2}+0,57 \cdot \varepsilon-85,6 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф-3 + нафталін	293	$u=(0,17-5,46 \cdot \varepsilon^{4,38}) \cdot P^{7 \cdot 10^{-2}-2,3 \cdot \varepsilon+8,7 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(0,68-13,05 \cdot \varepsilon^{5 \cdot 10^{-2}}) \cdot P^{3 \cdot 10^{-2}-3,72 \cdot \varepsilon+2,53 \cdot \varepsilon^2}$
Mg + Ф-3 + антрацен	293	$u=(0,19-3,43 \cdot \varepsilon^{0,93}) \cdot P^{8 \cdot 10^{-2}-8,10 \cdot \varepsilon+0,17 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(0,63-6,82 \cdot \varepsilon^{0,83}) \cdot P^{2,5 \cdot 10^{-2}+0,18 \cdot \varepsilon-26,81 \cdot \varepsilon^2}$

Таблиця 5. Вплив добавок органічних речовин на залежності швидкості горіння сумішей Al + Ф-3 від температури нагріву

Суміш	P , Па	Експериментально-статистичні моделі
Al + Ф-3 + парафін	10^5	$u=(5,2 \cdot 10^{-5}-7,2 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon+4,5 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{10,83+0,31 \cdot \varepsilon-54,6 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,11-1,42 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon+7,2 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{2,1 \cdot 10^{-2}+0,31 \cdot \varepsilon-31,2 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф-3 + стеарин	10^5	$u=(2,3 \cdot 10^{-2}-22,3 \cdot \varepsilon+2,1 \cdot 10^3 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,15+2,07 \cdot \varepsilon-20,4 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,12+0,53 \cdot \varepsilon-7,89 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{2,5 \cdot 10^{-2}+0,29 \cdot \varepsilon-20,7 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф-3 + нафталін	10^5	$u=(5,4 \cdot 10^{-6}+1,2 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon-0,21 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,15+0,31 \cdot \varepsilon-3,19 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,14-1,43 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon+6,9 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{2,5 \cdot 10^{-2}+0,21 \cdot \varepsilon-15,4 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф-3 + антрацен	10^5	$u=(5,7 \cdot 10^{-6}-1,57 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon+4,5 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{0,15+0,29 \cdot \varepsilon-1,29 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(0,16-1,32 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon+7,57 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{2,8 \cdot 10^{-2}-1,86 \cdot \varepsilon+4,3 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon^2}$

Таблиця 6. Вплив добавок органічних речовин на залежності швидкості горіння сумішей Al + Ф-4 від температури нагріву

Суміш	P , Па	Експериментально-статистичні моделі
Al + Ф-4 + парафін	10^5	$u=(1,7 \cdot 10^{-6}-3,71 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon+1,7 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{4,5 \cdot 10^{-2}+7,1 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon-2,67 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(3,3 \cdot 10^{-2}-4,5 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon+2,4 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{4,3 \cdot 10^{-3}+7,4 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-5,95 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф-4 + стеарин	10^5	$u=(1,7 \cdot 10^{-6}-6,72 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon+4,29 \cdot 10^{-4} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{5 \cdot 10^{-2}+0,61 \cdot \varepsilon-21,9 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(4,1 \cdot 10^{-2}+0,21 \cdot \varepsilon-2,48 \cdot 10^3 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{7,1 \cdot 10^{-3}+5,7 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon-65,2 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф-4 + нафталін	10^5	$u=(2,1 \cdot 10^{-6}+4,3 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon-0,53 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{6 \cdot 10^{-2}+0,42 \cdot \varepsilon+1,7 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(4,4 \cdot 10^{-2}-33,1 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon+9,7 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{7,1 \cdot 10^{-3}+2,7 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-7,8 \cdot \varepsilon^2}$
Al + Ф-4 + антрацен	10^5	$u=(2,1 \cdot 10^{-5}-3,6 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon+3,2 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{5,3 \cdot 10^{-2}+0,11 \cdot \varepsilon-3,3 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2}$
	10^7	$u=(3,2 \cdot 10^{-2}-4,1 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon+3,1 \cdot \varepsilon^2) \cdot T_0^{8,6 \cdot 10^{-3}-5,9 \cdot \varepsilon+1,7 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon^2}$

Таблиця 7. Вплив добавок органічних речовин на залежності швидкості горіння сумішей АІ + Ф-3 від зовнішнього тиску

Суміш	T_0 , К	Експериментально-статистичні моделі
АІ + Ф-3 + парафін	293	$u=(6,5 \cdot 10^{-2}-30,6 \cdot \varepsilon^{1,86}) \cdot P^{3 \cdot 10^{-2}-1,8 \cdot \varepsilon+5,8 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(0,24-27,1 \cdot \varepsilon^{2,1}) \cdot P^{10^{-2}+5 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-56,4 \cdot \varepsilon^2}$
АІ + Ф-3 + стеарин	293	$u=(7,1 \cdot 10^{-2}-10,9 \cdot \varepsilon^{1,91}) \cdot P^{2,5 \cdot 10^{-2}+0,12 \cdot \varepsilon-1,92 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(0,24-39,5 \cdot \varepsilon^{3,6 \cdot 10^{-2}}) \cdot P^{8,3 \cdot 10^{-3}+0,21 \cdot \varepsilon-2,48 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2}$
АІ + Ф-3 + нафталін	293	$u=(7 \cdot 10^{-2}-14,1 \cdot \varepsilon^{4,26}) \cdot P^{2,8 \cdot 10^{-2}-6,72 \cdot \varepsilon+6,25 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(0,24-36,72 \cdot \varepsilon^{7,81}) \cdot P^{1,2 \cdot 10^{-2}-9,2 \cdot \varepsilon+0,72 \cdot \varepsilon^2}$
АІ + Ф-3 + антрацен	293	$u=(7 \cdot 10^{-2}-8,58 \cdot \varepsilon^{2,46}) \cdot P^{2,5 \cdot 10^{-2}-19,2 \cdot \varepsilon+0,24 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(0,25-29,7 \cdot \varepsilon^{2,43}) \cdot P^{8,3 \cdot 10^{-3}+6,8 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-7,52 \cdot \varepsilon^2}$

Таблиця 8. Вплив добавок органічних речовин на залежності швидкості горіння сумішей АІ + Ф-4 від зовнішнього тиску

Суміш	T_0 , К	Експериментально-статистичні моделі
АІ + Ф-4 + парафін	293	$u=(2,6 \cdot 10^{-2}-8,75 \cdot \varepsilon^{7,84}) \cdot P^{7,1 \cdot 10^{-3}-6,3 \cdot \varepsilon+2,1 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(8,9 \cdot 10^{-2}-7,7 \cdot \varepsilon^{7,91}) \cdot P^{4,3 \cdot 10^{-3}+1,7 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-3,8 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2}$
АІ + Ф-4 + стеарин	293	$u=(2,7 \cdot 10^{-2}-26,3 \cdot \varepsilon^{4,93}) \cdot P^{8,6 \cdot 10^{-3}+2,9 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-52,3 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(8,6 \cdot 10^{-2}-10^2 \cdot \varepsilon^{3,52}) \cdot P^{2,9 \cdot 10^{-3}+8,1 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon-2,8 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2}$
АІ + Ф-4 + нафталін	293	$u=(2,4 \cdot 10^{-2}-38,2 \cdot \varepsilon^{30,71}) \cdot P^{10^{-2}-16,1 \cdot \varepsilon+1,2 \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(9,7 \cdot 10^{-2}-91,4 \cdot \varepsilon^{5,9 \cdot 10^{-2}}) \cdot P^{4,3 \cdot 10^{-3}-27,4 \cdot \varepsilon+0,36 \cdot \varepsilon^2}$
АІ + Ф-4 + антрацен	293	$u=(2,7 \cdot 10^{-2}-24,1 \cdot \varepsilon^{6,54}) \cdot P^{1,2 \cdot 10^{-3}-56,7 \cdot \varepsilon+2,4 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon^2}$
	873	$u=(9,2 \cdot 10^{-2}-47,7 \cdot \varepsilon^{5,83}) \cdot P^{3,6 \cdot 10^{-3}+2,6 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon+1,87 \cdot 10^2 \cdot \varepsilon^2}$

Суміші АІ +Ф-3,Ф-4 + органічна добавка. З результатів експериментальних досліджень, представлених у табл. 5 – 8 випливає, що при збільшенні T_0 від 293 К до 873 К швидкість горіння стехіометричних сумішей зростає у 1,6...2,8 разу (для сумішей на основі АІ +Ф-3) та у 1,7...2,9 разу (для сумішей на основі АІ +Ф-4). Зростання T_0 призводить до підсилення залежності $u(T_0)$ у 1,2...1,4 разу. Збільшення зовнішнього тиску призводить до меншого зростання швидкості горіння та підсилення залежності $u(T_0)$: зростання P від 10^5 Па до 10^7 Па призводить до збільшення швидкості горіння у 1,6...1,8 разу (для сумішей на основі АІ +Ф-3) та у 1,7...1,9 разу (для сумішей на основі АІ +Ф-4) та підсилення залежності $u(T_0)$ у 1,2...1,3 разу.

Введення у суміш добавок органічних речовин у кількості $\varepsilon = 0,02...0,2$ призводить до зменшення швидкості горіння та послаблення залежності $u(T_0)$: у 2,8...2,9 разу для добавок антрацену, у 1,6...1,7 разу для добавок стеарину, у 1,2...1,3 разу для добавок нафталіну та у 1,1...1,2 разу для добавок парафіну, а також послаблення залежності $u(T_0)$ у 1,2...1,3 разу.

Таким чином, за ступенем зменшення швидкості та стабілізації процесу горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій (підвищені температури нагріву та зовнішні

тиски) добавки органічних речовин можна розташувати у наступний рад: антрацен > стеарин > нафталін > парафін.

На практиці отримані результати можуть бути покладені в основу загальної бази даних по пожежонебезпечним властивостям піротехнічних виробів на основі сумішей з порошків металевих палих, фторопластів та добавок органічних речовин, за допомогою якої можна на стадії виготовлення зарядів сумішей оперативно у режимі діалогу та реального часу на ПК, регулюючи співвідношення та природу компонентів у суміші, роботи їх менш чутливими до можливих зовнішніх термічних впливів при зберіганні, транспортуванні та застосуванні виробів.

Перспективи подальших досліджень. В подальшому планується проведення досліджень з визначення механізму та розробки математичних моделей процесу горіння ущільнених сумішей з порошків металевих палих, фторопластів та добавок органічних речовин в умовах зовнішніх термічних дій для визначення критичних діапазонів зміни швидкості розвитку процесу їх горіння у вказаних умовах при використуванних у піротехнічному виробництві діапазонах зміни технологічних параметрів зарядів сумішей (коефіцієнта надлишку окиснювача, величини органічної добавки, дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення суміші та ін.) з врахуванням впливу зовнішніх чинників (підвищені температури нагріву, зовнішні тиски та ін.).

Висновки. В результаті проведених експериментальних досліджень впливу основних параметрів зовнішніх термодій (підвищених температур нагріву T_0 (до 873 К) та зовнішніх тисків P (до 10^7 Па) для використуванних на практиці значень технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача α , відносного вмісту добавки органічних речовин ε , дисперсності металевого пального d_m (мкм) та окиснювача $d_{ок}$ (мкм), коефіцієнта ущільнення суміші K_V) на швидкість та режими горіння сумішей встановлено наступні нові закономірності:

для трикомпонентних сумішей Mg + Ф-3 + органічна добавка та Mg + Ф-4 + органічна добавка

– збільшення T_0 від 293 К до 873 К для стехіометричних сумішей ($\alpha = 0$) з $d_m = 135$ мкм, $d_{ок} = 50...110$ мкм (для порошків Ф-3) та 20...90 мкм (для порошків Ф-4), а також $K_V = 0,95...0,96$ призводить до збільшення швидкості горіння у 1,8...1,9 разу (для сумішей на основі Mg + Ф-3) та у 1,0...2 рази (для сумішей на основі Mg + Ф-4); залежність $u(T_0)$ підсилюється у 1,3...1,5 разу;

– зростання P від 10^5 Па до 10^7 Па призводить до збільшення швидкості горіння у 2,8...3,2 разу (для сумішей на основі Mg + Ф-3) та у 2,9...3,3 разу (для сумішей на основі Mg + Ф-4) та підсилення залежності $u(T_0)$ у 1,5...1,6 разу;

– збільшення ε від 0,02 до 0,2 призводить до зменшення швидкості горіння у 3,2...3,3 разу для добавок антрацену, у 2,1...2,2 разу для добавок стеарину, у 1,4...1,5 разу для добавок нафталіну та у 1,2...1,3 разу для добавок парафіну, а також послаблення залежності $u(T_0)$ у 1,3...1,4 разу;

для трикомпонентних сумішей Al + Ф-3 + органічна добавка та Al + Ф-4 + органічна добавка

– зростання T_0 від 293 К до 873 К для стехіометричних сумішей ($\alpha = 0$) з $d_m = 179$ мкм, $d_{ок} = 50...110$ мкм (для порошків Ф-3) та 20...90 мкм (для порошків Ф-4), а також $K_V = 0,95...0,96$ призводить до зростання швидкості горіння у 1,6...1,8 разу (для сумішей на основі Al + Ф-3) та у 1,7...2,9 разу (для сумішей на основі Al + Ф-4); при цьому залежність $u(T_0)$ підсилюється у 1,2... 1,4 разу;

– збільшення P від 10^5 Па до 10^7 Па призводить до зростання швидкості горіння у 1,6...1,8 разу (для сумішей на основі Al + Ф-3) та у 1,7...1,9 разу (для сумішей на основі Al + Ф-4) та підсилення залежності $u(T_0)$ у 1,2...1,3 разу;

– зростання ε до 0,2 призводить до зменшення швидкості горіння у 2,8...2,9 разу для добавок антрацену, у 1,6...1,7 разу для добавок стеарину, у 1,2...1,3 разу для добавок нафталіну та у 1,1...1,2 разу для добавок парафіну, а також послаблення залежності $u(T_0)$ у 1,3...1,4 разу.

Розроблено нові експериментально-статистичні моделі для формування бази розрахункових даних (відносна похибка 4...7 %) по впливу основних керованих технологічних параметрів (α , ε , d_m , $d_{ок}$, K_v) на швидкість розвитку процесу горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних впливів (підвищені температури нагріву), що дозволяють на стадії виготовлення піротехнічних виробів шляхом регулювання технологічних параметрів підвищувати їх пожежну безпеку в умовах зберігання, транспортування та застосування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ващенко В. А. Процеси горіння металізованих конденсованих систем / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. І. Заика, І. В. Яценко, В. В. Цыбулин. – 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 ІЧ-техніки / А. В. Молодик, М. І. Носов, Г. А. Смоляр, Д. В. Лозбін // 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. Баланюк В. М. Застосування газоаерозольно-порошкових вогнегасних сумішей для захисту від запалювальних сумішей / В. М. Баланюк, Н. М. Козяр, О. І. Гарасим’юк // Science Rise, 2016. – № 2 (22). – С. 11 – 14.
5. Фатєєв В. М. Піротехніка / В. М. Фатєєв, Ю. П. Приходько, Л. І. Таборов, // К.: Наукова думка, 2017.
6. Kurychenko O. V. Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels / O. V. Kurychenko, 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.
7. 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.
8. V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, V. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, O. L. Mirus “Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D / V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, V. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, O. L. Mirus // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, , 2018. – No. 5 (95). – P. 68 – 76.
9. Звіт про науково-дослідну роботу “Дослідження тенденцій і закономірностей динаміки основних показників статистики пожеж в Україні за територіальним принципом”. К.: УкрНДІЦЗ, 2018.
10. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. Чинний від 01.01.2020. К.: ДП УкрНДНЦ, 2019.
11. ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. Чинний від 01.01.2020. К.: ДП УкрНДНЦ, 2019.

12. 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.

13. 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.

14. Кириченко Є. П. Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах пострілу та польоту / Є. П. Кириченко // Пожежна безпека: теорія і практика. Збірник наукових праць ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2021. – Т. 5. – № 2. – С. 87 – 102.

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. 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.

17. 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.

18. 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 // 36. «Праці Одеського національного політехнічного університету», 2010. – вип. 2(6). – С. 191 – 196.

19. Кириченко О. В. Створення бази даних по швидкостям та вибухонебезпечним режимам горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей / О. В. Кириченко // Вісник ЧДТУ, 2012. – № 3. – С. 88 – 90.

20. Кириченко О. В. Вплив підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків на швидкість та межі горіння піротехнічних нітратно-цирконієвих сумішей / О. В. Кириченко // Науковий вісник УкрНДІПБ, 2012. – № 2(26). – С. 104 – 110.

21. Кириченко О. В. Вплив температури нагріву на швидкість та вибухонебезпечні режими горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей / О. В. Кириченко, Г. В. Налева // 36. «Праці Одеського національного політехнічного університету», 2012. – Вип. 2(39). – С. 143 – 147.

22. Кириченко О. В. 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. – Харків: НУЦЗУ, 2013. – № 34. – С. 73 – 95.

23. 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.

24. Кириченко Є. Дослідження процесів займання та розвитку горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів при підвищених температурах нагріву та зовнішніх тисках / Є. Кириченко //

Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України “Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація”, 2022. – Том 6. – № 1. – С. 29 – 42.

25. Кириченко О. В. Вибухонебезпечні режими горіння потрійних піротехнічних нітратовмісних систем в умовах зустрічного обдуву потоком повітря та обертання / О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, П. І. Заїка, В. В. Цибулін // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2010. – № 2. – С. 152 – 158.

26. Кириченко О. В. Вплив органічних домішок на вибухонебезпечні режими горіння ПНМС в умовах підвищених температур нагріву і зовнішніх тисків / О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, П. І. Заїка, А. М. Омельченко, В. М. Тупицький // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2010. – № 3. – С. 118 – 125.

27. Pouretedal, H. R., and S. L. Mousavi. 2018. Study of the ratio of fuel to oxidant on the kinetic of ignition reaction of Mg/Ba(NO₃)(2) and Mg/Sr(NO₃)(2) pyrotechnics by non-isothermal TG/DSC technique. J Therm Anal Calorim 132 (2):1307–15. doi:10.1007/s10973-018-7028-y.

28. Pouretedal, H. R., and M. Ravanbod. 2015. Kinetic study of ignition of Mg/NaNO₃ pyrotechnic using non-isothermal TG/DSC technique. J Therm Anal Calorim 119 (3):2281–88. doi:10.1007/s10973-014-4330-1.

29. Woodley, C., R. Claridge, N. Johnson, and A. Jones. 2017. Ignition and combustion of pyrotechnics at low pressures and at temperature extremes. Defence Technology 3 (3): 119–126. doi:10.1016/j.dt.2017.03.004.

REFERENCES

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

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

3. Molodykk A. V. Dosvid ta perspektyvy vyrishennia teplofizychnykh problem stvorennia optyko-elektronnykh spetsvyrobiv ICh-tekhniky / A. V. Molodyk, M. I. Nosov, H. A. Smoliar, D. V. Lozbin // 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. Balaniuk V. M. Zastosuvannia hazoerazolno-poroshkovykh vohnehasnykh sumishei dlia zakhystu vid zapaliuvalnykh sumishei / V. M. Balaniuk, N. M. Koziar, O. I. Harasymiuk // Science Rise, 2016. – № 2 (22). – S. 11 – 14.

5. Fatieiev V. M. Pirotekhnika / V. M. Fatieiev, Yu. P. Prykhodko, L. I. Taborov, // K.: Naukova dumka, 2017.

6. 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). – R. 81 – 85.

7. 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.

8. V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, O. L. Mirus “Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D / V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar,

V. V. Chemetskiy, O. L. Mirus // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, , 2018. – No. 5 (95). – P. 68 – 76.

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

10. DSTU 8828:2019. Pozhezhna bezpeka. Zahalni polozhennia. Chynnyi vid 01.01.2020. K.: DP UkrNDNTs, 2019.

11. DSTU 8829:2019. Pozhezhovybukhonebezpechnist rehovyn i materialiv. Nomenklatura pokaznykiv i metody yikhnoho vyznachennia. Klasyfikatsiia. Chynnyi vid 01.01.2020. K.: DP UkrNDNTs, 2019.

12. Kyrychenko O. V. Vyznachennia krytychnykh rezhymiv rozvytku protsesiv horinnia pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishei v umovakh zovnishnykh 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 derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu, 2020. – № 2. – S. 123 – 133.

13. Dibrova O. S. Pidvyshchennia pozhezhnoi bezpeky pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishei v umovakh zovnishnykh 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.

14. Kyrychenko Ye. P. Doslidzhennia protsesiv zovnishnykh termoudarnykh dii na pirotekhnichni metalooksydni vyroby v umovakh postrilu ta polotu / Ye. P. Kyrychenko // Pozhezhna bezpeka: teoriia i praktyka. Zbirnyk naukovykh prats ChIPB im. Heroiv Chornobylia, 2021. – T. 5. – № 2. – S. 87 – 102.

15. Kyrychenko Ye. P. Doslidzhennia protsesiv zovnishnykh termoudarnykh dii na pirotekhnichni metalooksydni vyroby v umovakh postrilu ta polotu / Ye. P. Kyrychenko // Zbirnyk naukovykh prats Cherkaskoho instytutu pozhezhnoi bezpeky im. Heroiv Chornobylia Natsionalnoho universytetu tsyvilnoho zakhystu Ukrainy “Nadzvychni sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia”, 2021. – tom 5. – № 2. – S. 37 – 51.

16. 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.

17. Kyrychenko Ye. P. Metodyka vyznachennia krytychnykh znachen parametriv zovnishnykh termichnykh dii na pirotekhnichni metalooksydni vyroby v umovakh ekspluatatsii / Ye. P. Kyrychenko // Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu, 2022. – № 2. – S. 53 – 63.

18. Kyrychenko O. V. Doslidzhennia vplyvu temperatury nahrivu ta zovnishnoho tysku na zalezhnosti shvydkosti horinnia PNS vid spivvidnoshennia komponentiv ta kontsentratsiini mezhi horinnia / O. V. Kyrychenko // Zb. «Pratsi Odeskoho natsionalnoho politekhnichnoho universytetu», 2010. – vyp. 2(6). – S. 191 – 196.

19. Kyrychenko O. V. Stvorennia bazy danykh po shvydkostiam ta vybukhonebezpechnym rezhymam horinnia pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishei / O. V. Kyrychenko // Visnyk ChDTU, 2012. – № 3. – S. 88 – 90.

20. Kyrychenko O. V. Vplyv pidvyshchennykh temperatur nahrivu ta zovnishnykh tyskv na shvydkist ta mezhi horinnia pirotekhnichnykh nitratno-tyrkoniiievykh sumishei / O. V. Kyrychenko // Naukovi visnyk UkrNDIPB, 2012. – № 2(26). – S. 104 – 110.

21. Kyrychenko O. V. Vplyv temperatury nahrivu na shvydkist ta vybukhonebezpechni rezhymy horinnia pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishei / O. V. Kyrychenko, H. V. Naleva // Zb. «Pratsi Odeskoho natsionalnoho politekhnichnoho universytetu», 2012. – Vyp. 2(39). – S. 143 – 147.

22. Kyrychenko O. V. Shvydkist ta mezhi horinnia pirotekhnichnykh nitratno-mahniievykh sumishei v umovakh zovnishnikh termovplyviv / O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, V. V. Tsybulin, V. M. Tupytskyi // Problemy pozhezhnoi bezpeky. – Kharkiv: NUTsZU, 2013. – № 34. – S. 73 – 95.

23. 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.

24. Kyrychenko Ye. Doslidzhennia protsesiv zaimannia ta rozvytku horinnia dvokomponentnykh pirotekhnichnykh sumishei z poroshkiv mahniuu, aliuminiuu ta oksydiv metaliv pry pidvyshchenykh temperaturakh nahrivu ta zovnishnikh tyskakh / Ye. Kyrychenko // Zbirnyk naukovykh prats Cherkaskoho instytutu pozhezhnoi bezpeky im. Heroiv Chornobylia Natsionalnogo universytetu tsyvilnogo zakhystu Ukrainy “Nadzvychni situatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia”, 2022. – Tom 6. – № 1. – S. 29 – 42.

25. Kyrychenko O. V. Vybukhonebezpechni rezhymy horinnia potriinykh pirotekhnichnykh nitratovmisnykh system v umovakh zustrichnogo obduvu potokom povitria ta obertannia / O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, P. I. Zaika, V. V. Tsybulin // Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu, 2010. – № 2. – S. 152 – 158.

26. Kyrychenko O. V. Vplyv orhanichnykh domishok na vybukhonebezpechni rezhymy horinnia PNMS v umovakh pidvyshchenykh temperatur nahrivu i zovnishnikh tyskiv / O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, P. I. Zaika, A. M. Omelchenko, V. M. Tupytskyi // Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu, 2010. – № 3. – S. 118 – 125.

27. Pouretedal, H. R., and S. L. Mousavi. 2018. Study of the ratio of fuel to oxidant on the kinetic of ignition reaction of Mg/Ba(NO₃)(2) and Mg/Sr(NO₃)(2) pyrotechnics by non-isothermal TG/DSC technique. J Therm Anal Calorim 132 (2):1307–15. doi:10.1007/s10973-018-7028-y.

28. Pouretedal, H. R., and M. Ravanbod. 2015. Kinetic study of ignition of Mg/NaNO₃ pyrotechnic using non-isothermal TG/DSC technique. J Therm Anal Calorim 119 (3):2281–88. doi:10.1007/s10973-014-4330-1.

29. Woodley, C., R. Claridge, N. Johnson, and A. Jones. 2017. Ignition and combustion of pyrotechnics at low pressures and at temperature extremes. Defence Technology 3 (3): 119–126. doi:10.1016/j.dt.2017.03.004.

UDC 614.841:536.46

Viktoriia KOVBASA¹ (ORCID: 0000-0002-9479-669X),

Oksana KYRYCHENKO¹, doctor of technical sciences, professor
(ORCID: 0000-0002-0240-1807),

Viacheslav VASHCHENKO², doctor of technical sciences, professor
(ORCID: 0000-0003-0722-9353),

Yevhenii SHKOLIAR¹, PhD in psychological sciences (ORCID: 0000-0002-7304-1677),

Maryna TOMENKO¹, PhD in pedagogical sciences (ORCID: 0000-0002-2354-9106),

Serhii KOLINKO², PhD in physical and mathematical sciences, docent
(ORCID: 0000-0002-0234-8655),

Andrii KHYZHNIAK¹, doctor of philosophy (ORCID: 0009-0005-1745-0432),

¹ Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of
National University of Civil Protection of Ukraine,

² Cherkasy State Technological University

EXPERIMENTAL AND STATISTICAL MODELS FOR OBTAINING A DATABASE ON DEVELOPMENT SPEEDS OF THE COMBUSTION PROCESS OF PYROTECHNIC MIXTURES BASED ON METAL FUELS, FLUOROPLASTS AND ORGANIC SUBSTANCE ADDITIVES

New regularities of the influence of the parameters of external thermal influences (elevated heating temperatures and external pressures) on the speed of development of the combustion process of pyrotechnic mixtures of metal fuel powders (magnesium, aluminum), oxidizers (fluoroplastics (F-3, F-4)) with additives of organic substances have been established (paraffin, stearin, naphthalene, anthracene) for the values of technological parameters used in pyrotechnic production. For the first time, experimental-statistical models were developed for predicting the influence of the specified parameters on the rate of development of the combustion process of mixtures for the formation of a database on the fire-hazardous properties of pyrotechnic products under conditions of external thermal influences.

In practice, the obtained results can be used as a basis for a general database on the fire-hazardous properties of pyrotechnic products based on mixtures of metal fuel powders, fluoroplastics and organic additives, which can be used at the stage of manufacturing charges of mixtures quickly in dialogue mode and in real time on a PC, by regulating the ratio and nature of the components in the mixture, their work is less sensitive to possible external thermal influences during storage, transportation and application of products.

New experimental and statistical models have been developed for the formation of a database of calculation data (relative error 4...7%) on the influence of the main controlled technological parameters (α , ε , d_m , $d_{ок}$, K_V) on the speed of development of the combustion process of mixtures under conditions of external thermal influences (elevated temperatures heating), which allow at the stage of manufacturing pyrotechnic products by adjusting the technological parameters to suspend their fire safety in the conditions of storage, transportation and use.

Key words: fire safety, pyrotechnic mixtures, combustion processes, statistical modeling.