

[0000-0002-2373-2429] **Є. П. Кириченко**¹,
e-mail: kyrychenkojp@gmail.com
[0000-0003-2277-7972] **В. М. Гвоздь**¹, канд. техн. наук, професор,
e-mail: chipb@dsns.gov.ua
[0000-0002-0240-1807] **О. В. Кириченко**¹, д-р техн. наук, професор,
e-mail: okskir@meta.ua
[0000-0002-9479-669X] **В. О. Ковбаса**¹,
e-mail: victory101@ukr.net
[0000-0003-0722-9353] **В. А. Ващенко**², д-р техн. наук, професор,
e-mail: v.vaschenko@chdtu.edu.ua
[0000-0003-3065-5772] **Т. І. Бутенко**², канд. техн. наук, доцент,
e-mail: but82016@gmail.com
[0000-0002-2805-572X] **В. В. Цибулін**²
e-mail: tsybulin22@gmail.com

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України,
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна
²Черкаський державний технологічний університет,
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ СУМІШЕЙ ШЛЯХОМ ВВЕДЕННЯ ДОБАВОК ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН

Встановлено широкий клас органічних речовин, введення яких у вигляді невеликих добавок (до 10 %) у склад піротехнічних сумішей на основі порошків металевих палих та окиснювачів приводить до зменшення швидкості та підвищення стійкості процесу їх горіння до зовнішніх впливів (підвищені температури нагріву, зовнішні тиски) для різних діапазонів зміни технологічних параметрів сумішей (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення). Зі зменшенням коефіцієнта надлишку окиснювача у суміші залежність швидкості горіння від величини добавки підсилюється, незалежно від її дисперсності. Добавки стеарину та тіоколу у суміші $Al + NaNO_3$ та $Zr + NaNO_3$, навпаки, призводять до збільшення швидкості горіння цих сумішей, що обумовлено підвищенням реакційної здатності Al та Zr у присутності газоподібних продуктів розкладання стеарину та тіоколу при підвищених температурах нагріву, які сприяють різкому зниженню температури займання частинок металевих палих та призводять до зниження стійкості процесу розвитку горіння сумішей, особливо в умовах підвищених зовнішніх тисків (збільшення показника ν в законі горіння зі зростанням величини добавки).

Ключові слова: піротехнічні суміші, органічні речовини, швидкість горіння, стійкість процесу горіння, зовнішні впливи.

Вступ. З кожним роком в Україні та у світі зростає кількість пожеж і вибухів в умовах зберігання, транспортування та застосування загальнопромислових піротехнічних виробів, які спричиняють руйнування об'єктів, людські жертви та завдають значних матеріальних збитків [1]. Аналіз зазначених випадків показує, що загорянню і подальшому пожежонебезпечному руйнуванню виробів, як правило, передують зовнішні термічні дії, яким вони піддаються, наприклад, при пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, в умовах їх транспортування при займанні близько розташованих об'єктів, а

також під час пострілу та польоту виробів в умовах їх запуску тощо. Це призводить до передчасного займання і вибухонебезпечного розвитку горіння зарядів на основі ущільнених сумішей з порошків окиснювачів (нітратів лужних та лужноземельних металів, фторопластів, оксидів металів та ін.) і металевих палих (Al , Mg , Ti , Zr та ін.), що входять до складу виробів, та подальших пожежонебезпечних руйнувань.

Тому суттєвого практичного значення набуває попередження вимушених пожежонебезпечних руйнувань виробів у разі впливу зовнішніх термічних дій. Методи попере-

дження мають ґрунтуватися на дослідженнях процесів розвитку горіння зарядів піротехнічних сумішей у різних зовнішніх умовах.

Нині питання впливу різних технологічних параметрів (співвідношення компонентів та їх дисперсності, коефіцієнта ущільнення та ін.) і зовнішніх умов (температур нагріву, зовнішніх тисків тощо) на процеси розвитку горіння зазначених двокомпонентних піротехнічних сумішей достатньо досліджені [2-9]: встановлено закономірності їх впливу на швидкість горіння; визначено діапазони зміни параметрів для різних зовнішніх умов, у межах яких спостерігається стійкий вибухобезпечний розвиток процесу горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. Однак відсутні систематизовані дослідження впливу на процес горіння зазначених сумішей добавок різних органічних речовин, які, як показують окремі дослідження для добавок парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену [9-17], сприяють не тільки покращенню технології виготовлення їх зарядів, а й приводять до уповільнення процесу горіння сумішей з подальшою його стабілізацією.

Мета та задачі досліджень. *Мета роботи:* встановлення закономірностей впливу добавок різних органічних речовин у склад піротехнічних сумішей з порошоків окиснювачів та металевих палих на швидкість та стійкість процесу розвитку їх горіння.

Задачами досліджень є:

- визначення сукупності добавок органічних речовин, що приводять до зниження швидкості горіння сумішей та підвищення стійкості процесу їх горіння для різних технологічних параметрів та зовнішніх умов;
- встановлення добавок органічних речовин, введення яких у суміші може призводити до зростання швидкості та зниження стійкості процесу розвитку їх горіння в умовах зовнішніх дій (підвищені температури нагріву, зовнішні тиски).

Виклад основного матеріалу. Зразки піротехнічних сумішей виготовлялися з використанням стандартних методів пресування порошоків окиснювачів (нітрати лужних та лужноземельних металів (NaNO_3 , $\text{Sr(NO}_3)_2$, $\text{Ba(NO}_3)_2$ та ін.), фторопласти (Ф-3 та ін.), оксиди металів (MnO_2 , BaO_2 та ін.) та металевих палих (Mg, Al, Ti, Zr та ін.) з добавками органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, тіоколу, уротропіну, метальдегіду, гексогену, каніфолі та ін.) [7, 8]. Співвідношення компонентів у сумішах ха-

рактеризується коефіцієнтом надлишку окиснювача α , їх густина – коефіцієнтом ущільнення K_y , а дисперсність використовуваних промисловістю порошоків окиснювачів та металевих палих – середніми розмірами частинок окиснювачів $d_{ок}$ (мкм) та металевих палих d_m (мкм), які розраховувалися за прийнятими у піротехнічній промисловості методиками.

Середнє значення швидкості горіння сумішей визначалося за формулою $u = \frac{h}{\tau}$ (h – висота зразка, м; τ – середній час згорання зразка, с); при цьому відносна похибка вимірювання u не перевищувала 5...7 %. Експериментальні криві будувалися з використанням сучасних методів регресійного та кореляційного аналізів.

Результати досліджень. У результаті проведених досліджень встановлено, що у випадку суміші Mg + NaNO_3 усі вивчені добавки органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену) приводять тільки до зменшення швидкості горіння. При одному й тому ж значенні α та вмісті добавки ε ефективність зниження швидкості горіння зростає у ряду нафталін – парафін – антрацен – стеарин (рис. 1). При цьому найбільш сильно на залежність $u = f(\varepsilon)$ впливає коефіцієнт надлишку окиснювача. Так, на прикладі суміші з добавкою нафталіну видно, що зі зменшенням α залежність $u = f(\varepsilon)$ підсилюється. Дисперсність добавки нафталіну на її ефективності практично не позначається (таблиця 1). Крім цього, введення у суміші Mg + NaNO_3 добавок органічних речовин у деяких випадках призводить також до зміни характеру залежності швидкості горіння від параметрів вихідної суміші та зовнішніх умов (таблиця 2, рисунки 2, 3). Особливість впливу стеарину на різке зменшення швидкості горіння сумішей Mg + NaNO_3 може бути пов'язана з тим, що CO_2 , CO та H_2O , які виділяються при розкладанні стеарину [2], здатні окиснювати Mg ще до початку розкладання NaNO_3 з утворенням на його поверхні товстої оксидної плівки, що погіршує взаємодію Mg з киснем. Результати дослідження окиснення Mg у вуглекислому газі при розкладанні NaNO_3 [4] показали, що процес підпорядковується лінійному закону й енергія активації дорівнює 155,5 кДж/моль, тоді як енергія активації окиснення у кисні та у повітрі дорівнює 211,4 кДж/моль. Порівняння енергій активації показує, що швидкість окиснення Mg у вуглекислому газі може бути навіть вищою, ніж у кисні та у повітрі.

Таблиця 1. Значення швидкості горіння u (10^{-3} м/с) суміші 65 % МПФ-4 + 25 % NaNO_3 + 10 % нафталіну для різної дисперсності органічної добавки (при атмосферному тиску)

Розмір частинок нафталіну, мкм	$K_Y = 0,9$	$K_Y = 0,8$
450 та більше	14	16
250...450	14	17
150...250	14	16

Примітка. $d_{ок} \leq 280$ мкм; $T_0 = 293$ К; діаметр зразків – 0,145 м; висота – 0,230 м; оболонка паперова; $K_Y = 0,94$.

Таблиця 2. Залежність швидкості горіння сумішей NaNO_3 + МПФ-4 + органічна добавка від параметрів вихідної суміші та зовнішніх умов

Добавка	Вміст добавок, % (понад 100 %)	α вихідної суміші	Діапазон зміни тиску	Закон швидкості горіння (u , 10^{-3} м/с)
Нафталін	10	0,35	0,1...1,0 МПа	$u = 14,7\bar{P}^{0,13}$
	20	0,38	0,1...1,0 МПа	$u = 11,7\bar{P}^{0,12}$
	40	0,85	0,1...1,0 МПа	$u = 5,9\bar{P}^{0,23}$
Парафін	10	0,35	0,1...1,0 МПа	$u = 14,2\bar{P}^{0,22}$
	35	0,54	0,1...1,0 МПа	$u = 7,3\bar{P}^{0,27}$
Стеарин	5	1,1	13,3...101 кПа	$u = 0,2\bar{P}^{0,34}$
	10	0,35	13,3...101 кПа	$u = 0,4\bar{P}^{0,54}$

Примітка. $\bar{P} = \frac{P}{P_a}$ (P – поточний тиск, P_a – атмосферний тиск); $d_{ок} \leq 280$ мкм; $T_0 = 293$ К; діаметр зразків – $1,8 \cdot 10^{-2}$ м; висота зразків – $5,5 \cdot 10^{-2}$ м; оболонка металева; $K_Y = 0,98$.

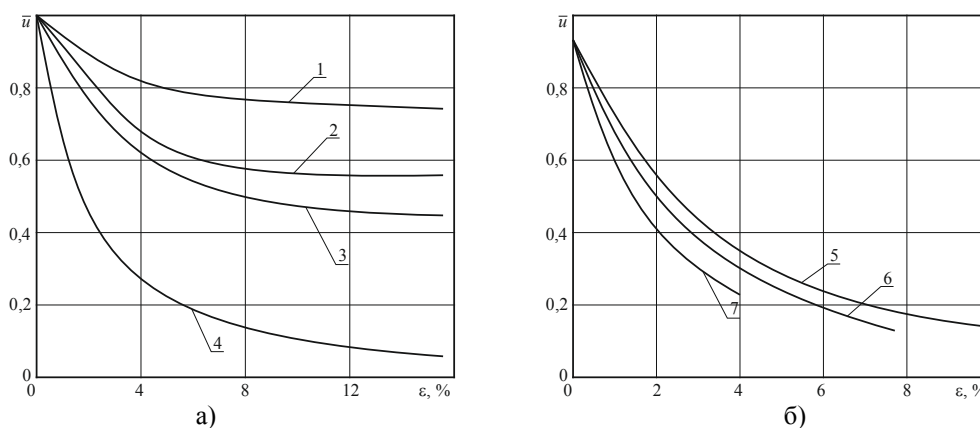


Рисунок 1. Залежність відносної швидкості горіння $\bar{u}$ ($\bar{u} = \frac{u}{u_0}$, де $u_0 = u|_{\epsilon=0}$) суміші $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$ при атмосферному тиску від масової частки органічної добавки ($K_Y = 0,9$; МПФ-4; $d_m = 74,5$ мкм; $d_{ок} = 100...140$ мкм; $T_0 = 293$ К):
а) нафталіну (1), парафіну (2), антрацену (3), стеарину (4) при $\alpha = 0,3$;
б) нафталіну при $\alpha = 0,7$ (5), $0,37$ (6), $0,21$ (7)

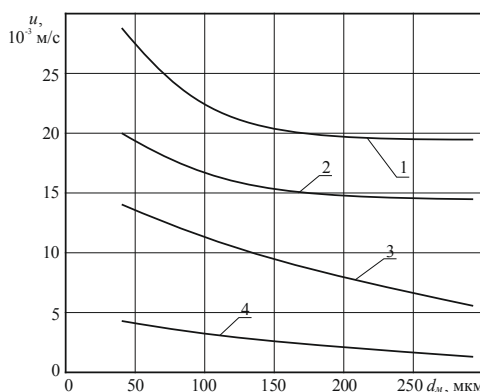


Рисунок 2. Вплив добавки парафіну на залежність швидкості горіння суміші $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$ від дисперсності порошку Mg ($\alpha = 1,0$; $d_{ок} = 250$ мкм; $K_Y = 0,8$):
1 – без добавки; 2–5 % добавки; 3–10 % добавки; 4–15 % добавки

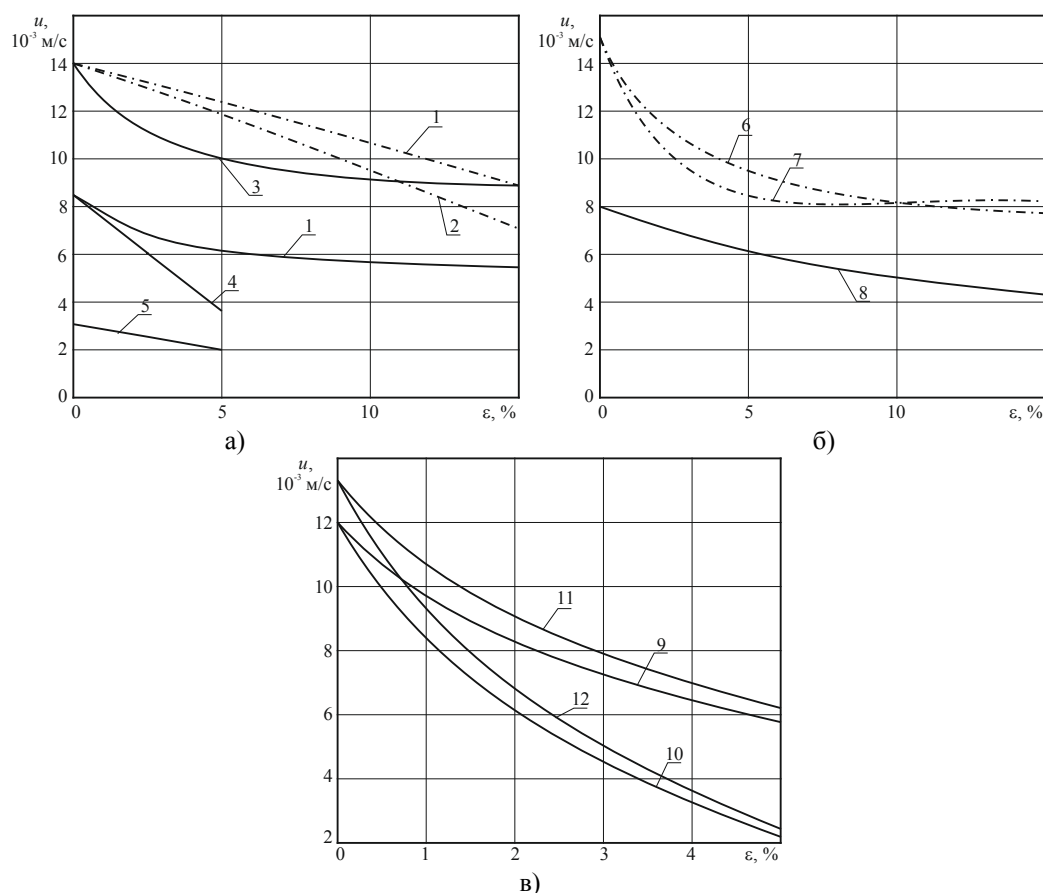


Рисунок 3. Вплив співвідношення компонентів у суміші $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$ на залежність швидкості горіння від масової частки органічної добавки ($K_y = 0,9$; МПФ-2; $d_m = 182 \text{ мкм}$; $d_{ок} = 250 \text{ мкм}$):

а) уротропін (1); метальдегід (2); гексоген (3); каніфоль (4); ідитол (5)

(— — суміш 58,3 % NaNO_3 + 41,7 % МПФ-2; - - - - суміш 40 % NaNO_3 + 60 % МПФ-2;

б) паранітробензольдегід (6); ПДМАБ (7); гексахлорбензол (8)

(— — суміш 58,3 % NaNO_3 + 41,7 % МПФ-2; - - - - суміш 40 % NaNO_3 + 60 % МПФ-2;

в) стехіометрична суміш $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$ з добавкою ідиолу (9) ($d_m = 94 \text{ мкм}$; $d_{ок} = 260 \text{ мкм}$);

стеарину (10) ($d_m = 94 \text{ мкм}$; $d_{ок} = 260 \text{ мкм}$); ідиолу (11) ($d_m = 94 \text{ мкм}$; $d_{ок} = 54 \text{ мкм}$);

стеарину (12) ($d_m = 94 \text{ мкм}$; $d_{ок} = 54 \text{ мкм}$)

Обговорення результатів. Встановлено, що, на відміну від суміші $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$, добавки стеарину у суміш $\text{Ti} + \text{NaNO}_3$ впливають на швидкість горіння значно слабше. Це можна пов'язати з відсутністю хімічних реакцій між CO_2 та Ti аж до 973 К. Крім цього, добавки стеарину у суміш $\text{Zr} + \text{NaNO}_3$, навпаки, можуть викликати зростання швидкості горіння.

Аномальне збільшення швидкості горіння сумішей при введенні добавки стеарину обумовлене підвищенням реакційної здатності Zr у присутності газоподібних продуктів розкладання стеарину, що сприяють різкому зниженню температури його займання. Таким чином, природа металевих пального помітно змінює характер впливу органічних добавок на швидкість горіння.

Результати експериментальних досліджень щодо впливу добавок органічних речовин на швидкість горіння інших сумішей металевих палив (магнію та титану) з окиснювачами (нітратами стронцію та барію, перекисами марганцю та барію, фторопластами) наведено у таблиці 3 і на рисунках 4–7. З цих даних видно, що органічні добавки можуть істотно впливати не тільки на величину швидкості горіння, але й на характер її залежностей від різних параметрів. За дією на швидкість горіння суміші Mg з Ф-3 органічні добавки можуть бути розташовані в ряд: стеаринова кислота, себацінова кислота, сечовина, уротропін, фталева кислота, нітрогуанідин, парафін. При цьому для парафіну спостерігається суттєва залежність від вмісту добавки ϵ : при $\epsilon \leq 8,5 \%$ він за ефективністю останній у за-

значеному ряду; при $\varepsilon > 8,5\%$ його ефективність різко зростає. Добавки органічних речовин у суміші Mg з Ф-3 різко послаблюють залежність швидкості горіння від тиску, причому у деяких випадках реалізується закон горіння з $\nu = 0$. Цікаво відзначити, що органіч-

ні добавки (парафін, стеарин, антрацен та нафталін) зазвичай приводять до зниження швидкості горіння сумішей Al + NaNO_3 , а добавки тіоколу в тих же кількостях, навпаки, можуть призводити до підвищення швидкості горіння.

Таблиця 3. Значення швидкості горіння u (10^{-3} м/с) нітратно-титанових сумішей з різними органічними добавками (масова частка добавки $\varepsilon = 0,06$; тиск атмосферний)

Добавка	$\text{NaNO}_3 + \text{Ti}$				$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + \text{Ti}$			
	Ti – 41 %		Ti – 59 %		Ti – 32 %		Ti – 52 %	
	$K_y = 0,7$	$K_y = 0,9$	$K_y = 0,7$	$K_y = 0,9$	$K_y = 0,7$	$K_y = 0,9$	$K_y = 0,7$	$K_y = 0,9$
Без добавки	11,8	7,2	18,1	12,8	12,3	10,3	24,0	20,8
Смола 214	8,5	5,9	12,0	9,7	8,9	7,1	13,6	11,7
Ідитол	6,7	5,6	11,4	7,9	7,4	6,2	11,7	10,1
Нітроплівка	9,6	7,2	14,1	10,1	10,7	8,9	15,3	13,8
Тіокол	6,8	4,9	10,2	7,4	6,6	6,7	10,1	7,3
Бутилкаучук	5,9	4,6	8,9	6,3	6,2	5,4	10,4	7,6
Уротропін	4,8	3,4	7,2	5,9	5,4	4,3	9,1	7,9
Полівінілхлорид	6,3	4,8	8,3	6,4	7,1	5,6	10,7	8,8
Гексахлорпарахлорид	6,9	4,7	7,1	5,1	7,6	6,1	11,2	8,5
Пентахлорфенол	4,2	3,3	6,2	5,9	5,3	4,1	7,3	6,1
Фторопласт 32 – Л	6,8	5,4	8,5	7,0	8,8	7,2	14,7	12,0
Фторкаучук СКФ – 32	5,9	4,6	7,7	6,7	8,1	6,7	12,7	10,9

Примітка. Питома поверхня порошку титана (ПТМ) $S_{\text{птт}} = 222 \text{ м}^2/\text{кг}$; $d_{\text{ок}} \leq 250 \text{ мкм}$; $T_0 = 293 \text{ К}$; діаметр зразків – $2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; висота зразків – $2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; оболонка паперова.

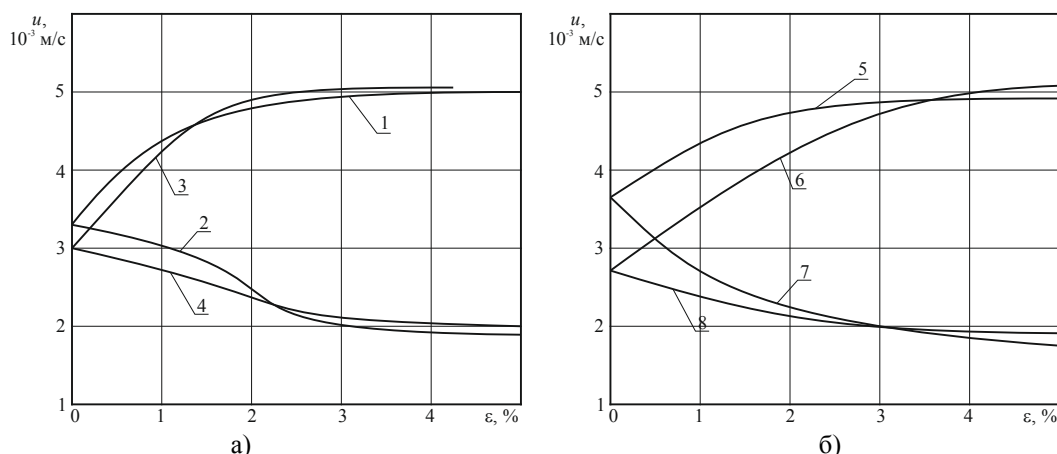


Рисунок 4. Залежності швидкості горіння стехіометричних сумішей Mg + $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ (а) та Mg + $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ (б) від масової частки органічної добавки ($K_y = 0,9$; $d_m = 94 \text{ мкм}$; оболонка паперова):

- а) суміш Mg + $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ + ідитол (1) ($d_{\text{ок}} = 260 \text{ мкм}$); суміш Mg + $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ + стеарин (2) ($d_{\text{ок}} = 260 \text{ мкм}$); суміш Mg + $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ + ідитол (3) ($d_{\text{ок}} = 54 \text{ мкм}$); суміш Mg + $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ + стеарин (4) ($d_{\text{ок}} = 54 \text{ мкм}$);
 б) суміш Mg + $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ + ідитол (5) ($d_{\text{ок}} = 260 \text{ мкм}$); суміш Mg + $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ + ідитол (6) ($d_{\text{ок}} = 54 \text{ мкм}$); суміш Mg + $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ + стеарин (7) ($d_{\text{ок}} = 260 \text{ мкм}$); суміш Mg + $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ + стеарин (8) ($d_{\text{ок}} = 54 \text{ мкм}$)

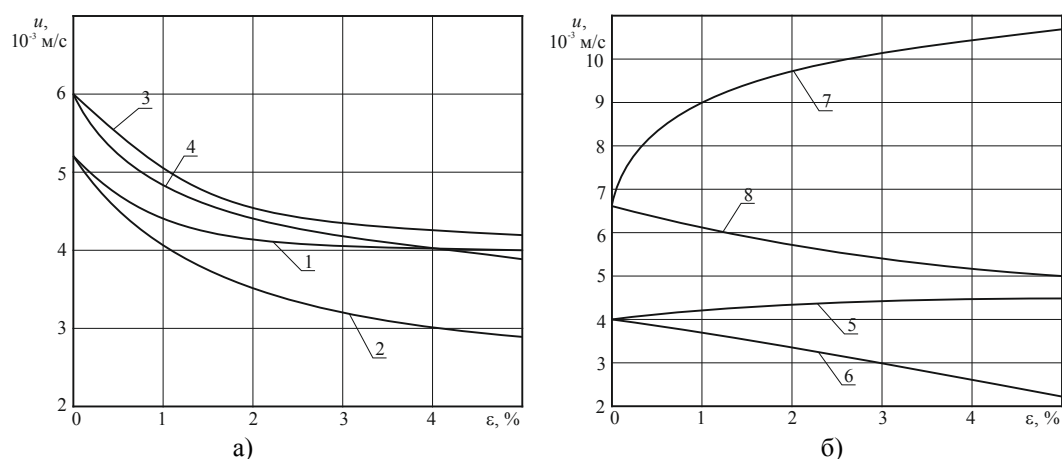


Рисунок 5. Залежності швидкості горіння стехіометричних сумішей $\text{Mg} + \text{MnO}_2$ (а) та $\text{Mg} + \text{BaO}_2$ (б) від масової частки органічної добавки ($K_y = 0,9$; $d_m = 94$ мкм):

- а) суміш $\text{Mg} + \text{MnO}_2$ + ідитол (1) ($d_{ок} = 260$ мкм); суміш $\text{Mg} + \text{MnO}_2$ + стеарин (2) ($d_{ок} = 260$ мкм); суміш $\text{Mg} + \text{MnO}_2$ + ідитол (3) ($d_{ок} = 54$ мкм); суміш $\text{Mg} + \text{MnO}_2$ + стеарин (4) ($d_{ок} = 54$ мкм);
 б) суміш $\text{Mg} + \text{BaO}_2$ + ідитол (5) ($d_{ок} = 260$ мкм); суміш $\text{Mg} + \text{BaO}_2$ + стеарин (6) ($d_{ок} = 260$ мкм); суміш $\text{Mg} + \text{BaO}_2$ + ідитол (7) ($d_{ок} = 54$ мкм); суміш $\text{Mg} + \text{BaO}_2$ + стеарин (8) ($d_{ок} = 54$ мкм)

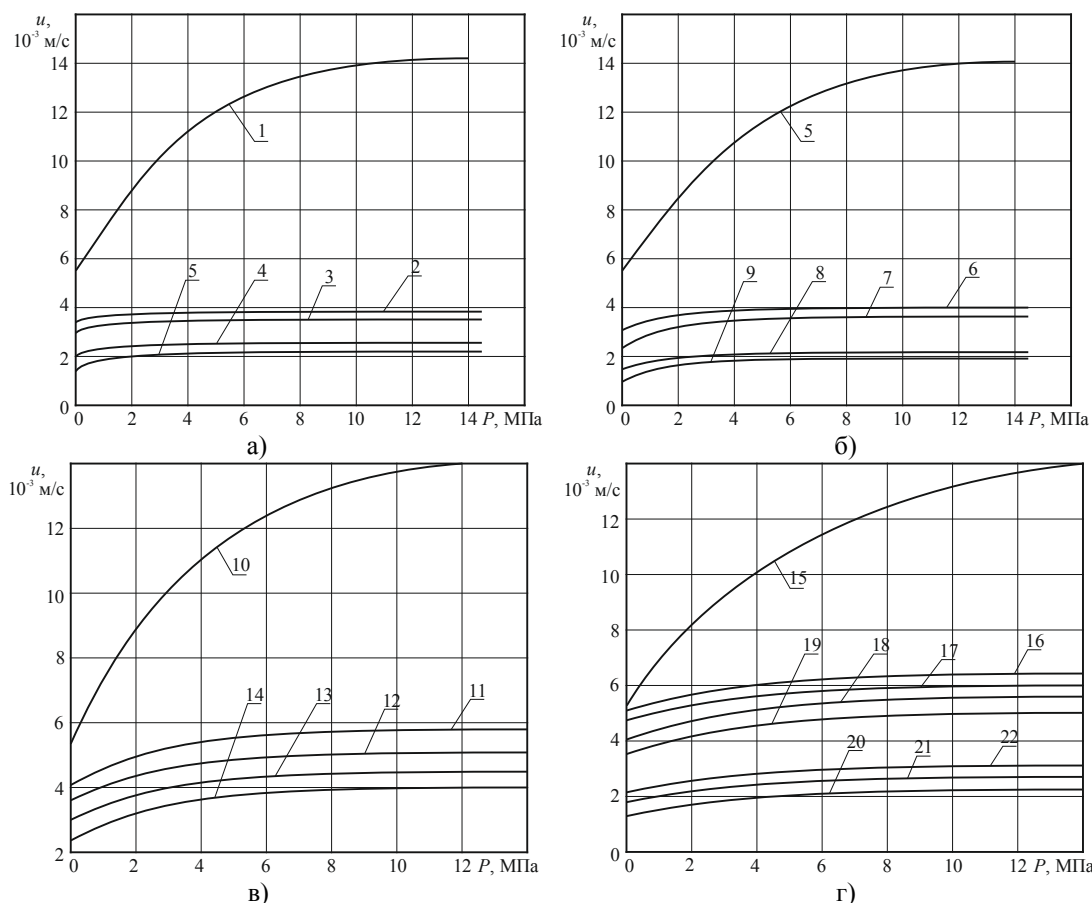


Рисунок 6. Залежності швидкості горіння суміші 75 % МПФ-3 + 25 % Ф-3 від зовнішнього тиску при різному вмісті органічної добавки ($K_y = 0,9$; $d_m = 135$ мкм):

- а) відносний вміст епоксидної смоли ЕД-5: $\varepsilon = 0$ (1); $\varepsilon = 0,05$ (2); $\varepsilon = 0,07$ (3); $\varepsilon = 0,1$ (4); $\varepsilon = 0,13$ (5);
 б) відносний вміст каучуку СКН-10-1: $\varepsilon = 0$ (6); $\varepsilon = 0,05$ (7); $\varepsilon = 0,07$ (8); $\varepsilon = 0,1$ (9); $\varepsilon = 0,13$ (10);
 в) відносний вміст тіоколу: $\varepsilon = 0$ (11); $\varepsilon = 0,05$ (12); $\varepsilon = 0,07$ (13); $\varepsilon = 0,1$ (14); $\varepsilon = 0,13$ (15);
 г) відносний вміст добавок: $\varepsilon = 0$ (16); $\varepsilon = 0,05$ ПГН (17); $\varepsilon = 0,07$ ПГН (18); $\varepsilon = 0,1$ ПГН (19); $\varepsilon = 0,13$ ПГН (20); $\varepsilon = 0,07$ П-9 (21); $\varepsilon = 0,1$ П-9 (22); $\varepsilon = 0,13$ П-9 (23)

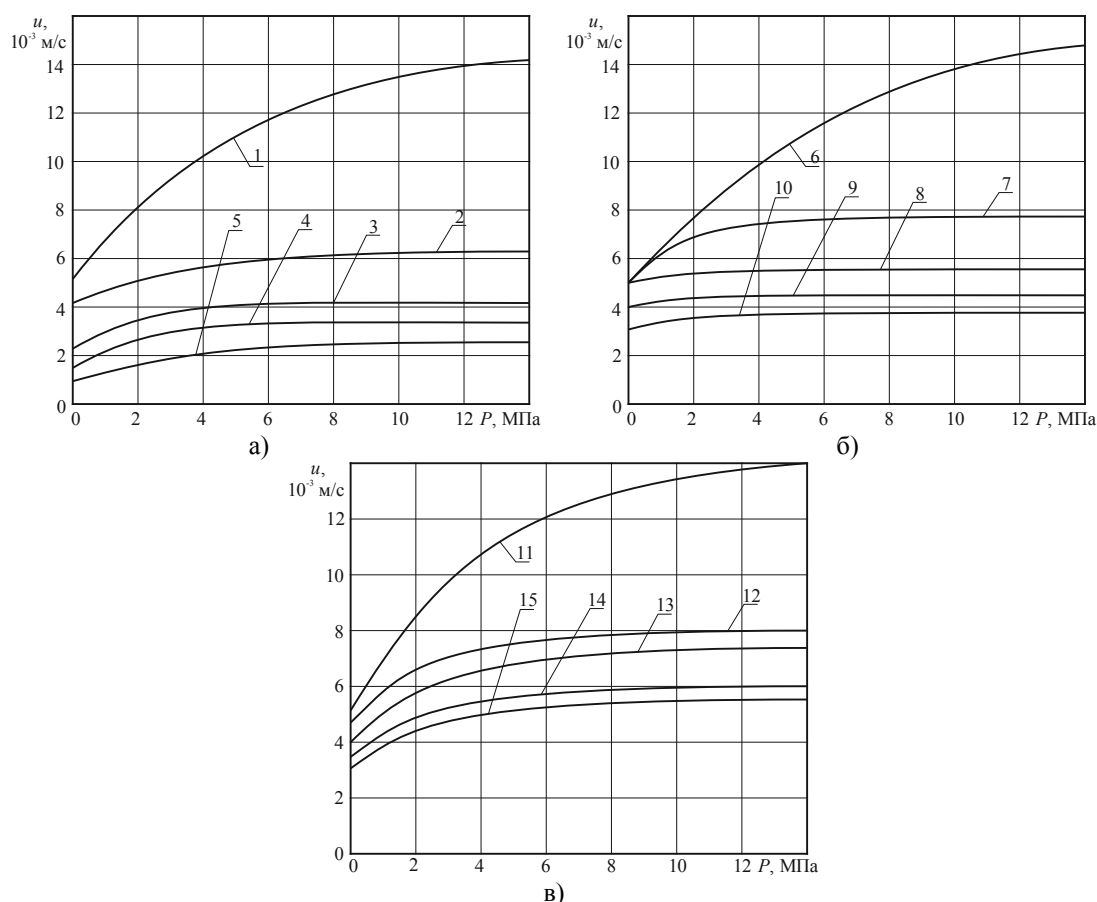


Рисунок 7. Вплив вмісту стеарину (а), парафіну (б) та уротропіну (в) суміші 75 % МПФ-3 + 25 % Ф-3 на залежність швидкості горіння від зовнішнього тиску ($K_y = 0,9$; $d_m = 135$ мкм):

- а) $\varepsilon = 0$ (1); $\varepsilon = 0,05$ (2); $\varepsilon = 0,07$ (3); $\varepsilon = 0,1$ (4); $\varepsilon = 0,13$ (5);
 б) $\varepsilon = 0$ (6); $\varepsilon = 0,05$ (7); $\varepsilon = 0,07$ (8); $\varepsilon = 0,1$ (9); $\varepsilon = 0,13$ (10);
 в) $\varepsilon = 0$ (11); $\varepsilon = 0,05$ (12); $\varepsilon = 0,07$ (13); $\varepsilon = 0,1$ (14); $\varepsilon = 0,13$ (15)

Висновки. На основі проведених експериментальних досліджень закономірностей впливу широкого класу добавок органічних речовин на швидкість горіння піротехнічних сумішей на основі порошків окиснювачів та металевих палив отримано такі нові результати:

1. При введенні у склад сумішей з порошків металевих палив та окиснювачів більшості з досліджених добавок органічних речовин (нафталін, парафін, антрацен, уротропін, метальдегід, гексоген, каніфоль, ідитол, паранітробензолдегід, ПДМАБ, гексахлорбензол, епоксидна смола ЕД-5, каучук СКН-10-1, ПГН, П-9, сечовина, фталева кислота, нітрогуанідин, смола 214, нітроплівка, тіокол, бутилкаучук, полівінілхлорид, гексахлорпарахлорол, пентахлорфенол, фторопласт 32-Л, фторкаучук СКФ-32), що використовуються у піротехнічному виробництві, відбувається зниження швидкості горіння та підвищення стійкості

процесу горіння в умовах зовнішніх впливів. При цьому зі зменшенням коефіцієнта надлишку окиснювача у суміші залежність швидкості горіння від величини добавки підсилюється, незалежно від її дисперсності. У деяких випадках змінюється характер залежності швидкості горіння від параметрів вихідної суміші (коефіцієнта ущільнення, дисперсності металевих палив) та зовнішніх чинників (температури нагріву, зовнішнього тиску).

2. Добавки стеарину та тіоколу у суміші $Al + NaNO_3$ та $Zr + NaNO_3$, навпаки, призводять до збільшення швидкості горіння цих сумішей, що обумовлено підвищенням реакційної здатності Al та Zr у присутності газоподібних продуктів розкладання стеарину та тіоколу при підвищених температурах нагріву, які сприяють різкому зниженню температури займання частинок металевих палив та призводять до зниження стійкості процесу розвитку горіння сумішей, особливо в умовах

підвищених зовнішніх тисків (збільшення показника ν в законі горіння зі зростанням величини добавки).

Перспективи подальших досліджень. Надалі планується проведення досліджень щодо регулювання швидкості горіння піротехнічних металізованих сумішей шляхом введення у їх склад добавок неорганічних речовин (наприклад оксидів металів, фторидів металів та ін.), які можуть бути інгібіторами та каталізаторами горіння зазначених сумішей, роблячи суттєвий вплив на час згорання та, в кінцевому підсумку, на час дії піротехнічних виробів різного призначення в умовах бойового застосування.

Список використаних джерел

- [1] Звіт про науково-дослідну роботу "Дослідження тенденцій і закономірностей динаміки основних показників статистики пожеж в Україні за територіальним принципом", УкрНДІЦЗ, Київ, 2018.
- [2] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, and S. O. Kolinko, "Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels", *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, no. 2 (8), pp. 81-85, 2019.
- [3] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, Є. О. Тищенко, та В. В. Цибулін, "Визначення допустимих режимів нагріву піротехнічних сумішей при їх експлуатації", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 5-11, 2018.
- [4] О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, та В. А. Ващенко, "Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій", *Internauka*, № 5/5799, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.internauka.com>
- [5] О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, та В. А. Ващенко, "Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій", *Internauka*, № 5/5798, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.internauka.com>
- [6] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, "Вплив технологічних параметрів на залежності швидкості розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей", на *XI Міжнар. наук.-практ. конф. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*, Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2020.
- [7] Р. Б. Мотрічук та ін., "Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру та склад продуктів згорання піротехнічних нітратно-металевих сумішей", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 131-142, 2020.
- [8] Є. П. Кириченко, В. М. Гвоздь, В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, О. О. Дядюшенко, та В. П. Мельник, "Закономірності впливу технологічних параметрів і зовнішніх чинників на температуру займання та час згорання частинок магнію та алюмінію в продуктах розкладання оксидів металів", *Цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (12), с. 112-122, 2021.
- [9] Є. П. Кириченко, "Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах пострілу та польоту", *Пожежна безпека: теорія і практика: зб. наук. праць ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля*, т. 5, № 2, с. 87-102, 2021.
- [10] V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, and O. L. Mirus, "Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5 (95), pp. 68-76, 2018.
- [11] В. М. Фатєєв, Ю. П. Приходько, та Л. І. Таборов, *Піротехніка*. Київ, Україна: Наук. думка, 2017.
- [12] В. М. Баланюк, Н. М. Козяр, та О. І. Гарасим'юк, "Застосування газозерозольно-порошкових вогнегасних сумішей для захисту від запалювальних сумішей", *Science Rise*, № 2 (22), с. 11-14, 2016.
- [13] В. М. Марич, В. В. Ковалишин, та Я. Б. Кирилів, "Оптимізація складу вогнегасних порошків для гасіння магнію", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*, Черкаси, 2018.
- [14] В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Т. М. Войтович, та Б. М. Гусар, "Використання еко-

- логічно прийнятних вогнегасних речовин", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи*, ДУБЖД, 2018.
- [15] В. М. Марич, В. В. Ковалишин, та Я. Б. Кирилів, "Дослідження хімічних речовин як складників вогнегасних порошків для гасіння магнію та його сплавів", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*, Черкаси, 2017.
- [16] O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, and V. Melnyk, "Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions", *Technology audit and production reserves*, no. 1/1(51), pp. 44-49, 2020.
- [17] О. В. Кириченко та ін., "Визначення критичних режимів розвитку процесів горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 123-133, 2020.
- ### References
- [1] Report on research work "Study of trends and patterns of dynamics of the main indicators of fire statistics in Ukraine on a territorial basis", UkrNDICZ, Kyiv, 2018 [in Ukrainian].
- [2] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, and S. O. Kolinko, "Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels", *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, no. 2 (8), pp. 81-85, 2019.
- [3] O. V. Kirichenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, E. O. Tishchenko, and V. V. Tsybulin, "Determination of permissible modes of heating of pyrotechnic mixtures during their operation", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 2, pp. 5-11, 2018 [in Ukrainian].
- [4] O. S. Dibrova, O. V. Kirichenko, R. B. Motrichuk, and V. A. Vashchenko, "Improving fire safety of pyrotechnic nitrate-metal mixtures in the conditions of external thermal actions", *Internauka*, no. 5/5799, 2020 [Online]. Available: <http://www.inter-nauka.com> [in Ukrainian].
- [5] O. S. Dibrova, O. V. Kirichenko, R. B. Motrichuk, and V. A. Vashchenko, "Regularities of influence of technological parameters on fire safety of pyrotechnic nitrate-titanium mixtures in the conditions of external thermal actions", *Internauka*, no. 5/5798, 2020. [Online]. Available: <http://www.inter-nauka.com> [in Ukrainian].
- [6] O. V. Kirichenko, O. S. Dibrova, and R. B. Motrichuk, "Influence of technological parameters on the dependence of the rate of development of the combustion process of pyrotechnic mixtures", in *Proc. XI Int. Sci. and Pract. Conf. Theory and Practice of Fire Extinguishing and Liquidation of Emergency Situations*, ChIPB im. Heroyiv Chornobylya, Cherkasy, 2020 [in Ukrainian].
- [7] R. B. Motrichuk et al., "Regularities of the influence of technological parameters and external factors on temperature and composition of combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 4, pp. 131-142, 2020 [in Ukrainian].
- [8] E. P. Kirichenko, V. M. Gvozd, V. A. Vashchenko, O. V. Kirichenko, O. O. Dyadyushenko, and V. P. Melnik, "Regularities of the influence of technological parameters and external factors on the ignition temperature and combustion time of magnesium and aluminum particles in the decomposition products of metal oxides", *Tsyvilnyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, no. 2 (12), pp. 112-122, 2021 [in Ukrainian].
- [9] E. P. Kirichenko, "Research of processes of external thermal shock actions on pyrotechnic metal oxide products in the conditions of a shot and flight", *Fire Safety: Theory and Practice: coll. of sci. works of the Institute of Chornobyl Heroes*, vol. 5, no. 2, pp. 87-102, 2021 [in Ukrainian].
- [10] V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, and O. L. Mirus, "Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5 (95), pp. 68-76, 2018.
- [11] V. M. Fateev, Yu. P. Prikhodko, and L. I. Taborov, *Pyrotechnics*. Kyiv, Ukraine: Nauk. dumka, 2017 [in Ukrainian].

- [12] V. M. Balanyuk, N. M. Kozyar, and O. I. Garasymyuk, "Application of aerosol-powder fire-extinguishing mixtures for protection against incendiary mixtures", *Science Rise*, no. 2 (22), pp. 11-14, 2016 [in Ukrainian].
- [13] V. M. Marich, V. V. Kovalishyn, and Ya. B. Kirillov, "Optimization of fire extinguishing powders for magnesium extinguishing", in *Proc. Int. Sci. and Pract. Conf. Theory and Practice of Fire Extinguishing and Liquidation of Emergency Situations*, Cherkasy, 2018 [in Ukrainian].
- [14] V. V. Kovalishyn, V. M. Marich, T. M. Voitovych, and B. M. Husar, "Use of environmentally friendly fire extinguishers", in *Proc. Int. Sci. and Pract. Conf. Environmental safety as the basis of sustainable development of society. European experience and perspectives*, DUBZhD, 2018 [in Ukrainian].
- [15] V. M. Marich, V. V. Kovalishyn, and Ya. B. Kirillov, "Investigation of chemicals as components of fire-extinguishing powders for extinguishing magnesium and its alloys", in *Proc. Int. Sci. and Pract. Conf. Theory and Practice of Fire Extinguishing and Liquidation of Emergency Situations*, Cherkasy, 2017 [in Ukrainian].
- [16] O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, and V. Melnyk, "Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions", *Technology audit and production reserves*, no. 1/1(51), pp. 44-49, 2020.
- [17] O. V. Kirichenko et al., "Determination of critical modes of development of combustion processes of pyrotechnic nitrate-metal mixtures in the conditions of external thermal actions", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 2, pp. 123-133, 2020 [in Ukrainian].

E. P. Kirichenko¹,
V. M. Gvozdz¹, Ph. D., Professor,
O. V. Kirichenko¹, Dr. Tech. Sc., Professor,
V. O. Kovbasa¹,
V. A. Vaschenko², Dr. Tech. Sc., Professor,
T. I. Butenko², Ph. D., Associate Professor,
V. V. Tsybulin²

¹Cherkasy Institute of Fire Safety,
 Onoprienko st., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

²Cherkasy State Technological University,
 Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

INCREASE OF THE STABILITY OF THE PROCESS OF PYROTECHNIC MIXTURES COMBUSTION THROUGH THE ADDITION OF ORGANIC SUBSTANCES

Ignition and subsequent fire-hazardous destruction of products are usually preceded by external thermal effects to which they are subjected. This leads to premature ignition and explosive development of burning charges based on compacted mixtures of oxidizing powders and metal combustibles and further fire-hazardous destruction.

Prevention of forced fire-hazardous destruction of products in the event of external thermal effects becomes of significant practical importance. Prevention methods should be based on studies of the development processes of the combustion of pyrotechnic mixture charges in various external conditions.

Prevention of forced fire-hazardous destruction of products in the event of external thermal effects acquires significant practical importance. Prevention methods should be based on studies of the development processes of the combustion of pyrotechnic mixture charges in various external conditions.

Currently, the issue of the influence of various technological parameters and external conditions on the processes of development of combustion of two-component pyrotechnic mixtures has been sufficiently investigated. However, there are no systematic studies of the influence on the combustion process of the indicated mixtures of additives of various organic substances, which, as shown by sepa-

rate studies for paraffin, stearin, naphthalene, anthracene additives, not only contribute to the improvement of the technology of manufacturing their charges, but also lead to a slowdown in the combustion process of the mixtures with further its stabilization.

The purpose of the work is to establish the regularities of the influence of additives of various organic substances in the composition of pyrotechnic mixtures of oxidizing powders and metal fuels on the speed and stability of the development of their combustion.

A wide class of organic substances has been established, the introduction of which in the form of small additives (up to 10%) into the composition of pyrotechnic mixtures based on powders of metal fuels and oxidizers leads to a decrease in the speed and increase in the resistance of their combustion process to external influences (increased heating temperatures, external pressures) for different ranges of changes in technological parameters of mixtures (ratio and dispersion of components, compaction coefficient). With a decrease in the coefficient of excess oxidant in the mixture, the dependence of the burning rate on the amount of the additive increases, regardless of its dispersion. Additions of stearin and thiocol in the mixture of $Al + NaNO_3$ and $Zr + NaNO_3$, on the contrary, lead to an increase in the burning rate of these mixtures, which is due to an increase in the reactivity of Al and Zr in the presence of gaseous decomposition products of stearin and thiocol at elevated heating temperatures, which contribute to a sharp decrease in ignition temperature of metal fuel particles and lead to a decrease in the stability of the combustion process of mixtures, especially under conditions of increased external pressure (an increase in the index v in the combustion law with an increase in the amount of the additive).

Keywords: pyrotechnic mixtures, organic substances, burning speed, stability of the burning process, external influences.