

УДК 614.841:536.46

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.69.1076

НАУКОВО ОБҐРУНТОВАНІ РОЗРАХУНКОВІ МЕТОДИ ТА БАЗИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ІЗ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ПЕРЕДЧАСНИХ ПОЖЕЖОВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ СПРАЦЬОВУВАНЬ ПІРОТЕХНІЧНИХ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ НІТРАТНО-МЕТАЛІЗОВАНИХ СУМІШЕЙ В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ТЕРМОДІЙ

КОЗЯР Н. М.¹, канд. техн. наук,
КИРИЧЕНКО О. В.², докт. техн. наук, проф.,
РОМАНЮК І. П.³,
ВАЩЕНКО В. А.⁴, докт. техн. наук, проф.,
БАЛО Я. В.⁵, канд. техн. наук, ст. досл.,
ДЯДЮШЕНКО О. О.^{6*}, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел. +38 (067) 944-15-79, e-mail: koziar_nazarii@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0001-9082-0771

² Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел. +38 (093) 225-07-78, e-mail: kyrychenko_oksana@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0002-0240-1807

³ Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел. +38 (067) 563-58-95, e-mail: romaniuk_igor@chipb.org.in, ORCID ID: 0009-0003-7721-9107

⁴ Кафедра фізико-хімічних основ розвитку та гасіння пожеж, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел. +38 (063) 710-43-90, e-mail: vashchenko_viacheslav@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0003-0722-9353

⁵ Відділ нормативно-технічного забезпечення науково-дослідного центру протипожежного захисту, Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, вул. Вишгородська, 21, 02000, Київ, Україна, тел. +38 (093) 165-69-91, e-mail: 2801397@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9044-1293

^{6*} Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел. +38 (093) 407-19-83, e-mail: diadiushenko_oleksandr@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0003-0797-2251

Анотація. Постановка проблеми. Велике практичне значення мають способи попередження виникнення вимушених пожежонебезпечних руйнувань виробів у випадку впливу зовнішніх термічних дій. При цьому вони повинні ґрунтуватись на науково обґрунтованих методах визначення критичних параметрів термічних дій на виробі та технологічних параметрів зарядів сумішей, перевищення яких спричинює передчасні пожежонебезпечні руйнування виробів. Для розроблення таких методів необхідно мати результати теоретичних та експериментальних досліджень процесів нагрівання оболонки зарядів сумішей для різних зовнішніх теплових потоків та часу їх термодії, а також процесів займання та розвитку їх горіння за різних зовнішніх умов. **Мета статті** – формування результатів теоретичних досліджень у вигляді науково обґрунтованих методів, які дозволяють попереджати та контролювати передчасне займання зарядів сумішей, вибухонебезпечний розвиток процесу їх горіння та пожежонебезпечне руйнування виробів в умовах зовнішніх термічних дій, а також зведення результатів експериментальних досліджень у єдину базу даних із визначення впливу технологічних параметрів сумішей на характеристики процесів їх займання та розвитку горіння, використання якої дозволяє знижувати кількість пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків **Висновок.** Розроблено науково обґрунтовані методи визначення критичних параметрів зовнішніх термічних дій для кількісної оцінки рівня пожежної безпеки піротехнічних виробів на основі багатоконпонентних нітратно-металізованих сумішей. Створено науково-технічну базу експериментальних даних із визначення закономірностей впливу широкого класу технологічних параметрів сумішей на основні характеристики процесів займання та розвитку горіння сумішей (температуру займання, час індукції, швидкість розвитку горіння) в умовах зовнішніх термічних дій (підвищених температур нагріву, зовнішніх тисків та ін.), що дозволяє визначати ймовірність виникнення пожеж на об'єктах, де зберігаються виробі.

Ключові слова: *пожежна безпека; піротехнічні вироби на основі багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей; процеси займання та розвитку горіння*

SCIENTIFICALLY BASED CALCULATION METHODS AND EXPERIMENTAL DATA BASES FOR THE PREVENTION OF PREMIUM FIRE EXPLOSIONS AND UNSAFE EXPLOSIONS OF PYROTECHNIC MULTICOMPONENT NITRATE-METALLIZED MIXTURES UNDER EXTERNAL THERMAL

KOZIAR N.M.¹, *Cand. Sc. (Tech.)*,
KYRYCHENKO O.V.², *Dr. Sc. (Tech.)*, *Prof.*,
ROMANIUK I.P.³,
VASHCHENKO V.A.⁴, *Dr. Sc. (Tech.)*, *Prof.*,
BALO Ya.V.⁵, *Cand. Sc. (Tech.)*, *Sen. Res.*,
DIADIUSHENKO O.O.^{6*}, *Cand. Sc. (Tech.)*, *Assoc. Prof.*

¹ Department of Fire Prevention Work, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka St., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel. +38 (067) 944-15-79, e-mail: koziar_nazarii@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0001-9082-0771

² Department of Fire Prevention Work, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka St., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel. +38 (093) 225-07-78, e-mail: kyrychenko_oksana@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0002-0240-1807

³ Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka St., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel. +38 (067) 563-58-95, e-mail: romaniuk_ihor@chipb.org.in, ORCID ID: 0009-0003-7721-9107

⁴ Department of Physico-Chemical Foundations of Fire Development and Extinguishing, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka St., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel. +38 (063) 710-43-90, e-mail: vashchenko_viacheslav@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0003-0722-9353

⁵ Department of Regulatory and Technical Support of the Research Center of Fire Protection, Institute of Public Administration and Scientific Research on Civil Protection, 21, Vyshhorodska St., Kyiv, 02000, Ukraine, tel. +38 (093) 165-69-91, e-mail: 2801397@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9044-1293

^{6*} Department of Fire Prevention Work, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka St., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel. +38 (093) 407-19-83, e-mail: diadiushenko_oleksandr@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0003-0797-2251

Abstract. Problem statement. Methods of preventing the occurrence of forced fire-hazardous destruction of products in the event of exposure to external thermal actions are of great practical importance. At the same time, they should be based on scientifically based methods for determining the critical values of parameters of thermal effects on products and technological parameters of mixture charges, the excess of which leads to premature fire-hazardous destruction of products. To develop such methods, it is necessary to have the results of theoretical and experimental studies of the processes of heating the shells of mixture charges for various external heat flows and their thermoreaction times, as well as the processes of ignition and development of their combustion under different external conditions. **Purpose of the article.** To form the results of theoretical studies in the form of scientifically based methods that allow preventing and controlling the premature ignition of mixture charges, the explosive development of their combustion process and the fire-hazardous destruction of products under conditions of external thermal effects, as well as the compilation of the results of experimental studies into a single database with determination of the influence of the technological parameters of the mixtures on the characteristics of their ignition processes and the development of combustion, the use of which allows reducing the number of fire-explosive destruction of products in conditions of elevated heating temperatures and external pressures. **Conclusion.** Scientifically based methods of determining the critical values of the parameters of external thermal actions for the quantitative assessment of the level of fire safety of pyrotechnic products based on multi-component nitrate-metallized mixtures have been developed. A scientific and technical base of experimental data was created to determine the regularities of the influence of a wide class of technological parameters of mixtures on the main characteristics of the processes of ignition and development of combustion of mixtures (ignition temperature, induction time, speed of combustion development) under conditions of external thermal actions (elevated heating temperatures, external pressures, etc.), which makes it possible to determine the probability of fires occurring at facilities where products are stored.

Keywords: *fire safety; pyrotechnic products based on multi-component nitrate-metallized mixtures; processes of ignition and development of combustion*

Вступ. З кожним роком у народному господарстві та військовій техніці України все більшого застосування набувають піротехнічні вироби різного призначення (феєрверкові зірки та петарди, спалахувальні та займисті засоби, трасувальні патрони та снаряди, піротехнічні ПЧ-випромінювачі, пристрої ракетно-космічної техніки та ін.) для отримання спеціальних ефектів (світлових, кольорово-полум'яних, звукових, теплових, реактивних тощо) [1–16].

Оснoву цих виробів складають заряди з багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей: ущільнених сумішей з порошків металевих палих (Mg, Al, Ti, Zr та ін.), нітратовмісних окиснювачів (NaNO₃, KNO₃, Ba(NO₃)₂, Sr(NO₃)₂ та ін.), добавок органічних (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, метальдегіду, каніфолі, ідитоду та ін.) та неорганічних речовин (фториди металів (LiF, NaF, BaF₂, SrF₂, SiF₂, AlF₃) та ін.), які під час зберігання та транспортування або застосування виробів можуть піддаватись різним зовнішнім термічним впливам (наприклад, інтенсивному нагріву під час пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, або під час їх транспортування, а також термоударним впливам під час запуску та польоті виробів тощо) [17–28].

У результаті відбувається передчасне спрацьовування зарядів сумішей, що входять до складу виробів, та прискорення процесу їх горіння в умовах замкненого об'єму у разі зростання температури нагрівання та зовнішнього тиску аж до пожежо-вибухонебезпечних режимів його перебігу. Відбуваються руйнування корпусів виробів, які супроводжуються проявом різних чинників пожежі (полум'я або високотемпературний струмінь продуктів згорання, дисперговані продукти (уламки корпусів, розжарені частини зарядів, іскри тощо)).

При цьому у багатьох випадках передчасні вибухонебезпечні спрацьовування піротехнічних виробів мали катастрофічні наслідки, оскільки практично непереборні складності виникали під час гасіння зарядів сумішей, що спалахнули,

внаслідок того, що процес їх горіння здійснюється за рахунок власного окиснювача без участі кисню навколишнього повітря, а температури продуктів згорання вельми високі.

Тому велике практичне значення мають способи попередження виникнення вимушених пожежонебезпечних руйнувань виробів у випадку впливу зовнішніх термічних дій. При цьому вони повинні ґрунтуватись на науково обґрунтованих методах визначення критичних значень параметрів термічних дій на вироби та технологічних параметрів зарядів сумішей, перевищення яких викликає передчасні пожежонебезпечні руйнування виробів.

Для розроблення таких методів необхідно мати результати теоретичних та експериментальних досліджень процесів нагрівання оболонок зарядів сумішей для різних зовнішніх теплових потоків та часів їх термодії, а також процесів займання та розвитку їх горіння за різних зовнішніх умов (підвищені температури нагріву, зовнішні тиски тощо).

Аналіз публікацій. Нині дослідження впливу технологічних параметрів зарядів сумішей (співвідношення компонентів та їх дисперсності, коефіцієнта ущільнення, діаметра заряду та матеріалу його оболонки, вологості окиснювача тощо) та зовнішніх умов (температури нагріву, зовнішніх тисків, вологості та складу навколишнього середовища тощо) на основні характеристики процесів їх займання та розвитку горіння (температуру та склад продуктів згорання, швидкість горіння та вибухонебезпечні режими його розвитку тощо) висвітлені у окремих статтях, монографіях та наукових роботах [29–51].

Однак їх систематизація та аналіз із погляду практичного застосування на підприємствах України для підвищення ефективності в організації систем протипожежної охорони на об'єктах із наявністю піротехнічних виробів, особливо в умовах зовнішніх термічних впливів, відсутні.

Мета статті – формування результатів теоретичних досліджень у вигляді науково

обґрунтованих методів, які дозволяють попереджати та контролювати передчасне займання зарядів сумішей, вибухонебезпечний розвиток процесу їх горіння та пожежонебезпечне руйнування виробів в умовах зовнішніх термічних дій, а також зведення результатів експериментальних досліджень у єдину базу даних із визначення впливу технологічних параметрів сумішей на характеристики процесів їх займання та розвитку горіння, використання якої дозволяє знижувати кількість пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків.

Результати досліджень. 1. Науково обґрунтовано розрахункові методи визначення критичних значень параметрів

зовнішніх термічних дій на заряди піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей, перевищення яких спричинює пожежовибухонебезпечні руйнування виробів на їх основі.

В основу методів покладено комплекс розроблених математичних моделей (табл. 1), розрахунки за якими проводяться в режимі діалогу та реального часу на ПК з використанням спеціального програмного комплексу (СПК1) у вигляді пакетів прикладних програм (ППП1 – ППП3) за основними чисельними методами розв'язування обчислювальних задач, а також чисельного розв'язування газодинамічних, теплових та дифузійних задач.

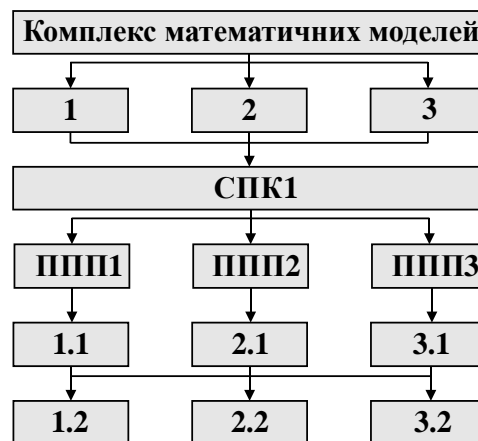


Рис. 1. Комплекс розроблених математичних моделей [2; 5; 30; 32; 35; 38; 41; 43; 45; 51] та спеціалізований програмний комплекс (СПК1) зі стандартних пакетів прикладних програм ППП1 – ППП3 [2; 5; 18] для проведення розрахунків на ПК в режимі діалогу та реального часу для визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій та вибухонебезпечних режимів розвитку горіння зарядів сумішей

Позначення на рисунку 1:

1 – Математичні моделі нагріву нерухомих виробів із зарядами сумішей різної геометричної форми та розмірів в умовах зберігання та транспортування.

2 – Математичні моделі зовнішніх термоударних впливів на вироби із зарядами сумішей з металевими оболонками циліндричної та півсферичної форми в умовах запуску та польоту.

3 – Математичні моделі розвитку процесу горіння багатокомпонентних ущільнених сумішей металеве пальне + нітратовмісний окиснювач + добавки органічних та неорганічних речовин в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків.

1.1 – Методи чисельного розв'язування лінійних та нелінійних рівнянь.

2.1 – Методи чисельного розв'язування диференційних рівнянь.

3.1 – Метод чисельного інтегрування функцій.

1.2 – Визначення критичних значень зовнішніх теплових потоків та часу їх впливу на поверхню виробів, перевищення яких спричинює пожежонебезпечні руйнування.

2.2 – Визначення критичних значень швидкостей надзвукового обдуву потоком повітря виробів для ламінарного та турбулентного режимів обтікання, формування критичних значень теплових

потоків з приграничних шарів у виробі та часів їх впливу, перевищення яких спричинює руйнування виробів.

3.2 – Визначення діапазонів максимальної та мінімальної зміни температури продуктів згоряння, вмісту у них високотемпературного конденсату та критичних діапазонів зміни швидкостей горіння сумішей, перевищення яких викликає їх різке збільшення та вибухонебезпечний розвиток процесу горіння.

Кількісна оцінка рівня пожежної безпеки піротехнічних виробів зі спалахувачами на основі багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей. Розроблені методи дозволяють в автоматизованому режимі з використанням сучасних ПК для широкого класу серійних виробів зі спалахувачами на основі розглядуваних сумішей (табл. 1) визначати критичні діапазони зміни основних параметрів зовнішніх термодій (теплових потоків від джерел займання

різних палих матеріалів та часів їх впливу) на металеві корпуси виробів, наприклад, під час можливих пожеж із відкритим полум'ям у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, або під час їх транспортування, перевищення яких спричинює вибухонебезпечне займання зарядів спалахувачів під металевими корпусами виробів, передчасне спрацювання основних зарядів піротехнічних сумішей та пожежовибухонебезпечне для навколишніх об'єктів руйнування виробів на їх основі.

При цьому пожежна небезпека полум'я (ДСТУ 8828: 2019. Пожежна безпека. Загальні положення) зумовлена інтенсивністю теплового впливу (густиною теплового потоку), площею впливу, орієнтацією (взаємним розташуванням), періодичністю та часом його впливу на горючі речовини. Густина теплового потоку дифузійного полум'я (сірники, свічки, газовий палик) становить $18...40 \cdot 10^3$ Вт/м², а попередньо змішаних (паяльні лампи, газові палики) – $60...140 \cdot 10^3$ Вт/м².

Таблиця 1

Серійні піротехнічні вироби зі спалахувачами на основі розглядуваних сумішей, які використовуються у народному господарстві та військовій техніці [2; 5; 29; 35]

№ п/п	Призначення	Рецептура основного заряду піротехнічної суміші	Відносний масовий вміст компонентів суміші, %
1	Освітлювальні патрони	NaNO ₃	11,0
		Al – Mg	41,0
		CaSO ₄ ·0,5H ₂ O	32,0
		H ₂ O	1,0
		CaCO ₃	15,0
2	Освітлювальні снаряди	Ba(NO ₃) ₂	76,0
		Al-пудра	10,0
		Al-порошок	8,0
		Рицинова олія	2,0
		Сірка	4,0
3	Освітлювальні артснаряди	Ba(NO ₃) ₂	55,0
		Sr(NO ₃) ₂	5,0
		Al	15,0
		Mg	17,0
		Льняна олія	3,0
4	Фотоосвітлювальні авіабомби (ФТАБ)	Асфальт	5,0
		Ba(NO ₃) ₂	30,0
		KClO ₄	30,0
5	Сигнальні патрони (зелений вогонь)	Al-пудра	40,0
		Ba(NO ₃) ₂	45,0
		Mg	26,0
		C ₆ Cl ₆	7,0
		CuO	2,0
		Гільсоніт	2,0
Нафта	2,0		

Закінчення таблиці 1

		KClO ₄	16,0
6	Сигнальні патрони (жовтий вогонь)	Mg	26,0
		Гільсоніт	2,0
		Ba(NO ₃) ₂	29,0
		Na ₂ C ₂ O ₄	13,0
		KClO ₄	23,0
		C ₆ Cl ₆	5,0
		Нафта	2,0
7	Трасери для патронів (трасери зеленого вогню)	Ba(NO ₃) ₂	16,0
		Mg	38,0
		Гільсоніт	3,0
		C ₆ Cl ₆	6,0
		Cu-порошок	2,0
8	Трасери для артилерійських снарядів (трасери білого вогню)	KClO ₄	25,0
		Ba(NO ₃) ₂	60,0
		Mg	34,0
9	Сигнальні патрони (червоний вогонь)	Фенол-формальдегідна смола	6,0
		Sr(NO ₃) ₂	34,0
		Гільсоніт	2,0
		Нафта	2,0
		C ₆ Cl ₆	4,0
		KClO ₄	29,0
10	Трасери для патронів (трасери червоного вогню)	Mg	29,0
		Sr(NO ₃) ₂	33,3
		Mg	26,7
		SrO ₂	26,7
		SrC ₂ O ₄	5,0
11	Піротехнічні ІЧ-снаряди (ПІЧС) для створення хибних цілей	Резинат Ca	8,3
		NaNO ₃	60,0
		Mg	32,0
		Нафталін	8,0

Таблиця 2

Деякі температурні характеристики полум'я та низькокалорійних джерел теплоти

Назва речовини (виробу), що горить, або пожежонебезпечної операції	Температура полум'я (тління або нагрівання), К	Час горіння (тління), хв.
Легкозаймісті та горючі рідини	1 153	–
Деревина та лісопиломатеріали	1 273	–
Природні та зріджені гази	1 473	–
Газове зварювання металу	3 423	–
Газове різання металу	1 623	–
Тліюча цигарка	593...683	2...2,5
Тліюча сигара	693...733	26...30
Сірник, що горить	893...1 108	0,33

У таблиці 2 наведено деякі температурні характеристики полум'я та низькокалорійних джерел теплоти.

Відкрите полум'я небезпечно не тільки під час безпосереднього контакту з піротехнічними виробами, а й за його опромінення. Інтенсивність опромінення (g_p , Вт/м²) обчислюють за формулою:

$$g_p = 5,7 \cdot \varepsilon_{36} \cdot \left(\left(\frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{zp}}{100} \right)^4 \right) \cdot \varphi_{1\phi}, \quad (1)$$

де 5,7 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/м²·К⁴; ε_{36} – зведено ступінь чорноти системи:

$$\varepsilon_{36} = \frac{1}{\varepsilon_\phi} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1, \quad (2)$$

де ε_ϕ – ступінь чорноти факелу (під час горіння дерева дорівнює 0,7, нафтопродуктів – 0,85); ε_p – ступінь чорноти речовини, що опромінюється.

Приймають згідно з чинними нормативними документами; T_{ϕ} – температура факела полум'я, К; T_{gr} – температура горючої речовини, К; $\phi_{1\phi}$ – коефіцієнт опромінення між випромінювальною та опроміненою поверхнями. Критичні значення інтенсивності опромінення залежно від його тривалості для деяких речовин наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Критичні значення інтенсивності опромінення залежно від тривалості опромінення для деяких речовин

Назва матеріалу	Мінімальна інтенсивність опромінення, Вт/м ² , за тривалості опромінення, хв.		
	3	5	15
Деревина (сосна вологістю 12 %)	18 800	16 900	13 900
Дерев'яно-стружкові плити (густина 417 кг/м ³)	13 900	11 900	8 300
Торф брикетний	31 500	24 400	13 200
Торф кусковий	16 600	14 350	9 800
Бавовна-волокно	11 000	9 700	7 500
Шорсткий пластик	21 600	19 100	15 400
Склопластик	19 400	18 600	17 400
Пергамін	22 000	19 750	17 400
Гума	22 600	19 200	14 800
Вугілля	–	35 000	35 000

Таким чином, залежно від природи осередку пожежі (виду відкритого полум'я) та тривалості його дії, зовнішній тепловий нагрів зарядів піротехнічних спалахувачів може досягати значних величин: тепловий потік, що надходить на поверхню спалахувачів – до $2,5 \cdot 10^4 \dots 3,5 \cdot 10^5$ Вт/м²; час його дії – до 2...5 хв. При цьому ці діапазони зміни вказаних параметрів зовнішніх термічних впливів можуть перевищувати їх критичні значення, які спричинюють передчасне пожежонебезпечне руйнування піротехнічних виробів із розглядуваними спалахувачами.

Із застосуванням розроблених методів для циліндричних зарядів піротехнічних спалахувачів на основі Mg + NaNO₃ + парафін + NaF та Al + NaNO₃ + парафін + NaF проведено розрахунки залежностей $q_n^*(t^*)$ (q_n^* , t^* – критичні значення зовнішнього теплового потоку та часу його дії) для різних технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача α , відносного вмісту добавки органічної ε_n та неорганічної речовини ε_{ϕ} , середнього розміру частинок металевого пального d_m та окиснювача d_N , коефіцієнта ущільнення

суміші K_y , діаметра заряду D , матеріалу оболонки та її товщини h) (рис. 2–4), які були зіставлені з отриманими експериментальними даними.

Усі експериментальні дослідження проводились на зразках сумішей, які виготовлялись за стандартними методиками, прийнятими у піротехнічному виробництві [2; 5]. Ініціювання процесів займання зразків сумішей здійснювалось за нормальних умов ($T = 293$ К, $P = 10^5$ Па) за допомогою керованого ІЧ-нагріву кварцовими лампами типу КГМ-220-1000-1 із застосуванням термодатчиків РИФ-101 для контролю температури на поверхні зразків сумішей в діапазоні 300...1900 К та зовнішніх теплових потоків у діапазоні $2 \cdot 10^4 \dots 2,5 \cdot 10^5$ Вт/м² [2; 5].

Із даних, наведених на рисунках 2–4, випливає, що теплові потоки q_{ni} ($i = 1, 2, \dots$), які реалізуються на практиці, від різних осередків пожежі можуть перевищувати критичні значення для розглядуваних зарядів сумішей за тривалості їх дії $t^* > t_j^*$ ($j = 1, 2, \dots$), які суттєво залежать від технологічних параметрів сумішей (табл. 4).

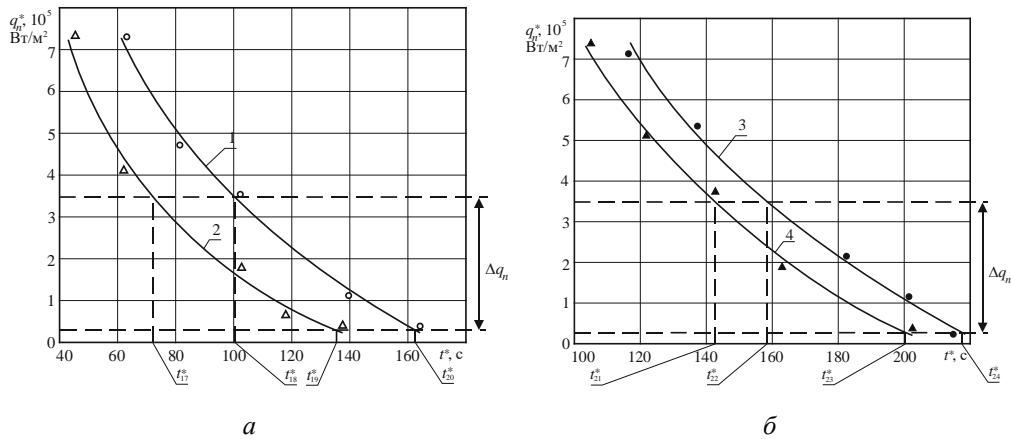


Рис. 2. Залежності $q_n^*(t^*)$ циліндричних зарядів сумішею на основі $Mg + NaNO_3 + \text{парафін} + NaF$ (а) та $Al + NaNO_3 + \text{парафін} + NaF$ (б) для коефіцієнта надлишку окиснювача $\alpha = 0,6$ ($\epsilon_n = 0,2; \epsilon_\phi = 0,1; d_N = 106 \text{ мкм}; K_Y = 0,95 \dots 0,96; D = 2 \dots 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \text{оболонка сталева (сталь 12X18H10T [2]); } h = 2 \dots 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; T_0 = 293 \text{ К}; P = 10^5 \text{ Па}$): 1 – $d_m = 54 \text{ мкм}$ (Mg); 2 – $d_m = 305 \text{ мкм}$ (Mg); 3 – $d_m = 56 \text{ мкм}$ (Al); 4 – $d_m = 310 \text{ мкм}$ (Al); — розрахункова крива; $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle$ – експериментальні дані; $\Delta q_n = 2,5 \cdot 10^4 \dots 3,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$

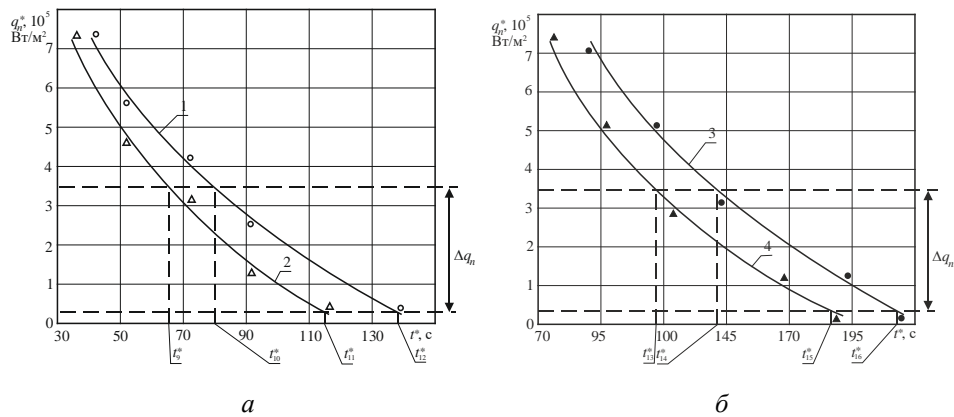


Рис. 3. Залежності $q_n^*(t^*)$ циліндричних зарядів сумішею на основі $Mg + NaNO_3 + \text{парафін} + NaF$ (а) та $Al + NaNO_3 + \text{парафін} + NaF$ (б) для коефіцієнта надлишку окиснювача $\alpha = 1,0$ ($\epsilon_n = 0,2; \epsilon_\phi = 0,1; d_N = 106 \text{ мкм}; K_Y = 0,95 \dots 0,96; D = 2 \dots 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \text{оболонка сталева (сталь 12X18H10T [2]); } h = 2 \dots 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; T_0 = 293 \text{ К}; P = 10^5 \text{ Па}$): 1 – $d_m = 54 \text{ мкм}$ (Mg); 2 – $d_m = 305 \text{ мкм}$ (Mg); 3 – $d_m = 56 \text{ мкм}$ (Al); 4 – $d_m = 310 \text{ мкм}$ (Al); — розрахункова крива; $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle$ – експериментальні дані; $\Delta q_n = 2,5 \cdot 10^4 \dots 3,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$

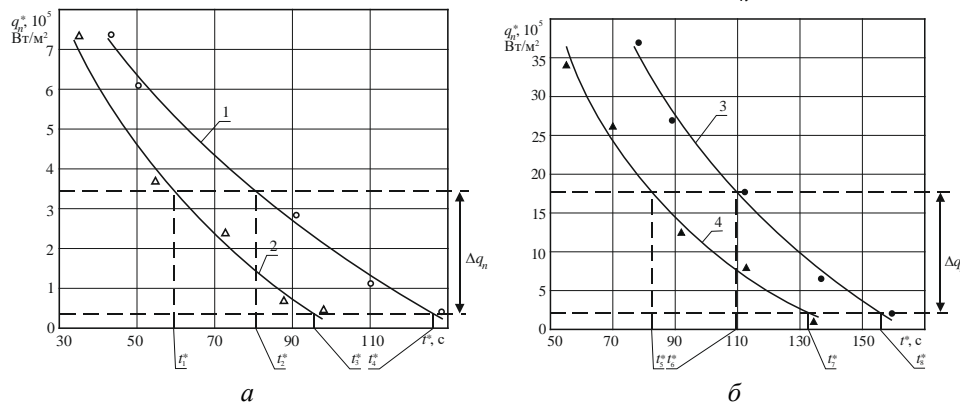


Рис. 4. Залежності $q_n^*(t^*)$ циліндричних зарядів сумішею на основі $Mg + NaNO_3 + \text{парафін} + NaF$ (а) та $Al + NaNO_3 + \text{парафін} + NaF$ (б) для коефіцієнта надлишку окиснювача $\alpha = 1,5$ ($\epsilon_n = 0,2; \epsilon_\phi = 0,1; d_N = 106 \text{ мкм}; K_Y = 0,95 \dots 0,96; D = 2 \dots 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \text{оболонка сталева (сталь 12X18H10T [2]); } h = 2 \dots 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; T_0 = 293 \text{ К}; P = 10^5 \text{ Па}$): 1 – $d_m = 54 \text{ мкм}$ (Mg); 2 – $d_m = 305 \text{ мкм}$ (Mg); 3 – $d_m = 56 \text{ мкм}$ (Al); 4 – $d_m = 310 \text{ мкм}$ (Al); — розрахункова крива; $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle$ – експериментальні дані; $\Delta q_n = 2,5 \cdot 10^4 \dots 3,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$

Таблиця 4

Діапазони зміни критичних значень часів дії t_j^* ($j = 1, 2, \dots$) зовнішніх теплових потоків q_{ni} ($i = 1, 2, \dots$) для різних значень технологічних параметрів суміші

Параметр Суміш	q_{ni} , Вт/м ²	t_j^* , с
Суміш на основі Mg + NaNO ₃ + парафін + NaF	$q_{n1} = 3,5 \cdot 10^5$	$\alpha = 1,5$ $t_1^* > 63$ при $d_m = 305$ мкм; $t_2^* > 81$ при $d_m = 54$ мкм
		$\alpha = 1,0$ $t_9^* > 68$ при $d_m = 305$ мкм; $t_{10}^* > 83$ при $d_m = 54$ мкм
		$\alpha = 0,6$ $t_{17}^* > 73$ при $d_m = 305$ мкм; $t_{18}^* > 101$ при $d_m = 54$ мкм
	$q_{n2} = 2,5 \cdot 10^4$	$\alpha = 1,5$ $t_3^* > 97$ при $d_m = 305$ мкм; $t_4^* > 125$ при $d_m = 54$ мкм
		$\alpha = 1,0$ $t_{11}^* > 115$ при $d_m = 305$ мкм; $t_{12}^* > 139$ при $d_m = 54$ мкм
		$\alpha = 0,6$ $t_{19}^* > 136$ при $d_m = 305$ мкм; $t_{29}^* > 163$ при $d_m = 54$ мкм
Суміш на основі Al + NaNO ₃ + парафін + NaF	$q_{n1} = 3,5 \cdot 10^5$	$\alpha = 1,5$ $t_5^* > 85$ при $d_m = 310$ мкм; $t_6^* > 98$ при $d_m = 56$ мкм
		$\alpha = 1,0$ $t_{13}^* > 98$ при $d_m = 310$ мкм; $t_{14}^* > 143$ при $d_m = 56$ мкм
		$\alpha = 0,6$ $t_{21}^* > 144$ при $d_m = 310$ мкм; $t_{22}^* > 152$ при $d_m = 56$ мкм
	$q_{n2} = 2,5 \cdot 10^4$	$\alpha = 1,5$ $t_7^* > 137$ при $d_m = 310$ мкм; $t_8^* > 158$ при $d_m = 56$ мкм
		$\alpha = 1,0$ $t_{15}^* > 188$ при $d_m = 310$ мкм; $t_{16}^* > 213$ при $d_m = 56$ мкм
		$\alpha = 0,6$ $t_{23}^* > 201$ при $d_m = 310$ мкм; $t_{24}^* > 218$ при $d_m = 56$ мкм

Таким чином, шляхом збільшення вмісту металевого пального у суміші та зменшення середнього розміру його частинок значення t_j^* ($j = 1, 2, \dots$) можна збільшити у 1,5...2 рази, це вказує, що заряди сумішей стають більш стійкими до зовнішніх теплових впливів.

Науково-технічна база експериментальних даних із визначення нестійких режимів процесів займання та розвитку горіння піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей для зниження кількості пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів в умовах зовнішніх термодій. В основу бази даних (рис. 5) покладено спеціалізований програмний комплекс (СПК2), що складається із двох стандартних пакетів прикладних програм (ППП4, ППП5) за методами первинної математичної обробки отриманих даних та

методами регресії для побудови експериментальних кривих на ПК в режимі діалогу та реального часу, що дозволяють визначати закономірності впливу широкого класу технологічних параметрів сумішей (коефіцієнта надлишку окиснювача, величини та природи добавки органічної та неорганічної речовини, вологості окиснювача, природи та дисперсності металевого пального, коефіцієнта ущільнення сумішей, діаметра їх зарядів, матеріалу та товщини оболонки), складу та вологості навколишнього середовища на характеристики процесів займання та розвитку горіння сумішей (температуру та час затримки займання, швидкість розвитку горіння) та встановлювати нестійкі вибухонебезпечні режими розвитку їх горіння за підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків, контроль за якими

дозволяє зменшувати кількість пожежонебезпечних руйнувань виробів.

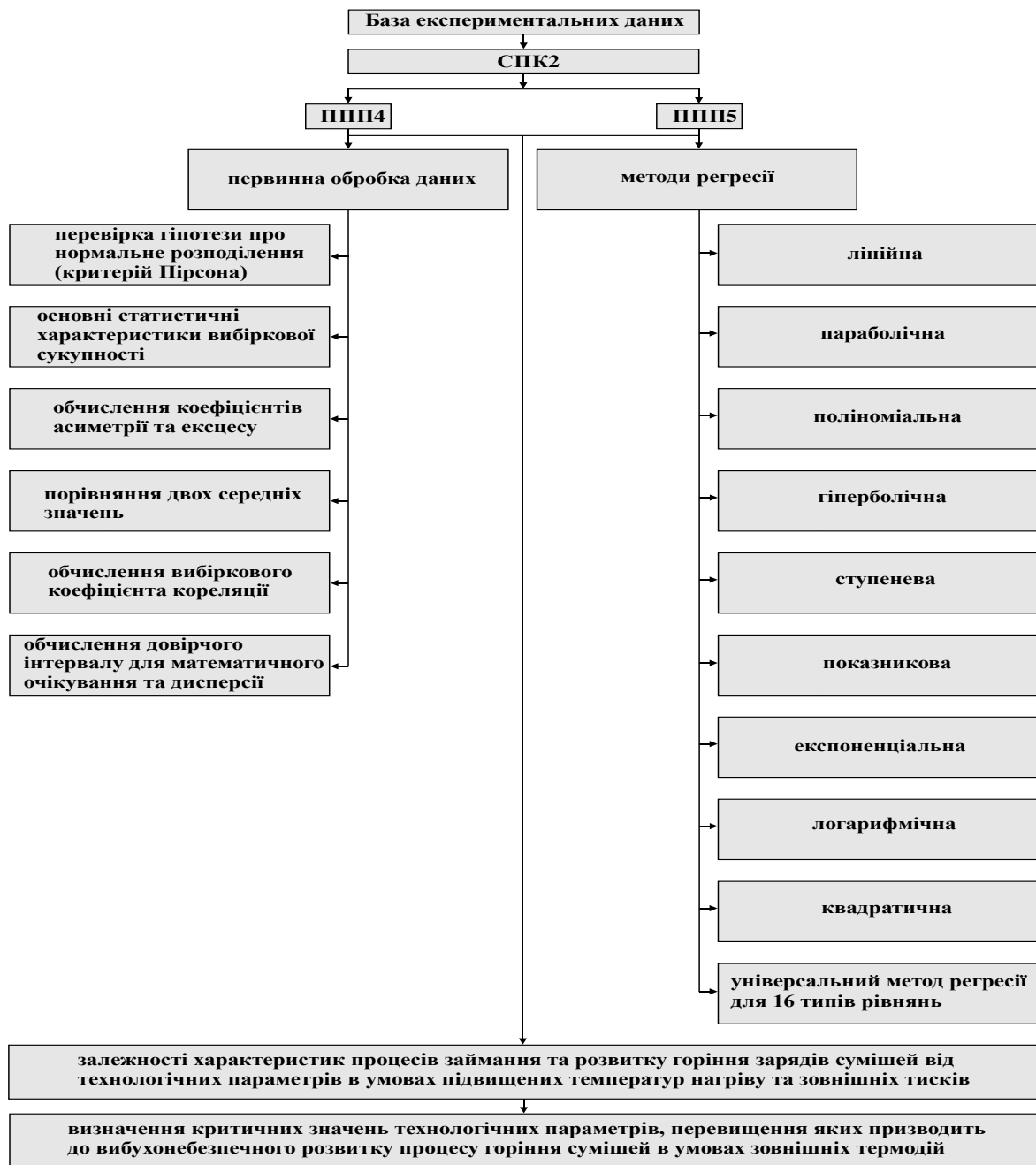


Рис 5. База отриманих експериментальних даних [2, 5, 29, 31, 34, 36, 37, 39, 40, 42, 44, 46, 47 – 51] та спеціалізований програмний комплекс (СПК2) зі стандартних пакетів прикладних програм ППП4 – ППП5 [2; 5; 18] для отримання залежностей характеристик займання та розвитку горіння зарядів сумішей від технологічних параметрів, визначення їх критичних значень, що спричинює пожежовибухонебезпечне руйнування виробів в умовах зовнішніх термічних впливів

Кількісна оцінка ймовірності виникнення пожежі на об'єкті, де зберігаються вироби з піротехнічними спалахувачами. Для запобігання передчасному займанню та подальшому пожежонебезпечному руйнуванню виробів із

піротехнічними спалахувачами на основі багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей з добавками органічних та неорганічних речовин в умовах зовнішньої термічної дії (наприклад, за виникнення пожежі у складських приміщеннях, де

зберігаються вироби, під час їх транспортування тощо) необхідно запобігати утворенню у горючому середовищі осередків екзотермічного окиснення частинок металевих пального в продуктах розкладання окиснювача, добавок органічних та неорганічних речовин, що забезпечується максимально можливим застосуванням порошків компонентів у вказаних зарядах зі зниженою горючістю, яка досягається шляхом варіювання їх технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів, їх коефіцієнта ущільнення, розмірів їх заряду (діаметра, висоти, геометричної форми тощо)) (згідно з ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні вимоги. п. 7. Вимоги до способів забезпечення пожежної безпеки комплексом протипожежного захисту). Для кількісної оцінки рівня забезпечення пожежної безпеки піротехнічних виробів в умовах зовнішніх термічних дій (див. ДСТУ 8828:2019 п. Б. Метод визначення ймовірності виникнення пожежі на об'єкті. п. Б.3.4. Розрахунок ймовірності появи джерела запалювання (ініціювання горіння та вибуху)) використовується методика розрахунку ймовірності $P_1(ДЗ)$ появи джерела запалювання в одному піротехнічному виробі, що ініціює процес передчасного виникнення горіння основного заряду багатоконпонентної суміші виробу.

При цьому враховується, що при зберіганні або транспортуванні піротехнічних виробів заздалегідь неможливо передбачити конкретні умови, за яких можуть виникнути зовнішні дії на поверхню цих виробів, які можуть викликати появу в заряді нітратно-металевих джерел запалювання осередків екзотермічного окиснення частинок металів у продуктах розкладання інших компонентів, що спричинюють спалахування та ініціювання джерел запалювання та, у кінцевому підсумку, пожежонебезпечне руйнування виробів.

Тому згідно з ДСТУ 8828:2019 (див. Б.3.4, формула (Б.30)) для розрахунку $P_1(ДЗ)$ використовується вираз:

$$P_1(ДЗ) = 1 - e^{-\tau/\tau_{0.3}}, \quad (3)$$

де τ – час зберігання (транспортування) піротехнічного виробу протягом аналізованого періоду часу, год.; $\tau_{0.3} = 3,03 \cdot 10^4 \cdot E_0^{1,2}$ – середній час зберігання (транспортування) до появи (ініціювання) джерела запалювання, год.; E_0 – мінімальна енергія запалювання ущільненої суміші розглядуваних компонентів (утворення осередків екзотермічного окиснення), Дж.

Величина E_0 визначається як мінімальна енергія, яка необхідна для нагрівання об'єму реакційної зони κ -фази заряду суміші від початкової температури (T_0 , К) до температури її займання (T_z , К) в умовах зовнішньої термодії:

$$E_0 = \rho_c \cdot c_c \cdot \Delta V_c (T_z - T_0), \quad (4)$$

де ρ_c , c_c – густина (кг/м³) та питома теплоємність (Дж/кг·К) заряду суміші; ΔV_c – об'єм реакційної зони κ -фази суміші, в межах якої відбувається повне термічне розкладання окиснювача, добавок органічних та неорганічних речовин, а також екзотермічне окиснення частинок металів, що викликають, у кінцевому підсумку, займання суміші, м³.

При цьому, враховуючи, що заряд має діаметр D , а товщина реакційної зони κ -фази складає δ_1 , у першому наближенні, можна вважати:

$$\Delta V_c = \frac{\pi D^2 \delta_1}{4}. \quad (5)$$

Підставляючи (5) у (4), отримуємо:

$$E_0 = \frac{\pi D^2 \delta_1 \cdot \rho_c \cdot c_c}{4} \cdot (T_z - T_0). \quad (6)$$

Згідно зі встановленим механізмом горіння розглядуваних піротехнічних багатоконпонентних нітратно-металізованих сумішей з добавками органічних та неорганічних речовин [2; 5] величина, в першому наближенні, визначається співвідношенням:

$$\delta_1 = \frac{2R \cdot T_n \cdot a_c}{E_1 \cdot u}, \quad (7)$$

де R – газова стала, Дж/моль·К; T_n – температура поверхні горіння суміші, К; a_c – коефіцієнт температуропровідності суміші, м²/с; u – швидкість горіння суміші, м/с; E_1 – енергія активації процесу повного

термічного розкладання NaNO_3 за $T = T_n$, як основного джерела активних газоподібних продуктів ($E_1 \gg RT$), кДж/моль.

Згідно з отриманими експериментальними даними (для $\alpha = 0,4 \dots 0,5$ та $K_V = 0,95 \dots 0,96$) [2, 29]: $T_n = 1100 \dots 1300$ К; $u = 1,5 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ м/с; $E_1 = 139,2$ кДж/моль; $a_c = 4,2 \cdot 10^{-6} \dots 12,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с, величина $\delta_1 = 70 \dots 350$ мкм, тобто по порядку величини відповідає середньому розміру частинок використуваних порошків Mg ($d_m = 54 \dots 305$ мкм) та Al ($d_m = 56 \dots 310$ мкм).

Для знаходження T_3 проведено експериментальні дослідження процесів займання зарядів сумішей Mg + NaNO_3 + парафін + NaF та Al + NaNO_3 + парафін + NaF в умовах зовнішніх термічних впливів

для різних технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача α , відносного вмісту добавки органічної ε_n та неорганічної ε_ϕ речовини, середнього розміру частинок металевого пального d_m та окиснювача d_N , коефіцієнта ущільнення суміші K_V , діаметра заряду D , матеріалу оболонки та її товщини h) (рис. 6, 7).

Усі дослідження проводились за допомогою відомих методів фізико-хімічного аналізу (методи швидкісної мікрозйомки, термопарні та безконтактні методи вимірювання температури, методи рентгеноструктурного аналізу та ін.) та стандартного піротехнічного обладнання [2; 5; 33].

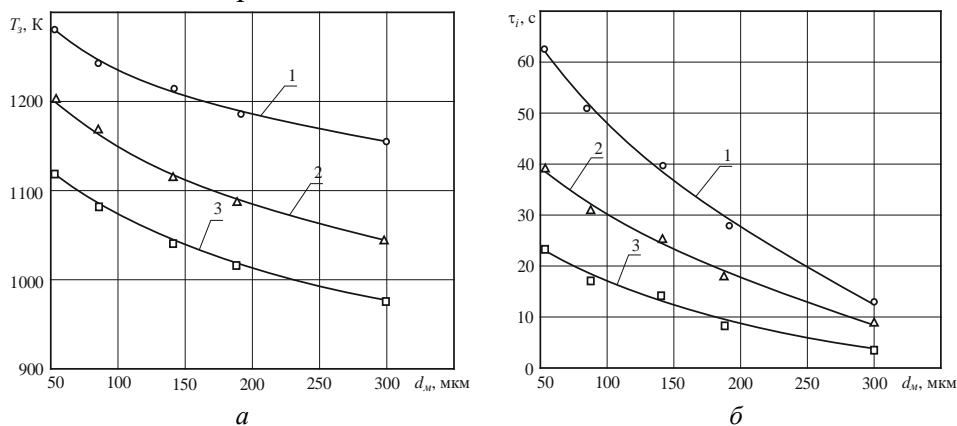


Рис. 6. Залежності температури займання (а) та часу індукції (б) циліндричних зарядів сумішей на основі Mg + NaNO_3 + парафін + NaF від середнього розміру частинок металевого пального для значень коефіцієнта надлишку окиснювача $\alpha = 0,4$ (1); 1,0 (2); 1,5 (3) ($\varepsilon_n = 0,2$; $\varepsilon_\phi = 0,1$; $d_N = 106$ мкм; $K_V = 0,95 \dots 0,96$; $D = 2 \dots 3 \cdot 10^{-2}$ м; оболонка сталева (сталь 12Х18Н10Т [2]); $h = 2 \dots 2,5 \cdot 10^{-3}$ м; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па):
○, Δ, □ – експериментальні дані

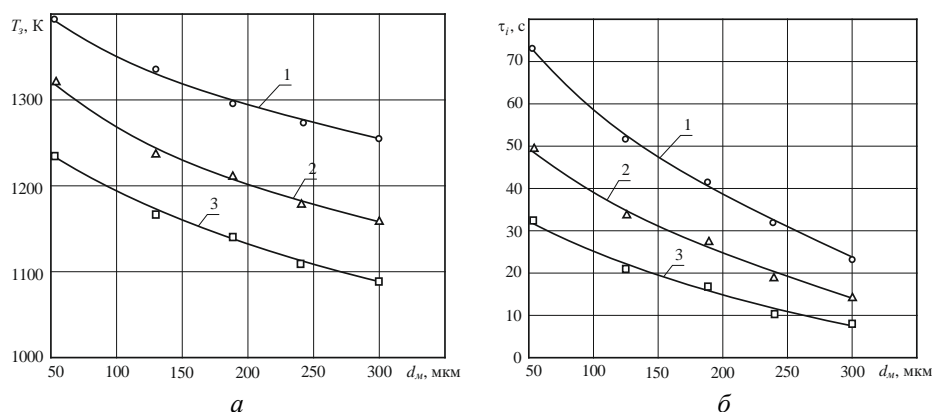


Рис. 7. Залежності температури займання (а) та часу індукції (б) циліндричних зарядів сумішей на основі Al + NaNO_3 + парафін + NaF від середнього розміру частинок металевого пального для значень коефіцієнта надлишку окиснювача $\alpha = 0,4$ (1); 1,0 (2); 1,5 (3) ($\varepsilon_n = 0,2$; $\varepsilon_\phi = 0,1$; $d_N = 106$ мкм; $K_V = 0,95 \dots 0,96$; $D = 2 \dots 3 \cdot 10^{-2}$ м; оболонка сталева (сталь 12Х18Н10Т [2]); $h = 2 \dots 2,5 \cdot 10^{-3}$ м; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па):
○, Δ, □ – експериментальні дані

При цьому ініціювання процесу займання зарядів сумішей в умовах зовнішніх термічних дій також здійснювалось за допомогою вказаного вище контрольованого ІЧ-нагріву їх поверхонь. Отримані експериментальні дані оброблялись в режимі діалогу та реального часу з використанням стандартних пакетів прикладних програм за методами первинної математичної обробки (ППП4) та методами регресії (ППП5) [2; 5; 18]. Відносна похибка визначення основних характеристик процесу займання суміші (температури займання T_z , К; часу індукції (затримки займання) τ_i , с) не перевищувала 6...8 %.

З даних, наведених на рисунках 6, 7, випливає, що величини T_z та τ_i суттєво залежать від вмісту окиснювача у суміші та дисперсності металевого пального: при зменшенні α від $\alpha = 1,5$ до $\alpha = 0,4$; d_m від $d_m = 305$ мкм до $d_m = 56$ мкм (для частинок Mg) та від $d_m = 310$ мкм до $d_m = 54$ мкм (для частинок Al) значення T_z зростають у 1,5... 2 рази, а τ_i – у 2,5...3 рази.

Таким чином, використання дрібнодисперсних металевих порошоків на стадії виготовлення зарядів піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металевих сумішей з надлишком металевого пального дозволить збільшити час їх передчасного спрацьовування в умовах зовнішньої термічної дії і, тим самим, підвищити

пожежну безпеку піротехнічних виробів на їх основі.

Для кількісної оцінки сказаного вище розраховуємо ймовірність $P_1(DЗ)$ ініціювання джерела запалювання за термічної дії, тобто ймовірність пожежонебезпечного руйнування піротехнічних виробів у цих умовах. Розраховуючи за формулами (3)–(7) на прикладі двох серійних піротехнічних виробів із різними нітратно-металізованими спалахувачами (табл. 5), використовуючи отримані дані (рис. 6, 7), а також відомі фізико-хімічні характеристики розглянутих сумішей, отримуємо, що ймовірність $P_1(DЗ)$ зі зменшенням α та d_m може суттєво зменшуватися (рис. 8): для виробу 1 – в 2,3...2,8 рази; для виробу 2 – в 1,7...2,1 рази.

Отже, шляхом зміни вмісту порошкоподібних металевих пальных та їх дисперсності, що використовуються у піротехнічних нітратно-металевих спалахувачах виробів, можна підвищити їх пожежну безпеку в умовах зовнішньої термічної дії більше ніж у 1,5...2,5 рази.

Крім цього, замінюючи одне металеве пальне іншим, також можна суттєво підвищити пожежну безпеку піротехнічних виробів у вказаних умовах: наприклад, заміна магнієвого порошку алюмінієвим може посолити пожежну безпеку виробу в 1,8 рази.

Таблиця 5

Перелік піротехнічних виробів загальнопромислового призначення, на прикладі яких апробувалась методика розрахунку ймовірності $P_1(DЗ)$ [2; 5]

№ п/п	Призначення	Склад заряду піротехнічного спалахувача	Рецептура основного заряду піротехнічної суміші	відносний масовий вміст компонентів суміші, %
1	Трасери для артснарядів (трасери білого вогню)	Суміш на основі Al + NaNO ₃ + парафін + NaF	Ba(NO ₃) ₂	60
			Mg	34
			Фенол-формальдегідна смола	6
2	Освітлювальні снаряди	Суміші на основі Mg + NaNO ₃ + парафін + NaF	Ba(NO ₃) ₂	76,0
			Al – пудра	10,0
			Al – порошок	8,0
			Рицинова олія	2,0
			Сірка	4,0

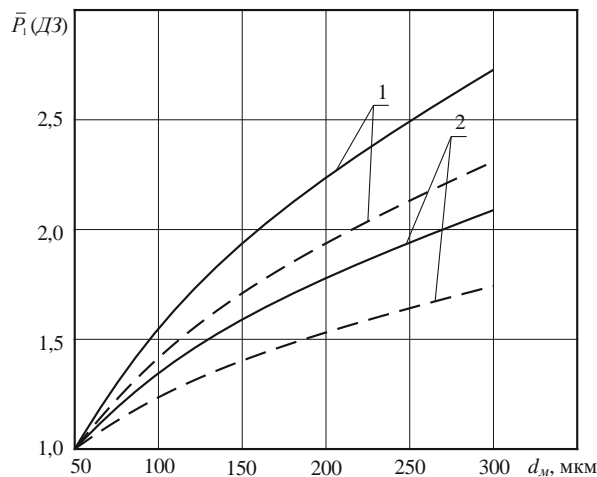


Рис. 8. Залежність відносної ймовірності $\bar{P}_1(ДЗ)$ ($\bar{P}_1(ДЗ) = \frac{P_1(ДЗ)}{P_1^*(ДЗ)}$, де $P_1^*(ДЗ)$ – значення ймовірності для мінімального розміру частинок металевого пального з використанням на практиці діапазонів його зміни [2, 5] пожежонебезпечної руйнування піротехнічних виробів за зовнішньої термічної дії від дисперсності порошків металевих палих та їх вмісту у сумішах, що використовуються у зарядах піротехнічних спалахувачів: 1 – перший виріб із нітратно-алюмінієвим спалахувачем; 2 – другий виріб із нітратно-магнієвим спалахувачем (див. табл. 5); ———— – суміші з $\alpha = 0,4$; - - - - - – суміші з $\alpha = 1,5$

Розроблені науково обґрунтовані методи та науково-технічна база експериментальних даних знайшли практичне використання та впровадження (підтверджено актами впровадження) на підприємствах України, що дозволило:

- підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів із наявністю піротехнічних виробів шляхом мінімізації часів спрацьовування різних типів пожежних сповіщувачів у разі пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються вироби та боєприпаси, залежно від природи горючого матеріалу, а також відстані та висоти їх розміщення від потенційного осередку пожежі;

- знизити ймовірність пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів в умовах їх зберігання та транспортування за наявності зовнішніх термічних дій у 1,5...2,5 рази;

- попереджати передчасні вибухонебезпечні руйнування виробів в умовах їх застосування.

Висновки

В результаті застосування розроблених методів та бази експериментальних даних на підприємствах України в нормативних документах отримано такі результати.

1. На стадії виготовлення виробів шляхом регулювання технологічних

параметрів зарядів сумішей (коефіцієнта надлишку окиснювача, величини та природи добавки органічних та неорганічних речовин, природи та дисперсності металевого пального та ін.) в результаті збільшення температури їх займання у 1,5...2 рази та часу індукції у 2,5...3 рази, підвищено рівень пожежної безпеки об'єктів із наявністю піротехнічних виробів у результаті мінімізації часів спрацьовування різних типів пожежних сповіщувачів у разі пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, а також знижено пожежну ймовірність пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів в умовах їх зберігання та транспортування з урахуванням впливу зовнішніх термічних дій у 1,5...2,5 рази.

2. В умовах застосування виробів з урахуванням впливу зовнішніх термоударних впливів шляхом керування режимами їх запуску (корекцією швидкості та кутів, під якими вони вистрілюються) можна знижувати температуру нагріву металевих корпусів виробів (більше, ніж у 2...2,5 рази) і, тим самим, попереджати передчасні вибухонебезпечні руйнування виробів під час пострілу та польоту.

3. Сформульовано пропозиції щодо внесення змін та доповнень до Національних

стандартів України щодо піротехнічних виробів побутового призначення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Диринга Х., Майер П., Фехнер Д., Болен Я., Кайнер К. У. Настоящее и будущее магниевых сплавов в нашей цивилизации. *Литейное производство*. 2006. № 1. С. 4–7.
2. Ващенко В. А., Кириченко О. В., Лега Ю. Г., Заика П. И., Яценко И. В., Цыбулин В. В. Процессы горения металлизированных конденсированных систем. Київ : Наукова думка, 2008. 745 с.
3. Arkhipov V. A., Bondarchuk S. S., Korotkikh A. G. Nonstationary burning rate of solid propellants. *Nonequilibrium Phenomena: Plasma, Combustion, Atmosphere*. Edited by G. D. Roy, S. M. Frolov and A. M. Starik. Moscow : TORUS PRESS Publ., 2009. Pp. 257–263.
4. Arkhipov V. A., Bondarchuk S. S., Korotkikh A. G. Comparative analysis of methods for measuring the transient burning rate. II. Research results. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2010. Vol. 46, № 5. Pp. 570–577.
5. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Лега Ю. Г., Яценко І. В. Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратомісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів : монографія. Київ : Наукова думка, 2012. 318 с.
6. Filzen M. Feuerwehr löscht Magnesium-Brand im Essener Hafen mit Sand. *Feuerwehr Essen. Pressemitteilung* (дата звернення: 20.10.2015).
7. Filzen M. Feuer in Essener Hafenschiff, brennt gelagertes Aluminiumgranulat. *Feuerwehr Essen. Pressemitteilung* (дата звернення: 23.01.2016).
8. Arbeitskreis V. Evaluierung neuer Löschverfahren bei Metallbränden: Ständige Konferenz der Innenminister und Senatoren der Länder. Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung. Heyrothsberge, 2017.
9. Tepper F., Kaledin L. Combustion characteristics of kerosene containing Alex nano-aluminum. *Unsteady Combustion and Interior Ballistics : Lectures of the 3rd International Workshop*. Saint Petersburg, 2000. Pp. 320–325.
10. ДСТУ 4105-2002. Вироби піротехнічні побутові. Загальні вимоги безпеки [чинні від 2022-06-12]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 2002.
11. ДСТУ 4316-2004. Вироби піротехнічні побутового призначення. Вимоги пожежної безпеки і методи випробувань [чинні від 2004-07-05]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 2004.
12. Arkhipov V. A., Korotkikh A. G., Kuznetsov V. T. Ignition modes of heterogeneous systems containing nanopowders of metals. Pulsed and Continuous Detonation. Edited by G. Roy, S. Frolov, J. Sinibaldi. Moscow : TORUS PRESS Ltd., 2006. Pp. 84–90.
13. Jayaraman K., Anand K. V., Chakravarthy S. R., Sarathi R. Effect of nano-aluminium in plateauburning and catalyzed composite solid propellant combustion. *Combustion and Flame*. 2009. Vol. 156. Pp. 1662–1673.
14. Makoto Kohga, Kayoko Okamoto. Thermal decomposition behaviors and burning characteristics of ammonium nitrate /polytetrahydrofuran/ glycerin composite propellant. *Combustion and Flame*. 2011. Vol. 158. Pp. 573–582.
15. Gromov A. A., Pautova Yu. I., Korotkikh A. G. et al. Interaction of powdery Al, Zr and Ti with atmospheric nitrogen subsequent nitride formation under the metal powder combustion in air. *Powder Technology*. 2011. Vol. 214. Pp. 229–236.
16. Ohkura Yuma, Pratap M. Rao, Xiaolin Zheng. Flash ignition Al nanoparticles : mechanism and applications. *Combustion and Flame*. 2011. Vol. 158. Pp. 2544–2548.
17. Ващенко В. А., Антонюк В. С., Тимчик Г. С., Яценко І. В., Бондаренко М. О., Кириченко О. В., Рудь М. П. Основи теплоперенесення в елементах оптичного приладобудування : навч. посіб. Київ : НТУУ “КПІ”, 2012. 412 с.
18. Ковалишин В. В., Марич В. М., Лозинський Р. Я. Проблеми гасіння магнію та його сплавів. *Пожежна безпека*. 2016. № 28. С. 58–63.
19. Ковалишин В. В., Марич В. М., Кирилів Я. Б. Дослідження хімічних речовин як складників вогнегасних порошків для гасіння легких металів. *Пожежна безпека*. 2016. № 29. С. 46–56.
20. Ковалишин В. В., Марич В. М. Проблеми гасіння магнію та його сплавів. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації : матер. Міжнар. наук.-практ. конф.* Львів : ЛДУ БЖД, 2016. С. 304–305.
21. Марич В. М., Ревуцький А. В., Гук Р. І. Забезпечення безпеки у виробництвах, де використовується магній та його сплави. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації : матер. Міжнар. наук.-практ. конф.* Львів : ЛДУ БЖД, 2016. С. 316–318.
22. Schlüsselmayr Ch. Druckgießerei in Flammen – Feuerwehr kämpft vier Tage gegen Magnesiumbrand. *Ch. Schlüsselmayr. Blaulicht*. 2016. № 3. Pp. 4–8.
23. Schmalfuß H. Magnesium erschwert Löscharbeiten an Pkw. *Feuerwehr-Magazin*. 2016. № 5. P. 8.
24. Tsapko Y., Guzii S., Remenets M., Kravchenko A., Tsapko O. Evaluation of effectiveness of wood fire protection upon exposure to flame of magnesium. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 4, № 10 (82). Pp. 31–33.

25. Kovalyshyn V. V., Marych V. M., Novitskiy Y. M., Gusar B. M., Chemetskiy V. V., Minis O. L. Improvement of a discharge nozzle damping attachment to oppress fires of class D. *Eastern-European Journal of Enterprise Technogies*. 2018. Vol. 5, № 5 (95). Pp. 68–76.
26. Ващенко В. А., Заїка П. І., Стащенко С. І., Яценко І. В. Основні властивості компонентів системи магній + нітрат натрію в умовах горіння : навч. посіб. Під ред. д. т. н., проф. В. А. Ващенко. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля МВС України, 2003. 189 с.
27. Кириченко О. В., Цыбулин В. В., Яценко И. В., Ващенко В. А. Моделирование пожаровзрывоопасных режимов горения нитратных систем при применении пиротехнических изделий. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2008. № 4. С. 35–41.
28. Кириченко О. В. Определение участков на поверхности металлических корпусов пиротехнических изделий, подвергающихся разрушениям в условиях эксплуатации. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2008. № 1. С. 149–154.
29. Кириченко О. В. Моделирование предельных, неустойчивых режимов горения пиротехнических нитратных систем с учетом агломерации металлического горючего. *Науковий вісник УкрНДЦПБ*. 2008. № 1 (17). С. 78–86.
30. Ващенко В. А., Кириченко О. В., Акиншин В. Д., Цыбулин В. В., Яценко И. В. Комплекс испытательных установок, моделирующих реальные условия применения пиротехнических нитратосодержащих изделий. *Науковий вісник УкрНДЦПБ*. 2009. № 1 (19). С. 127–137.
31. Кириченко О. В., Заика П. И., Цыбулин В. В., Яценко И. В., Ващенко В. А. Влияние повышенных температур нагрева и внешних давлений на режимы горения пиротехнических нитратных систем. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2008. № 3. С. 172–176.
32. Кириченко О. В., Цыбулин В. В., Яценко И. В., Ващенко В. А. Моделирование пожаровзрывоопасных режимов горения нитратных систем при применении пиротехнических изделий. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2008. № 4. С. 35–41.
33. Кириченко О. В. Повышение эффективности пиротехнических нитратосодержащих изделий в условиях их применения. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2009. № 2. С. 89–94.
34. Кириченко О. В. Дослідження впливу температури нагріву та зовнішнього тиску на залежності швидкості горіння ПНС від співвідношення компонентів та концентраційні межі горіння. *Труди Одеського національного політехнічного університету*. 2010. Вып. 2 (6). С. 191–196.
35. Кириченко О. В., Акиншин В. Д., Ващенко В. А., Цыбулин В. В. Термодинамичні методи прогнозування пожежонебезпечних властивостей високометалізованих піротехнічних нітратно-металічних сумішей в умовах зовнішніх термовпливів. *Проблемы пожарной безопасности*. 2011. № 30. С. 104–106.
36. Кириченко О. В., Налева Г. В. Вплив температури нагріву на швидкість та вибухонебезпечні режими горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей. *Труди Одеського національного політехнічного університету*. 2012. Вып. 2 (39). С. 143–147.
37. Кириченко О. В. Створення бази даних по швидкостям та вибухонебезпечним режимам горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2012. № 3. С. 88–90.
38. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цыбулин В. В. Пожежонебезпечні термовпливи на поверхню металевих корпусів піротехнічних виробів в умовах пострілу та польоту. *Проблемы пожарной безопасности*. 2012. № 32. С. 98–112.
39. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цыбулин В. В., Тупицкий В. М. Экспериментально-статистичні моделі для отримання бази даних по швидкості та вибухонебезпечним режимам горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термовпливів. *Актуальні проблеми управління у сфері цивільного захисту : матер. І Всеукр. наук.-практ. конф.* Харків : Національний університет цивільного захисту України, 2012. С. 122–126.
40. Кириченко О. В. Математичне моделювання процесу нагріву металевих корпусів піротехнічних виробів в умовах пострілу та польоту. *Науковий вісник УкрНДЦПБ*. 2013. № 1 (27). С. 173–186.
41. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цыбулин В. В., Тупицкий В. М. Швидкість та межі горіння піротехнічних нітратно-магнієвих сумішей в умовах зовнішніх термовпливів. *Проблемы пожарной безопасности*. 2013. № 34. С. 73–95.
42. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Тищенко Є. О. Визначення допустимих режимів нагріву піротехнічних сумішей при їх експлуатації. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2018. № 2. С. 5–11.
43. Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Кириченко О. В. Пожежна небезпека піротехнічних виробів при відповідному впливі міцності зарядів піротехнічних сумішей. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист : матер. ІХ Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. уч.* Черкаси, 2019. С. 48–49.
44. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А., Колінько С. О., Цыбулин В. В. Дослідження впливу міцності зарядів піротехнічних нітратно-металевих сумішей на пожежну безпеку виробів на їх основі. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2019. № 3. С. 56–67.

45. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А., Колінько С. О., Бутенко Т. І., Цибулін В. В. Визначення критичних режимів розвитку процесів горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2020. № 2. С. 123–133.

46. Козяр Н. М. Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на швидкість та вибухонебезпечні режими горіння піротехнічних нітратно-металізованих сумішей з добавками органічних речовин. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2023. № 2. С. 89–99.

47. Козяр Н. М. Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термоударних впливів надзвукового потоку повітря на поверхню циліндричних металевих оболонок зарядів піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах їх застосування. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. Т. 7, № 1. С. 33–44.

48. Козяр Н. М. Запобігання передчасного пожежовибухонебезпечного спрацьовування піротехнічних сумішей в умовах пострілу та польоту. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. Т. 7, № 2. С. 133–151.

49. Козяр Н. М., Кириченко О. В., Ковбаса В. О., Кириченко Є. П., Ващенко В. А., Колінько С. О., Цибулін В. В. Закономірності впливу чинників на швидкість розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей на основі кисневмісних окиснювачів та металевих пальних. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2023. № 1. С. 72–81.

50. Козяр Н. М., Кириченко О. В., Ковбаса В. О., Дядюшенко О. О., Ващенко В. А., Колінько С. О. Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів на піротехнічні вироби на основі нітратно-металевих сумішей в умовах їх зберігання та транспортування. *Науковий вісник "Цивільний захист та пожежна безпека"*. 2023. № 2 (16). С. 42–56.

51. Козяр Н., Кириченко О., Ващенко В., Кириченко Є., Ковбаса В., Колінько С., Томенко М. Запобігання пожежовибухонебезпечним займанням піротехнічних металізованих сумішей з добавками неорганічних речовин. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2022. Т. 6, № 2. С. 15–26.

REFERENCES

1. Dyrynha X., Mayer P., Fechner D., Bolen Iy. and Kainer K. *Nastoyashcheye i budushcheye magniyevykh splavov v nashey tsivilizatsii* [The present and future of magnesium alloys in our civilization]. *Liteynoye proizvodstvo* [Foundry Production]. 2006., no. 1, pp. 4–7. (in Russian).

2. Vashchenko V.A., Kyrychenko O.V., Lega Yu.G., Zaika P.I., Yatsenko I.V. and Tsybulin V.V. *Protsessy gorennya metallizirovannykh kondensirovannykh sistem* [Combustion processes of metallized condensed systems]. Kyiv: Naukova dumka, 2008, 745 p. (in Russian).

3. Arkhipov V.A., Bondarcbluk S.S. and Korotkikh A.G. Nonstationary burning rate of solid propellants. *Nonequilibrium Phenomena : Plasma, Combustion, Atmosphere*. Edited by G.D. Roy, S.M. Frolov and A.M. Starik. Moscow : TORUS PRESS Publ., 2009, pp. 257–263.

4. Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S. and Korotkikh A.G. Comparative analysis of methods for measuring the transient burning rate. II. Research results. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2010, vol. 46, no. 5, pp. 570–577.

5. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Lega Y.G. and Yatsenko I.V. *Osnovy pozhezhnoyi bezpeky pirotekhnichnykh nitratovmisnykh vyrobiv v umovakh zovnishnykh termovplyviv* [Fundamentals of fire safety of pyrotechnic nitrate-containing products under conditions of external thermal effects: monograph]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 2012, 318 p. (in Ukrainian).

6. Filzen M. Feuerwehr löscht Magnesium-Brand im Essener Hafen mit Sand. *Feuerwehr Essen. Pressemitteilung* (data access: 20.10.2015). (in German).

7. Filzen M. Feuer in Essener Hafenschiff, brennt gelagertes Aluminiumgranulat. *Feuerwehr Essen. Pressemitteilung* (dat access: 23.01.2016). (in German).

8. Arbeitskreis V. Evaluierung neuer Löschverfahren bei Metallbränden : Ständige Konferenz der Innenminister und Senatoren der Länder. Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung. Heyrothsberge, 2017. (in German).

9. Tepper F. and Kaledin L. Combustion characteristics of kerosene containing Alex nano-aluminum. *Unsteady Combustion and Interior Ballistics : Lectures of the 3rd International Workshop*. Saint Petersburg, 2000, pp. 320–325.

10. DSTU 4105-2002. *Vyrobny pirotekhnichni pobutovi. Zahal'ni vymohy bezpeky* [Household pyrotechnic products. General security requirements]. [Valid from 2022-06-12]. Official edition. Kyiv : State Standard of Ukraine, 2002. (State Standard of Ukraine). (in Ukrainian).

11. DSTU 4316-2004. *Vyrobny pirotekhnichni pobutovoho pryznachennya. Vymohy pozhezhnoyi bezpeky i metody vyprobuvan* [Household pyrotechnic products. Fire safety requirements and test methods]. [Valid from 2004-07-05]. Official edition. Kyiv : State Standard of Ukraine, 2004. (State Standard of Ukraine). (in Ukrainian).

12. Arkhipov V.A., Korotkikh A.G. and Kuznetsov V.T. Ignition modes of heterogeneous systems containing nanopowders of metals. *Pulsed and Continuous Detonation*. Edited by G. Roy, S. Frolov, J. Sinibaldi. Moscow : TORUS PRESS Ltd Publ., 2006, pp. 84–90.

13. Jayaraman K., Anand K.V., Chakravarthy S.R. and Sarathi R. Effect of nano-aluminium in plateaubuming and catalyzed composite solid propellant combustion. *Combustion and Flame*. 2009, vol. 156, pp. 1662–1673.

14. Makoto Kohga and Kayoko Okamoto. Thermal decomposition behaviors and burning characteristics of ammonium nitrate /polytetrahydrofuran/ glycerin composite propellant. *Combustion and Flame*. 2011, vol. 158, pp. 573–582.

15. Gromov A.A., Pautova Yu.I., Korotkikh A.G. et al. Interaction of powdery Al, Zr and Ti with atmospheric nitrogen subsequent nitride formation under the metal powder combustion in air. *Powder Technology*. 2011, vol. 214, pp. 229–236.

16. Ohkura Yuma, Pratap M. Rao and Xiaolin Zheng. Flash ignition Al nanoparticles : mechanism and applications. *Combustion and Flame*. 2011, vol. 158, pp. 2544–2548.

17. Vashchenko V.A., Antonyuk V.S., Tymchuk G.S., Yatsenko I.V., Bondarenko M.O., Kyrychenko O.V. and Rud M.P. *Osnovy teploperenesennya v elementakh optychnoho pryladobuduvannya* [Fundamentals of heat transfer in elements of optical instrumentation : tutorial]. Kyiv : NTUU “KPI”, 2012, 412 p. (in Ukrainian).

18. Kovalishyn V.V., Marych V.M. and Lozinsky R.Ya. *Problemy hasynnya mahniyu ta yoho splaviv. Pozhezhna bezpeka* [Problems of quenching magnesium and its alloys]. *Pozhezhna bezpeka* [Fire Security]. 2016, no. 28, pp. 58–63. (in Ukrainian).

19. Kovalishyn V.V., Marych V.M. and Kyryliv Ya.B. *Doslidzhennya khimichnykh rehovyn yak skladnykiv vohnehasnykh poroshkiv dlya hasynnya lehkykh metaliv* [Research of chemical substances as components of fire-extinguishing powders for extinguishing light metals]. *Pozhezhna bezpeka* [Fire Security]. 2016, no. 29, pp. 46–56. (in Ukrainian).

20. Kovalishyn V.V. and Marych V.M. *Problemy hasynnya mahniyu ta yoho splaviv*. [Problems of quenching magnesium and its alloys]. *Pozhezhna ta tekhnohenna bezpeka. Teoriya, praktyka, innovatsiyi : mater. Mizhnar. nauk.-prakt. konf.* [Fire and Technological Safety. Theory, practice, innovations : materials of the International scientific and practical conference]. Lviv : LSU BZD Publ., 2016, pp. 304–305. (in Ukrainian).

21. Marych V.M., Revutskyi A.V. and Huk R.I. *Zabezpechennya bezpeky u vyrobnytstvakh, de vykorystovuyet'sya mahniyu ta yoho splavy* [Ensuring safety in industries where magnesium and its alloys are used]. *Pozhezhna ta tekhnohenna bezpeka* [Fire and Technological Safety. Theory, practice, innovations : materials of the International scientific and practical conference]. Lviv : LSU BZD Publ., 2016, pp. 316–318. (in Ukrainian).

22. Schlüsslmayr Ch. Druckgießerei in Flammen – Feuerwehr kämpft vier Tage gegen Magnesiumbrand. *Ch. Schlüsslmayr. Blaulicht*. 2016, no. 3, pp. 4–8. (in German).

23. Schmalfuß H. Magnesium erschwert Löscharbeiten an Pkw. *Feuerwehr- Magazin*. 2016, no. 5, p. 8. (in German).

24. Tsapko Y., Guzii S., Remenets M., Kravchenko A. and Tsapko O. Evaluation of effectiveness of wood fire protection upon exposure to flame of magnesium. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. 2016, vol. 4, no. 10 (82), pp. 31–33.

25. Kovalyshyn V.V., Marych V.M., Novitskyi Y.M., Gusar B.M., Chemetskiy V.V. and Minis O.L. Improvement of a discharge nozzle damping attachment to oppress fires of class D. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, vol. 5, no. 5 (95), pp. 68–76.

26. Vashchenko V.A., Zayka P.I., Stashenko S.I. and Yatsenko I.V. *Osnovni vlastyvoli komponentiv systemy mahniyu + nitrata natriyu v umovakh horinnya : navch. posib.* [The main properties of the components of the magnesium + sodium nitrate system under combustion conditions: academic : manual]. Under the editorship Ph.D., prof. V.A. Vashchenko. Cherkasy : CHIPB named after Heroes of Chernobyl Publ., Ministry of Internal Affairs of Ukraine, 2003, 189 p. (in Ukrainian).

27. Kyrychenko O.V., Tsybulin V.V., Yatsenko I.V. and Vashchenko V.A. *Modelirovaniye pozharovzryvoopasnykh rezhimov gorennya nitratnykh sistem pri primenenii pirotekhnicheskikh izdeliy* [Modeling of fire and explosion hazardous combustion modes of nitrate systems when using pyrotechnic products]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of Cherkasy State Technological University]. 2008, no. 4, pp. 35–41. (in Russian).

28. Kyrychenko O.V. *Opredele niye uchastkov na poverkhnosti metallicheskikh korpusov pirotekhnicheskikh izdeliy, podvergayushchikhsya razrusheniyam v usloviyakh ekspluatatsii* [Determination of areas on the surface of metal bodies of pyrotechnic products that are subject to destruction under operating conditions]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of Cherkasy State Technological University]. 2008, no. 1, pp. 149–154. (in Russian).

29. Kyrychenko O.V. *Modelirovaniye predel'nykh, neustoychivykh rezhimov gorennya pirotekhnicheskikh nitratnykh sistem s uchetom aglomeratsii metallicheskogo goryuchego* [Modeling of limiting, unstable combustion modes of pyrotechnic nitrate systems taking into account the agglomeration of metal fuel]. *Naukovyy visnyk UkrNDIPB* [Scientific Bulletin of UkrNDIPB]. 2008, no. 1 (17), pp. 78–86. (in Russian).

30. Vashchenko V.A., Kyrychenko O.V., Akinshin V.D., Tsybulin V.V. and Yatsenko I.V. *Kompleks ispytatel'nykh ustanovok, modeliruyushchikh real'nyye usloviya primeneniya pirotekhnicheskikh nitratosoderzhashchikh*

izdeliy [A set of testing facilities that simulate real conditions for the use of pyrotechnic nitrate-containing products]. 2009, no. 1 (19), pp. 127–137. (in Russian).

31. Kyrychenko O.V., Zaika P.I., Tsybulin V.V., Yatsenko I.V. and Vashchenko V.A. *Vliyaniye povyshennykh temperatur nagreva i vneshnikh davleniy na rezhimy gorennya pirotekhnicheskikh nitratnykh sistem* [The influence of elevated heating temperatures and external pressures on the combustion modes of pyrotechnic nitrate systems]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of Cherkasy State Technological University]. 2008, no. 3, pp. 172–176. (in Russian).

32. Kyrychenko O.V., Tsybulin V.V., Yatsenko I.V. and Vashchenko V.A. *Modelirovaniye pozharovzryvoopasnykh rezhimov gorennya nitratnykh sistem pri primenenii pirotekhnicheskikh izdeliy* [Modeling of fire and explosion hazardous combustion modes of nitrate systems when using pyrotechnic products]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of Cherkasy State Technological University]. 2008, no. 4, pp. 35–41. (in Russian).

33. Kyrychenko O.V. *Povysheniye effektivnosti pirotekhnicheskikh nitratosoderzhashchikh izdeliy v usloviyakh ikh primeneniya* [Increasing the efficiency of pyrotechnic nitrate-containing products under the conditions of their use]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of Cherkasy State Technological University]. 2009, no. 2, pp. 89–94. (in Ukrainian).

34. Kyrychenko O.V. *Doslidzhennya vplyvu temperatury nahrivu ta zovnishn'oho tysku na zalezhnosti shvydkosti horinnya PNS vid spivvidnoshennya komponentiv ta kontsentratsiyni mezhi horinnya* [Study of the influence of heating temperature and external pressure on the dependence of the combustion speed of Polymer Nanocomposites on the ratio of components and concentration limits of combustion]. *Trudy Odesskogo natsional'nogo politekhnicheskogo universytetu* [Proceedings of the Odessa National Polytechnic University]. 2010, iss. 2 (6), pp. 191–196. (in Ukrainian).

35. Kyrychenko O.V., Akinshin V.D., Vashchenko V.A. and Tsybulin V.V. *Termodinamichni metody prohozuvannya pozhezhonebezpechnykh vlastyvostey vysokometalizovanykh pirotekhnichnykh nitratno-metalichnykh sumishey v umovakh zovnishnikh termovplyviv* [Thermodynamic methods of predicting the fire-hazardous properties of highly metallized pyrotechnic nitrate-metallic mixtures under conditions of external thermal influences]. *Problemy pozharnoy bezopasnosti* [Problems of Fire Safety]. 2011, no. 30, pp. 104–106. (in Ukrainian).

36. Kyrychenko O.V. and Naleva G.V. *Vplyv temperatury nahrivu na shvydkist' ta vybukhonebezpechni rezhimy horinnya pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishey* [Influence of the heating temperature on the speed and explosive modes of combustion of pyrotechnic nitrate-metal mixtures]. *Trudy Odesskogo natsional'nogo politekhnicheskogo universytetu* [Proceedings of the Odessa National Polytechnic University]. 2012, iss. 2 (39), pp. 143–147. (in Ukrainian).

37. Kyrychenko O.V. *Stvorenniya bazy danykh po shvydkostyam ta vybukhonebezpechnym rezhymam horinnya pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishey* [Creation of a database on velocities and explosive modes of combustion of pyrotechnic nitrate-metal mixtures]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2012, no. 3, pp. 88–90. (in Ukrainian).

38. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A. and Tsybulin V.V. *Pozhezhonebezpechni termovplyvy na poverkhnnyu metalevykh korpusiv pirotekhnichnykh vyrobiv v umovakh postrilu ta pol'otu* [Fire-hazardous thermal effects on the surface of metal casings of pyrotechnic products under conditions of shot and flight]. *Problemy pozharnoy bezopasnosti* [Problems of Fire Safety]. 2012, no. 32, pp. 98–112. (in Ukrainian).

39. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Tsybulin V.V. and Tupytskyi V.M. *Ekspyrymental'no-statystychni modeli dlya otrymannya bazy danykh po shvydkosti ta vybukhonebezpechnym rezhymam horinnya pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishey v umovakh zovnishnikh termovplyviv* [Experimental and statistical models for obtaining a database on the speed and explosive modes of combustion of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under conditions of external thermal influences]. *Aktual'ni problemy upravlinnya u sferi tsyvil'noho zakhystu : mater. I Vseukr. nauk.-prakt. konf.* [Actual Management Problems in the Field of Civil Protection : materials of the 1st All-Ukrainian scientific and practical conference]. Kharkiv : National University of Civil Defense of Ukraine, 2012, pp. 122–126. (in Ukrainian).

40. Kyrychenko O.V. *Matematychni modelyuvannya protsesu nahrivu metalevykh korpusiv pirotekhnichnykh vyrobiv v umovakh postrilu ta pol'otu* [Mathematical modeling of the process of heating metal bodies of pyrotechnic products under the conditions of a shot and flight]. *Naukovyy visnyk UkrNDIPB* [Scientific Bulletin of UkrNDICZ]. 2013, no. 1 (27), pp. 173–186. (in Ukrainian).

41. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Tsybulin V.V. and Tupytskyi V.M. *Shvydkist' ta mezhi horinnya pirotekhnichnykh nitratno-mahniyevykh sumishey v umovakh zovnishnikh termovplyviv* [Speed and limits of combustion of pyrotechnic nitrate-magnesium mixtures under conditions of external thermal influences]. *Problemy pozharnoy bezopasnosti* [Problems of Fire Safety]. 2013, no. 34, pp. 73–95. (in Ukrainian).

42. Kyrychenko O.V., Dibrova O.S., Motrichuk R.B. and Tyshchenko E.O. *Vyznachennya dopustymykh rezhymiv nahrivu pirotekhnichnykh sumishey pry yikh ekspluatatsiyi* [Determination of permissible modes of heating of pyrotechnic mixtures during their operation]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2018, no. 2, pp. 5–11. (in Ukrainian).

43. Dibrova O.S., Motrichuk R.B. and Kyrychenko O.V. *Pozhezhna nebezpeka pirotekhnichnykh vyrobiv pry vidpovidnomu vplyvi mitsnosti zaryadiv pirotekhnichnykh sumishey* [Fire hazard of pyrotechnic products under the

corresponding influence of strength of charges of pyrotechnic mixtures]. *Nadzvychny sytuatsiyi: bezpeka ta zakhyst : mater. IX Vseukr. nauk.-prakt. konf. z mizhnar. uch.* [Emergency Situations : Security and Protection : materials of the IX All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation]. Cherkasy, 2019, pp. 48–49. (in Ukrainian).

44. Kyrychenko O.V., Dibrova O.S., Motrichuk R.B., Vashchenko V.A., Kolinko S.O. and Tsybulin V.V. *Doslidzhennya vplyvu mitsnosti zaryadiv pirotekhnichnykh nitrato-metalevykh sumishey na pozhezhnu bezpeku vyrobiv na yikh osnovi* [Study of the impact of the strength of charges of pyrotechnic nitrate-metal mixtures on the fire safety of products on their basis]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2019, no. 3, pp. 56–67. (in Ukrainian).

45. Kyrychenko O.V., Dibrova O.S., Motrichuk R.B., Vashchenko V.A., Kolinko S.O., Butenko T.I. and Tsybulin V.V. *Vyznachennya krytychnykh rezhymiv rozvytku protsesiv horinnya pirotekhnichnykh nitrato-metalevykh sumishey v umovakh zovnishnikh termichnykh diy* [Determination of critical modes of development of pyrotechnic combustion processes of nitrate-metal mixtures under conditions of external thermal effects]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2020, no. 2, pp. 123–133. (in Ukrainian).

46. Kozyar N.M. *Zakonomirnosti vplyvu tekhnolohichnykh parametriv ta zovnishnikh chynnykiv na shvydkist' ta vybukhonebezpechni rezhymy horinnya pirotekhnichnykh nitrato-metalizovanykh sumishey z dobavkamy orhanichnykh rehovyn* [Patterns of influence of technological parameters and external factors on the speed and explosive modes of combustion of pyrotechnic nitrate-metalized mixtures with additives of organic substances]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2023, no. 2, pp. 89–99. (in Ukrainian).

47. Kozyar N.M. *Vyznachennya krytychnykh znachen' parametriv zovnishnikh termoudarnykh vplyviv nadzvukovoho potoku povitrya na poverkhnuyu tsylindrychnykh metalevykh obolonok zaryadiv pirotekhnichnykh nitrato-metalevykh sumishey v umovakh yikh zastosuvannya.* [Determination of critical values of parameters of external thermal shock effects of supersonic air flow on the surface of cylindrical metal shells of charges of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under the conditions of their use]. *Nadzvychny sytuatsiyi : poperedzhennya ta likvidatsiya* [Emergency Situations : Prevention and Elimination]. 2023, vol. 7, no. 1, pp. 33–44. (in Ukrainian).

48. Kozyar N.M. *Zapobihannya peredchasnoho pozhezhovybukhonebezpechnoho sprats'ovuvannya pirotekhnichnykh sumishey v umovakh postrilu ta pol'otu.* *Nadzvychny sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya* [Prevention of premature fire-explosive triggering of pyrotechnic mixtures under conditions of shot and flight]. *Nadzvychny sytuatsiyi : poperedzhennya ta likvidatsiya* [Emergency Situations : Prevention and Elimination]. 2023, vol. 7, no. 2, pp. 133–151. (in Ukrainian).

49. Kozyar N.M., Kyrychenko O.V., Kovbasa V.O., Kyrychenko E.P., Vashchenko V.A., Kolinko S.O. and Tsybulin V.V. *Zakonomirnosti vplyvu chynnykiv na shvydkist' rozvytku protsesu horinnya pirotekhnichnykh sumishey na osnovi kysnevnisnykh oksyenyuvachiv ta metalevykh pal'nykh* [Patterns of influence of factors on the speed of process development combustion of pyrotechnic mixtures based on oxygen-containing oxidizers and metal fuels]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2023, no. 1, pp. 72–81. (in Ukrainian).

50. Kozyar N.M., Kyrychenko O.V., Kovbasa V.O., Dyadyushenko O.O., Vashchenko B.A. and Kolinko S.O. *Vyznachennya krytychnykh znachen' parametriv zovnishnikh termichnykh vplyviv na pirotekhnichni vyroby na osnovi nitrato-metalevykh sumishey v umovakh yikh zberihannya ta transportuvannya* [Determination of critical values of parameters of external thermal effects on pyrotechnic products based on nitrate-metal mixtures in the conditions of their storage and transportation]. *Naukovyy visnyk "Tsyvil'nyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka"* [Scientific Bulletin "Civil Defense and Fire Safety"]. 2023, no. 2 (16), pp. 42–56. (in Ukrainian).

51. Kozyar N., Kyrychenko O., Vashchenko V., Kyrychenko E., Kovbasa V., Kolinko C. and Tomenko M. *Zapobihannya pozhezhovybukhonebezpechnym zaymannyam pirotekhnichnykh metalizovanykh sumishey z dobavkamy neorhanichnykh rehovyn* [Prevention of fire-explosive ignition of pyrotechnic metalized mixtures with additives of inorganic substances]. *Nadzvychny sytuatsiyi : poperedzhennya ta likvidatsiya* [Emergency Situations : Prevention and Elimination]. 2022, vol. 6, no. 2, pp. 15–26. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 11.04.2024.