

УДК 614.841:536

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.2.15-26>

Назарій Козяр¹, кандидат технічних наук (ORCID: 0000-0001-9082-0771),
Оксана Кириченко¹, доктор технічних наук, професор (ORCID: 0000-0002-0240-1807),
Вячеслав Ващенко², доктор технічних наук, професор (ORCID: 0000-0003-0722-9353),
Євгеній Кириченко¹ (ORCID: 0000-0001-7638-0722),
Вікторія Ковбаса¹ (ORCID: 0000-0002-9479-669X),
Сергій Колінько², кандидат фізико-математичних наук, доцент (ORCID: 0000-0002-0234-8655),
Марина Томенко¹, кандидат педагогічних наук (ORCID: 0000-0002-2354-9106),
¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України,
²Черкаський державний технологічний університет

ЗАПОБІГАННЯ ПОЖЕЖОВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИМ ЗАЙМАННЯМ ПІРОТЕХНІЧНИХ МЕТАЛІЗОВАНИХ СУМІШЕЙ З ДОБАВКАМИ НЕОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН

Встановлено широкий клас неорганічних речовин (LiF , NiF , NaF , BaF_2 , SiF_2 , SrF_2 , AlF_3), введення яких у вигляді невеликих добавок (до 10 %) у склад піротехнічних сумішей на основі кисневмісних окиснювачів та порошків металевих пальних призводить до зменшення швидкості та підвищення стійкості процесу їх горіння до зовнішніх впливів (підвищені температури нагріву, зовнішні тиски) тільки для певних діапазонів зміни величини добавки. При цьому збільшення величини добавки та її дисперсності, а також зменшення дисперсності окиснювача призводить до зменшення чутливості процесу горіння сумішей до зовнішніх впливів (зменшення показника ν в законі горіння).

Введення добавок оксидів SiO_2 , V_2O_5 , Fe_2O_3 до сумішей NH_4ClO_4 (або Ф-3) + металеве пальне (Mg , Al) призводить не тільки до збільшення швидкості горіння, але й до зміни характеру її залежності від зовнішнього тиску, що суттєво знижує стійкість процесу горіння сумішей до зовнішніх термічних дій.

Ключові слова: пожежна безпека, піротехнічні металізовані суміші, процеси горіння, процеси теплопровідності, газодинаміки, займання та горіння частинок металів.

Постановка проблеми. Нині піротехнічні металізовані суміші на основі ущільнених сумішей з порошків металевих пальних (Mg , Al , Zn , Mo , Cd , B та ін.) та кисневмісних окиснювачів ($NaNO_3$, NH_4ClO_4 та ін.) широко використовуються у різних виробках народного господарства та військової техніки (освітлювальні, сигнальні та трасувальні засоби, піротехнічні спалахувачі, запалювальні патрони та снаряди, піротехнічні ІЧ-елементи та ін.) [1 – 11].

При екстремальних умовах експлуатації (наприклад, при виникненні пожеж у складських приміщеннях, де зберігаються вироби в умовах транспортування при вимушеному зовнішньому нагріві їх поверхонь, або при ударних теплових впливах на корпуси виробів при їх запусках та ін.) вироби піддаються інтенсивним зовнішнім термічним діям. Це призводить до передчасних вибухонебезпечних займань зарядів сумішей та руйнувань виробів з утворенням високотемпературних продуктів (конденсовані продукти згорання, уламки металевих корпусів виробів та ін.), що є пожежонебезпечними для навколишніх об'єктів (дерев'яні будови, паливно-мастильні матеріали, пускові установки з обслуговуючим персоналом та ін.) [12 – 17].

Тому для запобігання можливих пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів у вказаних умовах необхідно вміти регулювати швидкість розвитку процесу горіння зарядів сумішей, в першу чергу, за допомогою технологічних чинників (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення та ін.).

Аналіз останніх досягнень і публікацій. На даний момент достатньо повно проведено дослідження з визначення залежностей швидкості горіння вказаних двокомпонентних піротехнічних сумішей від коефіцієнта надлишку окиснювача (α), середнього розміру частинок порошоків металевих пальних (d_m , мкм) та окиснювачів ($d_{ок}$, мкм), коефіцієнта ущільнення (K_y) [19 – 22]: встановлено діапазони зміни параметрів α , d_m , $d_{ок}$ та K_y , в межах яких не спостерігається різкого збільшення швидкості горіння, а у деяких випадках – швидкість горіння навіть зменшується, що стабілізує процес горіння сумішей, роблячи його більш стійким до зовнішніх впливів (підвищених температур нагріву, зовнішніх тисків, ударних впливів надзвукового потоку повітря та ін.), виключаючи вибухонебезпечне його протікання. Що стосується регулювання швидкості горіння сумішей шляхом добавок у їх склад різних речовин, то нині досліджено тільки вплив добавок органічних речовин [1 – 5, 13 – 16]: встановлено перелік добавок, що зменшують швидкість та стабілізують процес горіння сумішей; вивчено вплив технологічних чинників (α , d_m , $d_{ок}$, K_y) на залежність швидкості горіння від величини добавки; встановлено деякі добавки, що призводять до зростання швидкості горіння та роблять процес горіння сумішей більш чутливим до зовнішнього тиску. Аналогічні дослідження для сумішей з добавками неорганічних речовин (наприклад, оксидів металів (SiO_2 , V_2O_5 , Fe_2O_3 та ін.), K_2CrO_7 , $KMnO_4$, фторидів металів (LiF , NaF , SrF_2 , BaF_2 та ін.)), які використовуються у піротехнічному виробництві для покращення технологічних властивостей сумішей [3 – 5], відсутні.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. На сьогодні не досліджено вплив технологічних чинників (α , d_m , $d_{ок}$, K_y) на залежність швидкості горіння від величини добавки та не вивчено вплив добавок на зростання швидкості горіння сумішей для піротехнічних сумішей з добавками неорганічних речовин оксидів та фторидів металів, завдяки чому покращуються технологічні властивості сумішей при виробництві піротехнічних виробів.

Постановка задачі та її розв'язання. Метою даної роботи є визначення закономірностей впливу добавок різних неорганічних речовин у склад двокомпонентних піротехнічних сумішей з порошоків металевих пальних та кисневмісних окиснювачів на швидкість розвитку процесу їх горіння в умовах зовнішніх термічних дій.

Для вирішення мети поставлено задачі:

- визначення сукупності добавок неорганічних речовин, що призводять до зниження швидкості горіння сумішей та стабілізують процес їх горіння в умовах зовнішніх термічних дій для різних значень технологічних параметрів;
- виявлення переліку каталітичних добавок неорганічних речовин, що призводять при певних умовах, до різкого зростання швидкості розвитку процесу горіння сумішей та вибухонебезпечного характеру його протікання.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів. Зразки піротехнічних сумішей виготовлялись з використанням стандартних методів пресування порошоків окиснювачів ($NaNO_3$, NH_4ClO_4 та ін.) та металевих пальних (Mg , Al , Zn , Mo , Cd , B та ін.) з добавками неорганічних речовин (SiO_2 , V_2O_5 , Fe_2O_3 , K_2CrO_7 , $KMnO_4$, MnO_2 , LiF , NaF , SrF_2 , BaF_2 та ін.) [1, 2].

Середнє значення швидкості горіння сумішей визначалось по прийнятій у піротехніці формулі [3, 4] $u = \frac{h}{\tau}$ (h – висота зразка, м; τ – середній час згорання зразка, с); при цьому відносна похибка τ вимірювання швидкості горіння сумішей не перевищувала 6...8 %. Експериментальні криві будувались з використанням сучасних методів математичної статистики.

В результаті проведених досліджень з впливу добавок V_2O_5 , Fe_2O_3 , SiO_2 на горіння суміші перхлорату амонію (NH_4ClO_4) з алюмінієм, залізом, цинком та кадмієм встановлено, що введення цих добавок до суміші $Al + NH_4ClO_4$ не тільки впливає на швидкість горіння суміші, але й змінює сам вид залежності $u=f(P)$. Найбільш ефективною виявилася добавка SiO_2 . Як показали дослідження, SiO_2 впливає на оксидну плівку Al та сприяє її розтріскуванню, що полегшує доступ кисню до металу і, як наслідок, прискорює процес

горіння. Вплив оксиду заліза на швидкість горіння цієї суміші обумовлений його впливом на процес розкладання перхлорату амонію. Добавка SiO_2 до суміші $\text{Al} + \text{NH}_4\text{ClO}_4$, у яку додатково введена поліксиметиленова зв'язка $(\text{CH}_2\text{O})_n$, навпаки, зменшує швидкість горіння, що обумовлено утворенням теплостійких кремнійорганічних сполук при взаємодії $(\text{CH}_2\text{O})_n$ і SiO_2 , в тому числі і на поверхні частинок Al . Добавка V_2O_5 дещо підвищує швидкість горіння суміші $\text{Al} + \text{NH}_4\text{ClO}_4$, а також суміші $\text{Cd} + \text{NH}_4\text{ClO}_4$, але не ефективна для сумішей $\text{Fe} + \text{NH}_4\text{ClO}_4$ та $\text{Zr} + \text{NH}_4\text{ClO}_4$. Відзначено, що V_2O_5 діє на оксидні плівки тільки тих металів, у яких критерій Піллінга-Бедворса (відношення об'єму оксидної плівки до об'єму металу, що згорів) [2, 3] не значною мірою перевищує 1. До таких металів відносяться Al і Cd , у яких це відношення дорівнює відповідно 1,45 та 1,32. На горіння металів, у яких критерій Піллінга-Бедворса значно перевищує 1 (у цинку – 1,59, у заліза – 2,06), добавка V_2O_5 не впливає.

Дія V_2O_5 на оксидну плівку металів проявляється на поверхні розділу метал-оксид, де утворюються ванадати $\text{Al}(\text{VO}_3)_3$, $\text{Cd}(\text{VO}_3)_3$. Розкладаючись, вони виділяють V_2O_5 , який знову впливає на метал. Зміна об'єму, що відбувається при цьому, викликає утворення пористої, погано пов'язаної з металом плівки. Добавка V_2O_5 може підвищувати швидкість горіння як сумішей $\text{Al} + \text{NH}_4\text{ClO}_4$, так і сумішей ПАМ + NH_4ClO_4 (а в деяких випадках і сумішей $\text{Mg} + \text{NH}_4\text{ClO}_4$). Характер впливу цієї добавки істотно залежить від форми та розміру частинок металевого пального та розміру частинок окиснювачам (табл. 1, 2, рис. 1, 2). Добавки K_2CrO_7 , KMnO_4 так само, як і V_2O_5 , у разі малих розмірів частинок пального підвищують швидкість горіння суміші ПАМ + NH_4ClO_4 , а у разі розмірів частинок металу, що перевищують 150 мкм, їх вплив відсутній (рис. 3).

Результати експериментів щодо дослідження добавок різних оксидів до сумішей Al з Ф-3 наведено на рис. 4. Видно, що для сумішей, в яких є сферичний порошок алюмінію, ефективність добавок знижується у ряду MnO_2 , Ni_2O , KMnO_4 , V_2O_5 . Добавка Cr_2O_3 практично не впливає на швидкість горіння, а добавка CuO навіть дещо знижує її.

Для сумішей, що містять нітрат натрію та металеве пальне (Mg , Al), найбільш досліджено вплив добавок фторидів (рис. 5 – 7). З даних, поданих на рис. 5 видно, що введення неорганічних добавок може збільшувати швидкість горіння сумішей $\text{NaNO}_3 + \text{Mg}$ у 2,38 рази. Оптимальний вміст LiF , NiF_2 , BaF_2 у суміші відповідає 2,0...2,5 %, а SrF_2 та NaF – 3,5...4,5 %. За ефективністю збільшення швидкості горіння фториди можна розташувати у наступній послідовності: LiF , NiF_2 , BaF_2 , NaF , SrF_2 , AlF_3 . З даних, поданих на рис. 6 видно, що тільки для добавки LiF збільшення зовнішнього тиску не призводить до зміни характеру залежності $u=f(\varepsilon)$, а збільшує швидкість горіння по абсолютній величині. Для інших добавок зростання тиску призводить до істотної зміни характеру цієї залежності (відбувається зміщення положення максимуму у бік великих значень ε). Дані про вплив кількості добавок фторидів металів та їх дисперсності на закон горіння сумішей магнію з нітратом натрію представлено у табл. 3, 4.

Таблиця 1 – Вплив добавок V_2O_5 на швидкість горіння суміші 60 % NH_4ClO_4 та 40 % алюмінію при атмосферному тиску

Характеристика порошку		Вміст добавок, %	Швидкість горіння, 10^{-3} м/с
Форма або фракція частинок порошку Al	Розмір частинок, мкм		
Сферична	5	–	0,8
Сферична	5	1	0,8
Фракція ПА-4	40	–	0,7
Фракція ПА-4	40	1	0,8
ПП-4	–	–	1,2
ПП-4	–	1	1,4
Фракція ПА-4 и ПА-3	90...100	–	0,5
Фракція ПА-4 и ПА-3	90...100	1	0,6
Фракція стандартних порошків Al	120...140	–	Затухання

Примітка. $d_{ок} \leq 75$ мкм; $T_0 = 293$ К; діаметр зразків $2,4 \cdot 10^{-2}$ м; оболонка паперова; $K_V = 0,8$.

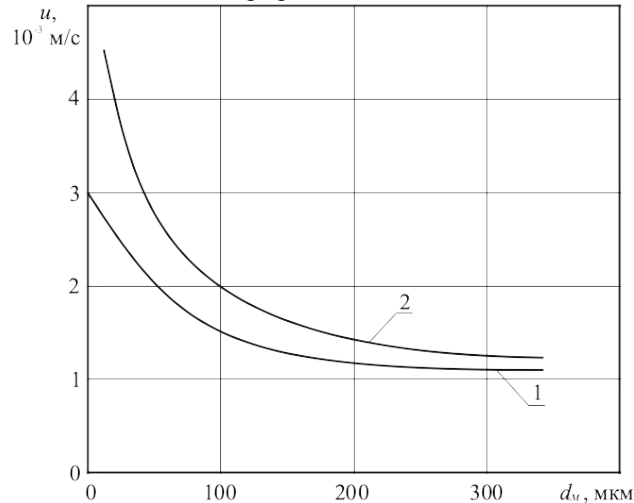


Рисунок 1 – Вплив добавки V_2O_5 на залежність швидкості горіння суміші 40 % Mg + 60 % NH_4ClO_4 від дисперсності металевих частинок (Mg фрезерний; $K_V = 0,8$; $d_{ок} < 75$ мкм): 1 – без добавки; 2 – $\varepsilon = 0,012$ %.

Таблиця 2 – Вплив добавки V_2O_5 на швидкість горіння сумішей ПАМ + NH_4ClO_4 при атмосферному тиску залежно від дисперсності та співвідношення компонентів

Вміст пального у суміші, %	Розмір частинок пального, мкм	Розмір частинок окиснювача, мкм	Масова частка V_2O_5 у суміші	Швидкість горіння, 10^{-3} м/с
40	40...50	200...250	0	2,5
			0,005	3,5
			0,001	3,6
			0,02	3,7
			0,03	4,3
			0,05	4,3
80	40...50	200...250	0	5,0
			0,005	5,9
			0,001	5,9
			0,02	6,9
			0,03	7,4
			0,05	7,5
40	160...200	200...250	0	1,3
			0,005	1,3
			0,001	1,4
			0,02	1,4
			0,03	1,5
			0,05	1,6
40	160...200	75	0	1,4
			0,005	1,1
			0,001	1,1
			0,02	1,2
			0,03	1,2
			0,05	1,2

Примітка. $T_0 = 293$ К; діаметр зразків $2,4 \cdot 10^{-2}$ м; оболонка паперова; $K_V = 0,8$.

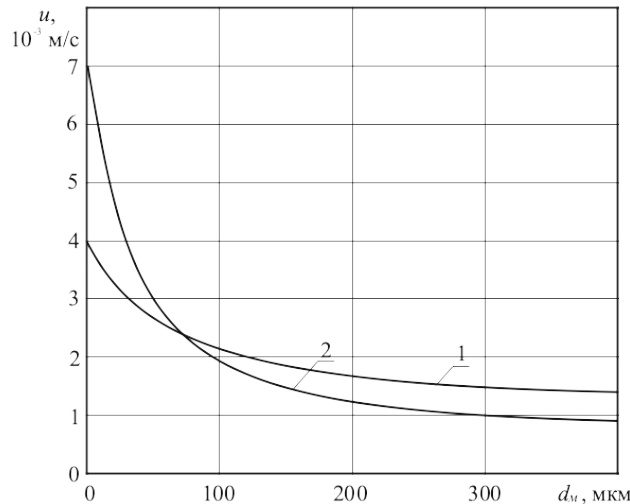


Рисунок 2 – Вплив добавки V_2O_5 на залежність швидкості горіння суміші $NH_4ClO_4 + Mg$ від дисперсності металевого пального (Mg сферичний; $K_V = 0,8$; $d_{ок} < 75$ мкм): 1 – без добавки; 2 – $\varepsilon = 0,012$ %.

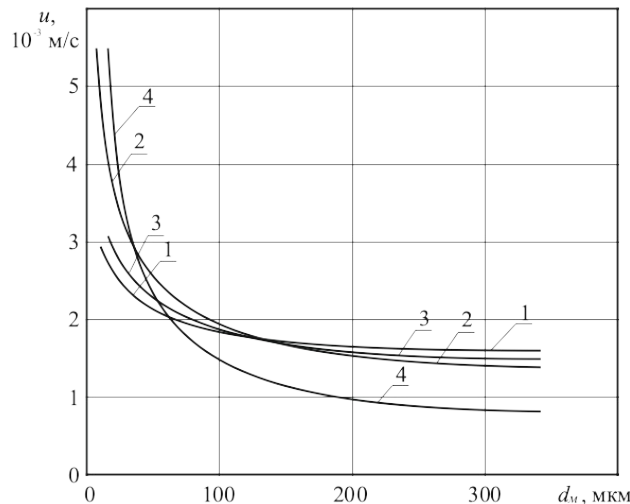


Рисунок 3 – Вплив добавок на залежність швидкості горіння суміші 60 % $NH_4ClO_4 + 40$ % ПAM-4 від розміру частинок металевих палих ($K_V = 0,8$; $d_{ок} < 75$ мкм):

- 1 – без добавок; 2 – 0,5 % K_2CrO_7 по відношенню до NH_4ClO_4 ;
- 3 – 4,5 % $KMnO_4$ по відношенню до NH_4ClO_4 ; 4 – 0,012 % V_2O_5 .

Введення до складу сумішевих систем з компонентами, що газифікуються (наприклад, $NH_4ClO_4 +$ поліуретанова зв'язка) добавки, наприклад, LiF, призводить до значного зниження швидкості горіння, при цьому дія добавки посилюється в міру збільшення вмісту добавки (у межах 2...5 %).

Таким чином, для суміші $NaNO_3 + Mg$ на відміну від сумішевих систем з компонентами, що газифікуються, добавки фторидів металів призводять до прямо протилежного ефекту. Було також встановлено, що, як і для сумішей $NaNO_3 + Mg$, суттєвий вплив на швидкість горіння сумішей $NaNO_3 + Al$ надають добавки фторидів металів, особливо NaF, LiF, SrF₂, AlF₃, NiF₂ і BaF₂. При цьому характер впливу добавок цих фторидів металів прямо протилежний характеру їх впливу на горіння сумішей $NaNO_3 + Mg$: зі збільшенням вмісту добавки швидкість горіння спочатку зменшується, а потім зростає (рис. 7). З перерахованих фторидів металів найбільш сильний вплив на швидкість горіння суміші, що містить 50 % алюмінію марки АСД-4 і 50 % нітрату натрію, надає фторид барію.

Найменший інгібуючий вплив на швидкість горіння має фторид алюмінію. За ступенем зменшення швидкості горіння нітратно-алюмінієвих сумішей фториди металів можна розмістити в наступний ряд: BaF_2 , NiF_2 , SrF_2 , NaF , LiF , AlF_3 .

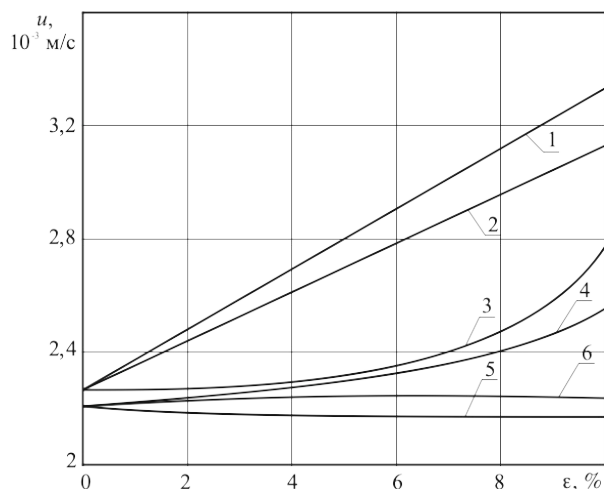


Рисунок 4 – Залежність швидкості горіння суміші 60 % АСД-4 + 40 % Ф-3 від вмісту добавок: 1 – MnO_2 ; 2 – Ni_2O_3 ; 3 – $KMnO_4$; 4 – V_2O_5 ; 5 – Cr_2O_3 ; 6 – CuO .

Таблиця 3 – Вплив добавки фторидів на залежність швидкості горіння від тиску сумішей $Mg + NaNO_3$

Масова частка добавки, %	Формула добавки	Закон швидкості горіння, 10^{-3} м/с	Значення $\bar{u} = u / u_{p_a}$ (u_{p_a} – швидкість горіння при атмосферному тиску) при P , МПа	
			2,0	8,0
0,02	LiF	$u = 19,5 \cdot P^{0,34}$	1,9	2,2
	NaF	$u = 10,2 \cdot P^{0,35}$	1,3	1,3
	SrF_2	$u = 9,8 \cdot P^{0,41}$	1,4	1,8
	NiF_2	$u = 11,5 \cdot P^{0,30}$	1,2	1,3
	AlF_3	$u = 9,8 \cdot P^{0,40}$	1,3	1,6
0,04	LiF	$u = 13,8 \cdot P^{0,30}$	1,5	1,6
	NaF	$u = 10,4 \cdot P^{0,26}$	1,3	1,3
	SrF_2	$u = 9,3 \cdot P^{0,37}$	1,5	1,9
	NiF_2	$u = 12,6 \cdot P^{0,25}$	1,6	1,7
	AlF_3	$u = 11,9 \cdot P^{0,35}$	1,5	1,7
0,08	LiF	$u = 12,1 \cdot P^{0,21}$	1,4	1,3
	NaF	$u = 11,1 \cdot P^{0,19}$	1,4	1,5
	SrF_2	$u = 11,0 \cdot P^{0,31}$	1,6	2,1
	NiF_2	$u = 14,8 \cdot P^{0,18}$	1,7	1,9
	AlF_3	$u = 7,8 \cdot P^{0,29}$	1,2	1,4
0	–	$u = 19,6 \cdot P^{0,45}$	–	–

Примітка. $d_{ок} \leq 280$ мкм; порошок магнієвий МПФ-4; $\alpha = 0,37$; $T_0 = 293$ К; діаметр зразків $1,8 \cdot 10^{-2}$ м; висота $5,5 \cdot 10^{-2}$ м; оболонка металева; $K_V = 0,98$.

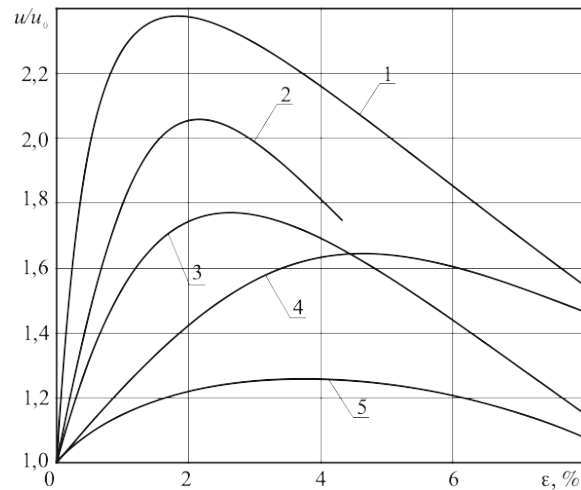


Рисунок 5 – Залежність відносної швидкості горіння суміші $\text{NaNO}_3 + \text{Mg}$ при атмосферному тиску від вмісту добавки (u_0 – швидкість горіння суміші при $\epsilon = 0$; $\alpha = 0,37$; $K_V = 0,9$; МПФ-4; $d_{ок} = 100 \dots 140$ мкм; $T_0 = 293$ К): 1 – LiF; 2 – NiF; 3 – NaF; 4 – BaF₂; 5 – SiF₂.

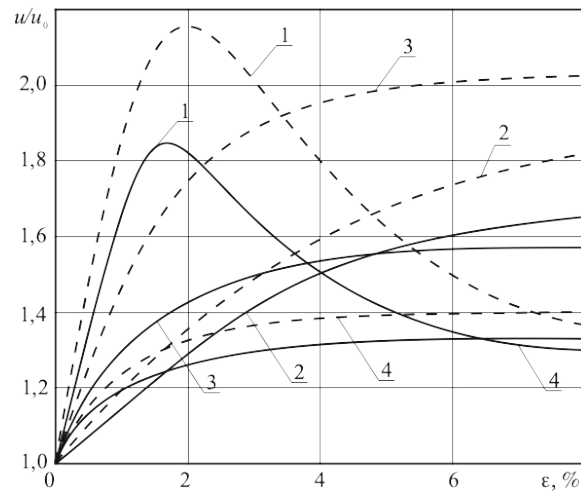


Рисунок 6 – Вплив тиску на залежність відносної швидкості горіння суміші $\text{NaNO}_3 + \text{Mg}$ від вмісту добавки ($\alpha = 0,37$; $K_V = 0,9$; МПФ-4; $d_{ок} = 100 \dots 140$ мкм; $T_0 = 293$ К): 1 – LiF; 2 – NiF; 3 – SrF₂; 4 – NaF; ————— $P = 2$ МПа; - - - - - $P = 8$ МПа.

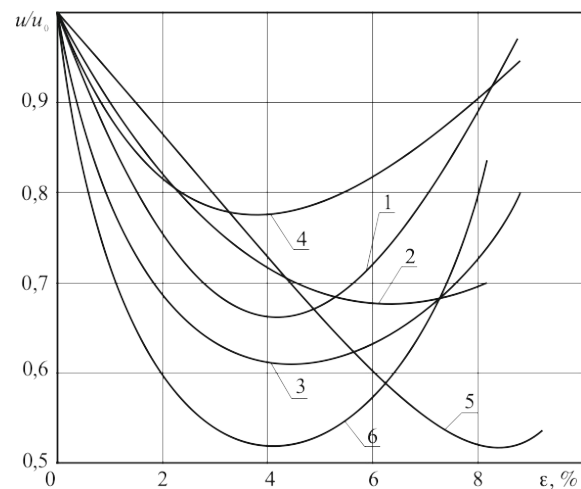


Рисунок 7 – Вплив добавок фторидів металів на зміну відносної швидкості горіння суміші $\text{NaNO}_3 + \text{АСД-4}$ при атмосферному тиску ($\alpha = 0,63$): 1 – NaF; 2 – LiF; 3 – SrF₂; 4 – AlF₃; 5 – NiF₂; 6 – BaF₂.

Таблиця 4 – Вплив дисперсності окиснювача та каталізатора на величину показника ν у законі горіння $u = u_p \cdot P^\nu$ суміші 78 % МПФ-4 + 20 % NaNO_3 + 2 % NaF

Дисперсність NaNO_3 , мкм	Показник ν при дисперсності NaF , мкм			
	25	65	70	110
45,7	0,258	0,238	0,225	0,200
77 – 834	0,253	0,250	0,218	0,238
124	0,256	0,256	0,251	0,261
160	0,274	0,268	0,262	0,268
200	0,291	0,288	0,281	0,288

Примітка. $T_0 = 293$ К; діаметр зразків $1,8 \cdot 10^{-2}$ м; висота $5,5 \cdot 10^{-2}$ м; оболонка металева; $K_V = 0,98$.

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

1. При введенні у склад сумішей NaNO_3 + металеве паливо (Mg , Al) добавок фторидів металів (LiF , NiF_2 , BaF_2 , NaF , SrF_2 , AlF_3 , SiF_2), що використовуються у піротехнічному виробництві, відбувається зниження швидкості горіння та підвищення стійкості процесу горіння в умовах зовнішніх впливів тільки починаючи з деяких оптимальних значень вмісту добавки: для сумішей $\text{Mg} + \text{NaNO}_3 - \epsilon > 1,8$ % (LiF), 2,1 % (NiF), 2,5 % (NaF), 3,4 % (SiF_2), 4,7 % (BaF_2), для сумішей $\text{Al} + \text{NaNO}_3 - \epsilon < 3,9$ % (AlF_3), 4,2 % (NaF), 4,7 % (BaF_2), 5,2 % (SrF_2), 8,5 % (NiF_2). При цьому по ефективності зменшення швидкості горіння фториди можна розташувати у наступній послідовності: для сумішей $\text{Mg} + \text{NaNO}_3 - \text{LiF}$, NiF_2 , BaF_2 , NaF , SrF_2 , AlF_3 ; для сумішей $\text{Al} + \text{NaNO}_3 - \text{BaF}_2$, NiF_2 , SrF_2 , NaF , LiF , AlF_3 . Крім цього, для сумішей $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$ тільки для добавки LiF зменшення зовнішнього тиску не призводить до зміни характеру залежності $u(\epsilon)$, а зменшує абсолютне значення швидкості горіння. Для інших добавок зменшення тиску призводить до суттєвої зміни характеру цієї залежності (відбувається змішування положення максимуму у бік менших значень ϵ). Збільшення величини добавки та її дисперсності, а також зменшення дисперсності окиснювача призводить до підвищення стійкості горіння сумішей в умовах зовнішніх впливів (зменшення показника ν у законі горіння).

2. При збільшенні вмісту добавок фторидів ліворуч (для сумішей $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$) та праворуч (для сумішей $\text{Al} + \text{NaNO}_3$) від вказаних оптимальних значень спостерігається вже різке збільшення швидкості горіння (більше, ніж у 3...5 разів). Введення добавок оксидів SiO_2 , V_2O_5 , Fe_2O_3 до сумішей NH_4ClO_4 + металеве паливо (Mg , Al) призводить не тільки до збільшення швидкості горіння, а й до зміни вигляду залежності $u(P)$. При цьому найбільш ефективною є SiO_2 , який інтенсивно впливаючи на оксидну плівку Al , призводить до розтріскування її, та прискорює процеси окиснення та горіння. Характер впливу добавки суттєво залежить від форми та розмірів частинок металевого пального та розміру частинок окиснювача. В результаті введення добавок різних оксидів у суміші $\text{Al} + \text{Ф-3}$ у випадку сферичного порошку Al ефективність підвищення швидкості горіння знижується у ряду MnO_2 , Ni_2O , KMnO_4 , V_2O_5 ; при цьому добавка Cr_2O_3 не впливає на швидкість горіння, а добавка CuO знижує її незначно.

В цілому, збільшення швидкості горіння сумішей, розглядаються, шляхом введення добавок неорганічних речовин у їх склад призводить до зниження стійкості процесу розвитку їх горіння, особливо, в умовах зовнішніх термічних дій.

В подальшому планується проведення досліджень щодо визначення закономірностей впливу добавок неорганічних речовин на швидкість розвитку процесу горіння піротехнічних нітратно-металізованих сумішей для широкого діапазону зміни параметрів зовнішніх термічних дій (підвищені температури нагріву та зовнішні тиски, термоударні впливи в умовах запуску та польоту виробів та ін.), що надають суттєвий вплив на час згоряння та, у

кінцевому підсумку, на час дії піротехнічних виробів різного призначення в умовах бойового застосування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. О. В. Кириченко, В. В. Цибулін, І. В. Яценко, В. А. Ващенко, “Моделирование пожаровзрывоопасных режимов горения нитратных систем при применении пиротехнических изделий”, *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 35-41, 2008.
2. О. В. Кириченко, “Моделирование предельных, неустойчивых режимов горения пиротехнических нитратных систем с учетом агломерации металлического горючего”, *Науковий вісник УкрНДППБ*, № 1(17), с. 78-86, 2008.
3. О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін, “Пожежонебезпечні термовпливи на поверхню металевих корпусів піротехнічних виробів в умовах пострілу та польоту”, *Проблеми пожарной безопасности*, № 32, с. 98-112, 2012.
4. О. В. Кириченко, “Тепловые воздействия на поверхность металлических обтекателей пиротехнических изделий в условиях выстрела и полета”, *Пожаровзрывобезопасность*, № 9, с. 6-11, 2013.
5. О. В. Кириченко, “Моделирование процесса нагрева металлических оболочек пиротехнических изделий в условиях внешних термовоздействий”, *Чрезвычайные ситуации: образование и наука*, № 2, с. 37-45, 2013.
6. V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, O. L. Mirus “Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 5 (95), pp. 68-76, 2018.
7. В. М. Фатєєв, Ю. П. Приходько, Л. І. Таборов, *Піротехніка*. Київ: Наукова думка, 2017.
8. В. М. Баланюк, Н. М. Козяр, О. І. Гарасим'юк, “Застосування газоаерозольно-порошкових вогнегасних сумішей для захисту від запалювальних сумішей”, *Science Rise*, № 2 (22), с. 11-14, 2016.
9. В. М. Марич, В. В. Ковалишин, Я. Б. Кирилів, “Оптимізація складу вогнегасних порошків для гасіння магнію”, *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції “Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій”*. Черкаси, 2018.
10. В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Т. М. Войтович, Б. М. Гусар, “Використання екологічно прийнятних вогнегасних речовин”, *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції “Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи”*. ДУБЖД, 2018.
11. В. М. Марич, В. В. Ковалишин, Я. Б. Кирилів, “Дослідження хімічних речовин як складників вогнегасних порошків для гасіння магнію та його сплавів”, *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції “Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій”*. Черкаси, 2017.
12. *Звіт про науково-дослідну роботу “Дослідження тенденцій і закономірностей динаміки основних показників статистики пожеж в Україні за територіальним принципом”*. Київ: УкрНДЦЗ, 2018.
13. O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, 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.
14. О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, Т. І. Бутенко, В. В. Цибулін, “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.
15. O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, 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.

16. О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, Є. О. Тищенко, В. В. Цибулін, “Визначення допустимих режимів нагріву піротехнічних сумішей при їх експлуатації”, *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 5-11, 2018.

17. О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко, “Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій”, *Intenauka* <http://www.inter-nauka.com>, №5/5799, 2020.

18. О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко, “Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій”, *Intenauka* <http://www.inter-nauka.com>, № 5/5798, 2020.

19. О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, “Вплив технологічних параметрів на залежності швидкості розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей”, *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції “Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій”*. Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля, 2020.

20. Р. Б. Мотрічук, О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, Т. І. Бутенко, Є. П. Кириченко, В. В. Цибулін, “Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру та склад продуктів згоряння піротехнічних нітратно-металевих сумішей”, *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 131-142, 2020.

21. Є. П. Кириченко, В. М. Гвоздь, В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, О. О. Дядюшенко, В. П. Мельник, “Закономірності впливу технологічних параметрів і зовнішніх чинників на температуру займання та час згоряння частинок магнію та алюмінію в продуктах розкладання оксидів металів”, *Цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (12), с. 112-122, 2021.

22. Є. П. Кириченко, “Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах пострілу та польоту”, *Пожежна безпека: теорія і практика. Збірник наукових праць ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля*, т. 5, № 2, с. 87-102, 2021.

REFERENCES

1. O. V. Kirichenko, V. V. Tsybulin, I. V. Yatsenko, V. A. Vashchenko, “Simulation of fire and explosion hazardous modes of combustion of nitrate systems when using pyrotechnic products”, *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, No. 4, pp. 35-41, 2008.

2. O. V. Kirichenko, “Modeling of limiting, unstable modes of combustion of pyrotechnic nitrate systems, taking into account the agglomeration of metallic fuel”, *Naukovyy visnyk UkrNDIPB*, No. 1(17), pp. 78-86, 2008.

3. O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, V. V. Tsybulin, “Fire-hazardous thermal influences on the surface of metal casings of pyrotechnic products under the conditions of a shot and flight”, *Problemy pozharnoy bezopasnosti*, No. 32, pp. 98-112, 2012.

4. O. V. Kirichenko, “Thermal effects on the surface of metal fairings of pyrotechnic products in the conditions of a shot and flight”, *Pozharovzryvobezopasnost*, No. 9, pp. 6-11, 2013.

5. O. V. Kirichenko, “Modeling the heating process of metal shells of pyrotechnic products under conditions of external thermal influences”, *Chrezvychaynyye situatsii: obrazovaniye i nauka*, No. 2, pp. 37-45, 2013.

6. V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskiy, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, 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.

7. V. M. Fateev, Y. P. Prikhodko, L. I. Taborov, *Pyrotechnics*. Kyiv: Naukova dumka, 2017.

8. V. M. Balanyuk, N. M. Kozyar, O. I. Garasimyuk, “Application of aerosol-powder fire-extinguishing mixtures for protection against incendiary mixtures”, *Science Rise*, No. 2 (22), pp. 11-14, 2016.

9. V. M. Marich, V. V. Kovalishin, Ya. B. Kirillov, “Optimization of fire extinguishing powders for magnesium extinguishing”, *Materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi “Teoriya i praktyka hasynnya pozhezh ta likvidatsiyi nadzvychaynykh sytuatsiy”*. Cherkasy, 2018.

10. V. V. Kovalishyn, V. M. Marich, T. M. Voitovych, B. M. Husar, “Use of environmentally friendly fire extinguishers”, *Materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi “Ekolohichna bezpeka yak osnova staloho rozvytku suspil'stva. Yevropeyskyy dosvid i perspektyvy”*. DUBZD, 2018.

11. V. M. Marich, V. V. Kovalishyn, Ya. B. Kirillov, “Investigation of chemicals as components of fire-extinguishing powders for extinguishing magnesium and its alloys”, *Materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi “Teoriya i praktyka hasynnya pozhezh ta likvidatsiyi nadzvychaynykh sytuatsiy”*. Cherkasy, 2017.

12. *Report on research work “Study of trends and patterns of dynamics of the main indicators of fire statistics in Ukraine on a territorial basis”*. Kyiv: UkrNDICZ, 2018.

13. O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, 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.

14. O. V. Kirichenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, T. I. Butenko, V. V. Tsybulin, “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.

15. O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, 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.

16. O. V. Kirichenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, E. O. Tishchenko, 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.

17. O. S. Dibrova, O. V. Kirichenko, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, “Improving fire safety of pyrotechnic nitrate-metal mixtures in the conditions of external thermal actions”, *Intenauka* <http://www.inter-nauka.com>, №5/5799, 2020.

18. O. S. Dibrova, O. V. Kirichenko, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, “Regularities of influence of technological parameters on fire safety of pyrotechnic nitrate-titanium mixtures in the conditions of external thermal actions”, *Intenauka* <http://www.inter-nauka.com>, No. 5/5798, 2020.

19. O. V. Kirichenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, “Influence of technological parameters on the dependence of the rate of development of the combustion process of pyrotechnic mixtures”, *Materialy XI Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi “Teoriya i praktyka hasynnya pozhezh ta likvidatsiyi nadzvychaynykh sytuatsiy”*. Cherkasy: Cherkaskyy instytut pozhezhnoyi bezpeky im. Heroyiv Chornobylya, 2020.

20. R. B. Motrichuk, O. V. Kirichenko, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, T. I. Butenko, E. P. Kirichenko, V. V. Tsybulin, “Regularities of 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.

21. E. P. Kirichenko, V. M. Gvozd, V. A. Vashchenko, O. V. Kirichenko, O. O. Dyadyushenko, 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.

22. E. P. Kirichenko, "Research of processes of external thermal shock actions on pyrotechnic metal oxide products in the conditions of a shot and flight", *Pozhezhna bezpeka: teoriya i praktyka. Zbirnyk naukovykh prats Cherkaskyyu instytutu pozhezhnoyi bezpeky im. Heroyiv Chornobylya*, v. 5, No. 2, pp. 87-102, 2021.

*Nazar Kozyar¹, PhD in technical sciences, docent,
Oksana Kyrychenko¹, doctor of technical sciences, professor,
Vyacheslav Vashenko², doctor of technical sciences, professor,
Yevhenii Kyrychenko¹,
Victoria Kovbasa¹,*

*Sergiy Kolinko², PhD in technical sciences, docent,
Maryna Tomenko¹, PhD in pedagogical sciences,*

¹*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of NUCD in Ukraine,*

²*Cherkasy State Technological University*

PREVENTION OF FIRE EXPLOSIONS AND UNSAFE IGNITIONS PYROTECHNIC METALIZED MIXTURES WITH ADDITIVES OF INORGANIC SUBSTANCES

A wide class of inorganic substances (LiF, NiF, NaF, BaF₂, SiF₂, SrF₂, AlF₃) has been established, the introduction of which in the form of small additives (up to 10%) in the composition of pyrotechnic mixtures based on oxygen-containing oxidizers and metal fuel powders leads to a decrease in speed and an increase resistance of their combustion process to external influences (elevated heating temperatures, external pressures) only for certain ranges of changes in the amount of additives. At the same time, an increase in the amount of the additive and its dispersion, as well as a decrease in the dispersion of the oxidizer leads to a decrease in the sensitivity of the mixture combustion process to external influences (a decrease in the ν index in the combustion law).

The introduction of additives of oxides SiO₂, V₂O₅, Fe₂O₃ to mixtures of NH₄ClO₄ (or F-3) + metal fuel (Mg, Al) leads not only to an increase in the burning rate, but also to a change in the nature of its dependence on external pressure, which significantly reduces the stability of the burning process mixtures to external thermal actions.

Key words: *fire safety, pyrotechnic mixtures, processes of thermal conductivity, gas dynamics, ignition and combustion of metal particles.*