

УДК 614.841:536.46

^[0000-0002-5670-6788] Р. Б. Мотрічук¹,

e-mail: r.motrichuk@gmail.com

^[0000-0002-0240-1807] О. В. Кириченко¹, д.т.н., професор,

e-mail: okskir@meta.ua

^[0000-0003-0722-9353] В. А. Ващенко², д.т.н., професор,

e-mail: v.vaschenko@chdtu.edu.ua

^[0000-0002-0234-8655] С. О. Колінько², к.ф.-м.н., доцент,

e-mail: s.kolinko@chdtu.edu.ua

^[0000-0003-3065-5772] Т. І. Бутенко², к.т.н., доцент,

e-mail: but82016@gmail.com

^[0000-0002-2373-2429] Є. П. Кириченко¹,

e-mail: kyrychenkojp@gmail.com

^[0000-0002-2805-572X] В. В. Цибулін²

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

ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ЗОВНІШНІХ ЧИННИКІВ НА ТЕМПЕРАТУРУ ТА СКЛАД ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ НІТРАТНО-МЕТАЛЕВИХ СУМІШЕЙ

Представлено результати термодинамічних розрахунків залежностей температури та складу продуктів згоряння піротехнічних сумішей з порошків магнію та нітрату калію від коефіцієнта надлишку окиснювача $\alpha = 0,1 \dots 3,0$, величини органічної добавки $\varepsilon = 5 \dots 20$ % і зовнішнього тиску $P = 10^5 \dots 3 \cdot 10^7$ Па, що визначають вибухонебезпечні режими їх згоряння. Дослідження проводилися за допомогою методів термодинамічного аналізу процесів горіння сумішей з урахуванням фазової нерівноважності їх продуктів згоряння. За даними термодинамічного розрахунку температура продуктів згоряння істотно залежить від коефіцієнта надлишку окиснювача в суміші та тиску і має максимум. З даних термодинамічних розрахунків температури продуктів згоряння сумішей магній + нітрат калію + парафін, стеарин, нафталін, антрацен впливає, що введення добавок розглядуваних органічних речовин у суміш магнію з нітратом натрію не призводить до істотної зміни загального характеру залежності температури продуктів згоряння від коефіцієнта надлишку окиснювача і тиску для подвійної суміші.

Ключові слова: піротехнічні суміші, термодинамічні розрахунки, нітратовмісний окиснювач, металеве пальне, процеси горіння, пожежна безпека.

Вступ. Важливими властивостями піротехнічних нітратно-металевих сумішей (ПНМС), що визначають їх пожежну небезпеку для оточуючих об'єктів, є температура та склад їх продуктів згоряння (особливо високотемпературні конденсовані продукти (конденсат)), які можна регулювати, наприклад, шляхом зміни співвідношення компонентів у системі, зовнішнього тиску, складу навколиш-

нього середовища та ін. [1–7]. Це дає можливість на стадії проектування виробів на основі зазначених сумішей прогнозувати такі важливі діапазони зміни температури та складу продуктів згоряння [8–14] – області з максимальною температурою, для яких може здійснюватися стабільний, стійкий процес горіння, коли суміш, що запалала, є потенційно пожежонебезпечною для навколишнього середовища

(рисунок 1). Водночас високі температури горіння ПНМС і хімічна активність продуктів згорання нині практично виключають можливість безпосереднього вимірювання цих параметрів. Тому нині використовуються термодинамічні методи розрахунку температури та складу продуктів згорання різних палих систем піротехнічного типу [1, 2, 5, 15]. Як

показують наявні розрахунки та їх зіставлення з окремими експериментальними даними (двокомпонентні суміші Al, Ti, Zr з NaNO_3 [16–20], температури горіння яких можуть досягати 3000...4500 K), відмінності між ними не перевищують 9...12 %, що вказує на близькість дійсного процесу горіння системи до ідеального рівноважного процесу.

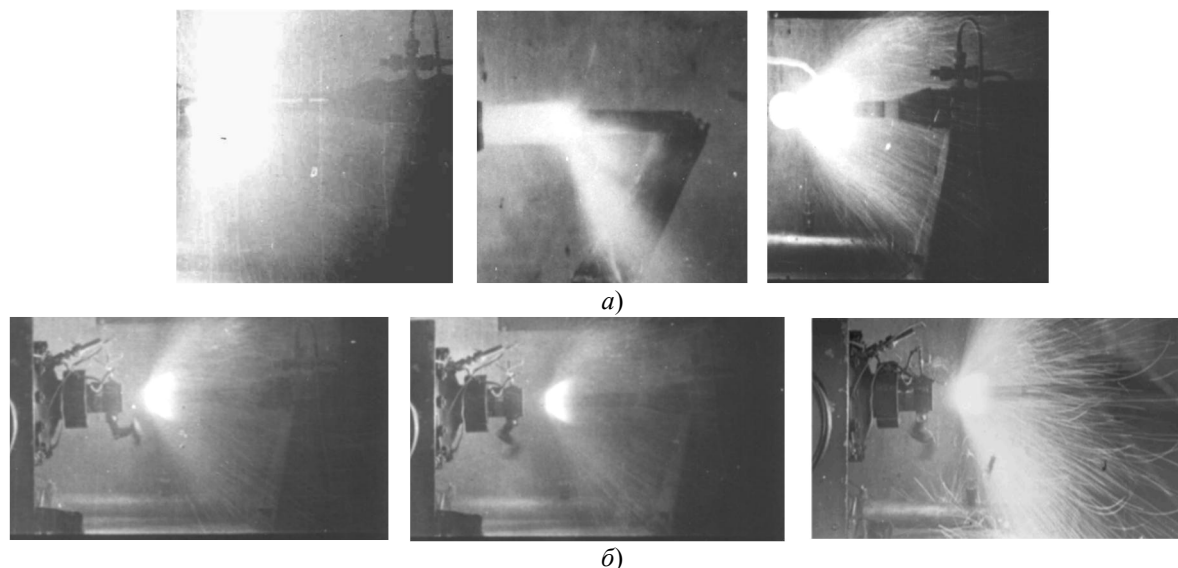


Рисунок 1 – Кінокадри загальної картини штатного спрацьовування серійних освітлювальних патронів та снарядів (а), сигнальних та імітаційних засобів (б), отриманих на стандартному піротехнічному обладнанні [2, 5, 12]

Що стосується розглядуваних сумішей (наприклад сумішей з порошків магнію та нітрату калію), які широко використовуються при спорядженні різних піротехнічних виробів (освітлювальних, сигнальних, трасувальних та ін.) [2, 3–7], то методи розрахунку температури та складу їх продуктів згорання нині відсутні.

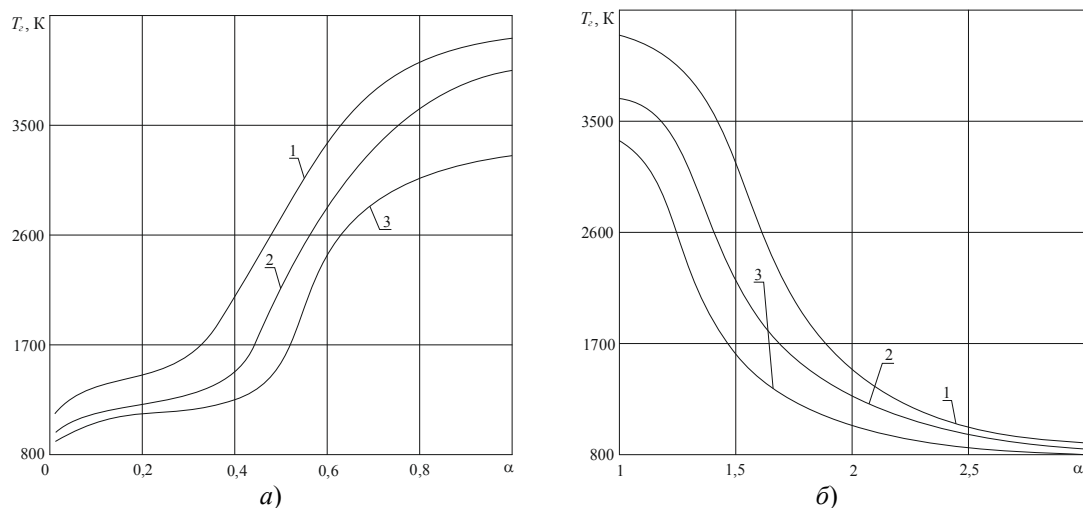
Метою роботи є визначення за допомогою термодинамічних методів розрахунку залежностей температури і складу продуктів згорання піротехнічних сумішей з порошків магнію та нітрату калію від співвідношення компонентів і зовнішнього тиску.

Результати досліджень та їх аналіз. Усі дослідження проводилися за допомогою методів термодинамічного аналізу процесів горіння сумішей з урахуванням фазової нерівноважності їх продуктів згорання [12, 18–20]. Водночас враховувалась можливість утворення таких газоподібних та конденсованих продуктів: гази – O^r , N^r , K^r , Mg^r , N_4^r , O_2^r , O_3^r , N_2^r , N_3^r , NO^r , NO_2^r , N_2O^r , Mg_2^r , MgO^r , K_2^r ,

KO^r , K_2O^r , K_2O_2^r ; конденсати – Mg^k , K^k , MgO^k , K_2O^k .

Температура продуктів згорання. За даними термодинамічного розрахунку, температура продуктів згорання істотно залежить від коефіцієнта надлишку окиснювача в суміші та тиску (рисунок 2) і має максимум T_{max} . В інтервалі тисків $P = 10^5 \dots 3 \cdot 10^7$ Па цей максимум розташований в області $\alpha = 1,0 \dots 1,15$. Зміна тиску від 10^5 до 10^7 Па (до $\alpha = 3,0$) призводить до зростання температури, і T_{max} збільшується з 3080 до 4150 K.

Склад продуктів згорання. Якісний та кількісний склад газоподібних і конденсованих продуктів згорання сильно залежить від α та P . За даними розрахунків, у газоподібних і конденсованих продуктах згорання містяться десятитисячні частки N^r , NO_2^r , тисячні – Mg_2^r , K_2^r , соті – O^r , NO^r , KO^r , K^k , десяті – Mg^r , K^r , O_2^r , N_2^r , MgO^r , MgO^k , Mg^k , K_2O^k .



а) криві для співвідношень $\alpha = 0,01 \dots 1,0$; б) криві для співвідношень $\alpha = 1,0 \dots 3,0$

Рисунок 2 – Залежність температури продуктів згоряння суміші магнію з нітратом калію від коефіцієнта надлишку окиснювача при тисках: 1 – $P = 3 \cdot 10^7$ Па; 2 – $P = 0,5 \cdot 10^7$ Па; 3 – $P = 10^5$ Па

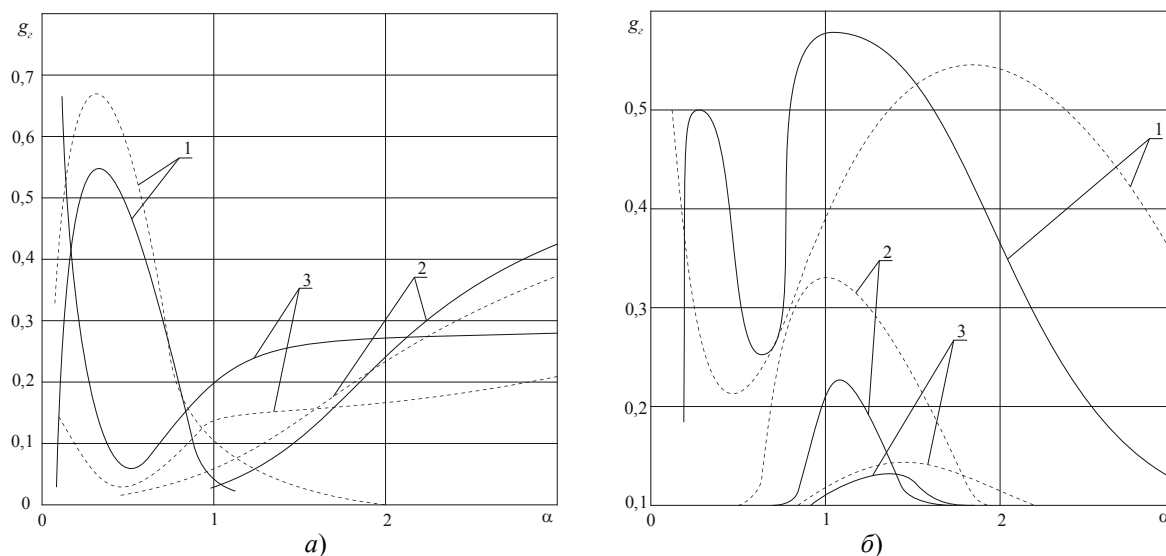
Поява в продуктах згоряння в помітних кількостях атомарного і молекулярного кисню спостерігається лише при $\alpha > 1,0$ (рисунок 3), а вміст конденсованих магнію і оксиду калію можливий відповідно при $\alpha = 0,01 \dots 0,30$ та $\alpha > 2,0$ (рисунок 4). Зі збільшенням α (від $\alpha = 1,0$) частка молекулярного кисню в продуктах згоряння збільшується до насичення при $\alpha = 3,0$ (рисунок 3). Водночас характер впливу тиску на вміст молекулярного кисню в продуктах згоряння неоднаковий для різних співвідношень компонентів. Невелика кількість атомарного кисню в продуктах згоряння спостерігається тільки при $\alpha = 0,6 \dots 2,2$ і збільшується при знижених тисках (рисунок 3). При тиску $P = 10^5$ Па максимум вмісту атомарного кисню досягається при $\alpha = 1,4$, а при тиску $P = 3 \cdot 10^7$ Па максимум вмісту атомарного кисню спостерігається при $\alpha = 1,2$. При співвідношеннях до $\alpha = 2,0$ в продуктах згоряння є газоподібний магній, залежність вмісту якого від α має максимум, що зміщується у бік великих α (рисунок 3): при тиску $P = 10^5$ Па максимум вмісту газоподібного магнію відпо-

відає $\alpha = 0,25$, при $P = 3 \cdot 10^7$ Па $\alpha = 0,34$. Газоподібний MgO^r у продуктах згоряння спостерігається в області $\alpha = 0,35 \dots 1,9$, зменшується зі збільшенням тиску і має максимум, що зміщується у бік великих α при збільшенні тиску. Вміст конденсованого магнію спостерігається при $\alpha = 0,15 \dots 0,35$ і зростає зі збільшенням тиску (рисунок 4). Водночас зі збільшенням α вміст його в продуктах згоряння різко зменшується. В продуктах згоряння в значних кількостях спостерігається оксид магнію (рисунок 4). Залежність вмісту конденсованого оксиду магнію має максимум при $\alpha = 0,95$. При всіх тисках на висхідній гілці кривої до $\alpha = 0,4$ і на низхідній гілці кривої з $\alpha = 2,1$ вміст оксиду магнію в продуктах згоряння не залежить від α . У продуктах згоряння при $\alpha = 2,1$ утворюється оксид калію, вміст якого залежить від тиску і збільшується при його підвищенні. Окрім цього, з аналізу розрахункових даних виходить, що за складом продуктів згоряння можна виділити три характерні діапазони по α (таблиця 1).

Таблиця 1 – Якісний склад кінцевих продуктів згоряння суміші магнію з нітратом калію при різних значеннях α і P

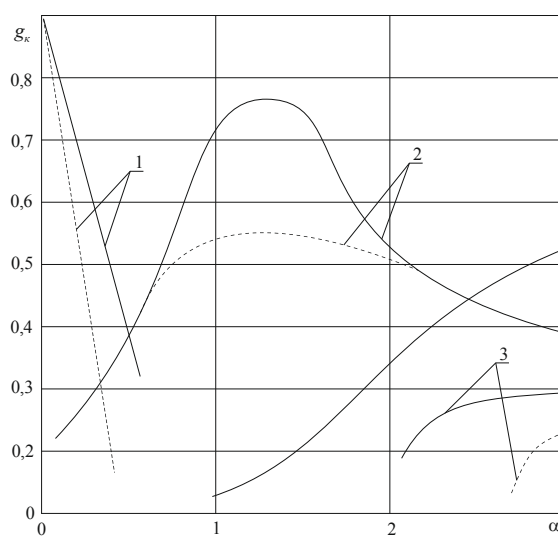
Діапазон зміни α	Діапазон зміни температури при тисках $P = 10^5 \dots 3 \cdot 10^7$ Па, К	Основні продукти згоряння	
		газоподібні	конденсовані
0,01...0,5	1060...3000	K^r, Mg^r, N_2^r	Mg^k, MgO^k
0,5...2,0	2640...2900	K^r, N_2^r, O_2^r, MgO^r	MgO^k
2,0...4,0	580...2340	K^r, N_2^r, O_2^r	MgO^k, K_2O^k

Примітка. Кисень в атомарному стані з'являється при $\alpha = 0,6 \dots 2,2$.



а) газоподібні продукти Mg^I (1), O_2^I (2), N_2^I (3); б) газоподібні продукти K^I (4), MgO^I (5), O^I (6):
 ---- при тиску $P = 10^5$ Па; — при тиску $P = 3 \cdot 10^7$ Па

Рисунок 3 – Залежність від α об'ємного вмісту g_i газоподібних продуктів згоряння суміші магнію з нітратом калію



1 – Mg^k , 2 – MgO^k , 3 – K_2O^k ; ---- при тиску $P = 10^5$ Па; — при тиску $P = 3 \cdot 10^7$ Па

Рисунок 4 – Залежність від α вмісту масової частки конденсованих продуктів згоряння суміші магнію з нітратом калію

Вплив добавок парафіну, стеарину, нафталіну та антрацену на температуру та склад продуктів згоряння сумішей магнію з нітратом калію. Температуру і склад продуктів згоряння знаходили в результаті термодинамічних розрахунків, аналогічних розрахункам

для подвійної суміші магнію з нітратом калію. Водночас разом із зазначеним вище передбачуваним складом продуктів згоряння враховувалася також наявність таких сполук, для яких нині відомі термодинамічні функції: газу – H , C , H_2 , OH , H_2O , HO_2 , H_2O_2 , NH , NH_2 ,

NH_3 , N_2H_4 , NHO , C_2 , C_3 , CO , CO_2 , C_3O_2 , CH , CH_2 , CH_3 , CH_4 , CHO , COH_2 , CN , CHN , C_2N , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2N_2 , MgH , MgOH , MgO_2H_2 , KOH , $\text{K}_2\text{O}_2\text{H}_2$, KH ; конденсати – C^k , KOH^k , H_2O^k .

З даних термодинамічних розрахунків температури продуктів згоряння сумішей магній + нітрат калію + парафін, стеарин, нафталін, антрацен впливає, що введення добавок розглянутих органічних речовин у суміш магнію з нітратом натрію не призводить до істотної зміни загального характеру залежності температури продуктів згоряння від коефіцієнта надлишку окиснювача і тиску (рисунки 5–8), розглянутого вище для подвійної суміші. Аналіз результатів розрахунків показує, що незалежно від природи добавки крива $T_z(\alpha)$, також як і у разі подвійної суміші, при різних тисках має максимум $T_{z\text{max}}$. Наявність добавки впливає на температуру T_z наступним чином. Значення T_z (для суміші з добавкою парафіну, нафталіну, антрацену) при $\alpha = 0,1$, на відміну від подвійної суміші та суміші з добавкою стеарину, більше, ніж при $\alpha = 6,0$. Добавка стеарину приводить до помітного зменшення T_z при усіх значеннях коефіцієнта надлишку окиснювача і тиску. Добавки парафіну, наф-

таліну і антрацену в суміш ведуть до суттєвого зменшення T_z в області знижених тисків (цей ефект не залежить від α), в області підвищених тисків для $\alpha > 5,0$, навпаки, збільшення добавок цих речовин призводить до підвищення T_z . При введенні добавок стеарину, нафталіну і антрацену $T_{z\text{max}}$ зміщується у бік надлишку окиснювача (з $\alpha_{T_{z\text{max}}} = 0,9 \dots 1,0$ для подвійної суміші на $\alpha_{T_{z\text{max}}} = 2,0 \dots 3,0$ для потрібної суміші), чого не спостерігається при введенні добавки парафіну в суміш. Збільшення тиску від 10^5 Па до $3 \cdot 10^7$ Па при введенні добавки парафіну не впливає на положення $T_{z\text{max}}$, а у випадку введення добавок стеарину, нафталіну і антрацену $T_{z\text{max}}$ зміщується у бік стехіометрії (з $\alpha_{T_{z\text{max}}} = 2,0 \dots 3,0$ для $P = 10^5$ Па на $\alpha_{T_{z\text{max}}} = 0,9 \dots 1,0$ для $P = 3 \cdot 10^7$ Па). Збільшення добавки парафіну не впливає на залежність $T_z(\alpha)$ незалежно від тиску, а збільшення добавок стеарину, нафталіну і антрацену при знижених тисках призводить до зміщення положення максимуму у бік стехіометрії, а при підвищених тисках – не позначається на залежності $T_z(\alpha)$.

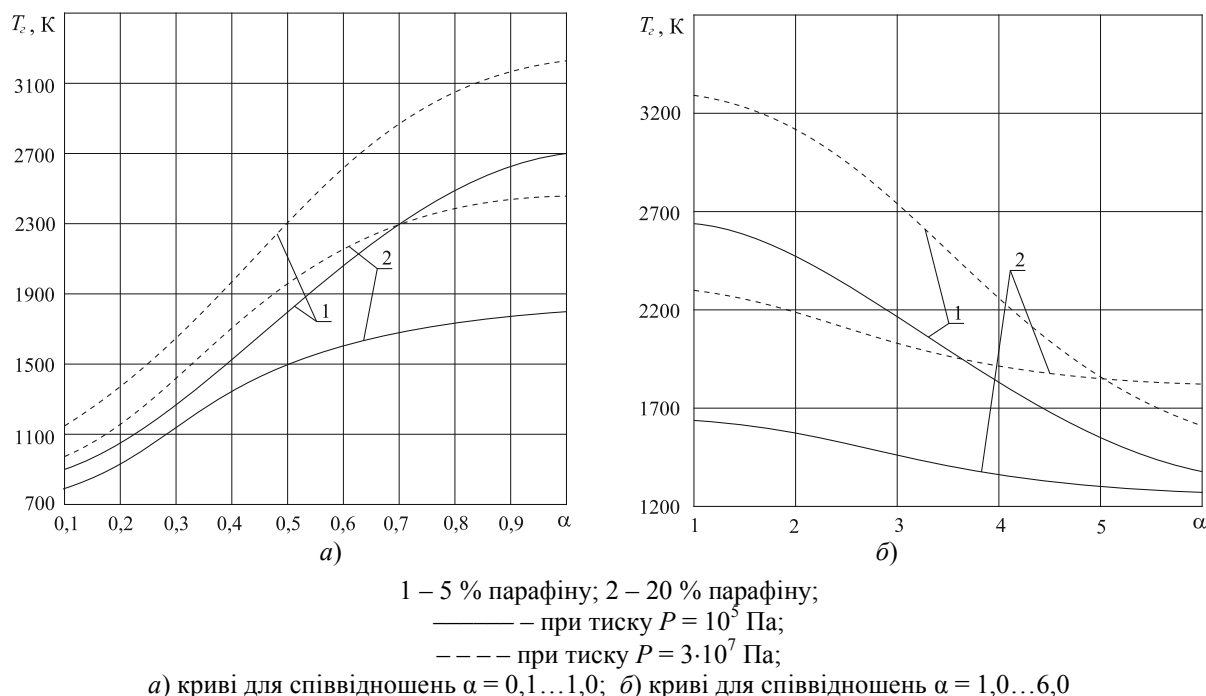


Рисунок 5 – Вплив добавок парафіну на залежність температури продуктів згоряння суміші магнію з нітратом калію від коефіцієнта надлишку окиснювача

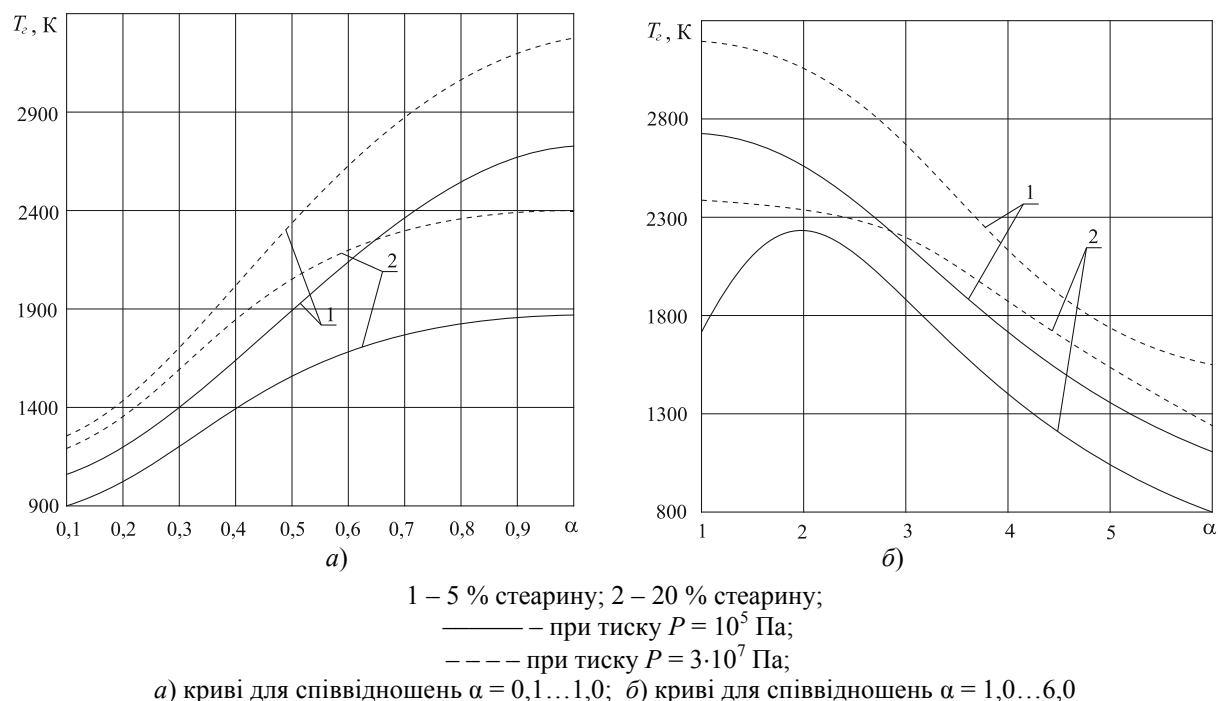


Рисунок 6 – Вплив добавок стеарину на залежність температури продуктів згорання суміші магнію з нітратом калію від коефіцієнта надлишку окиснювача

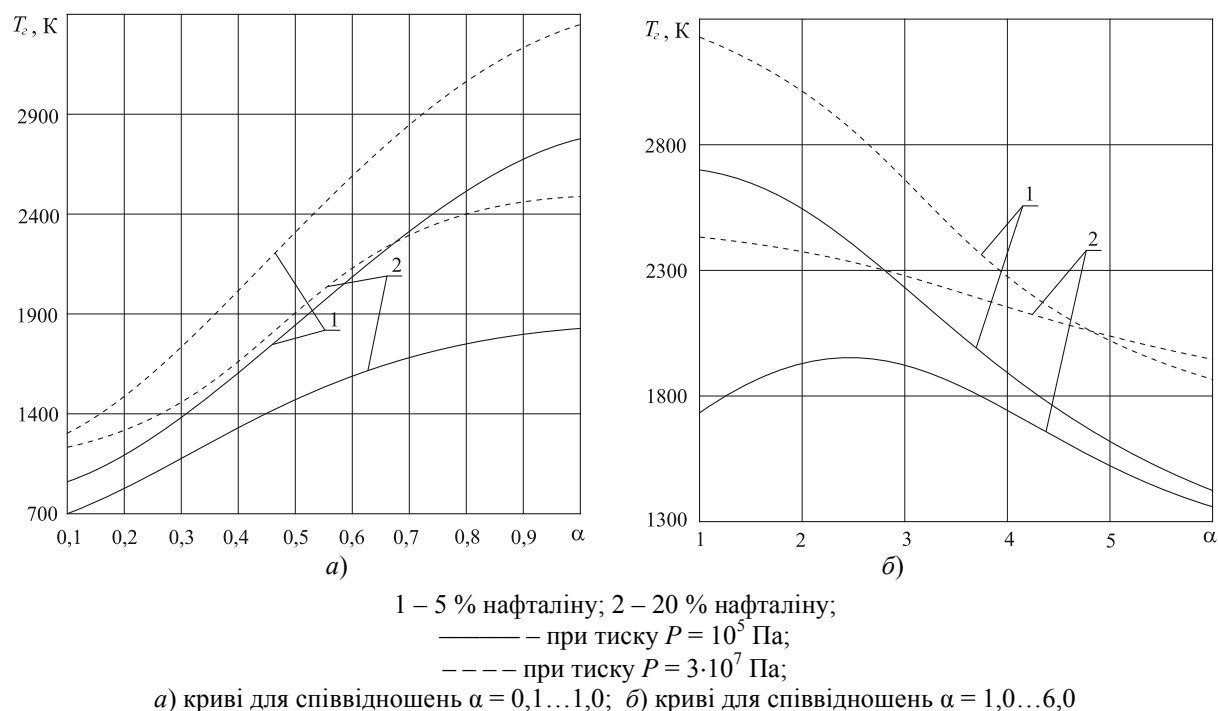
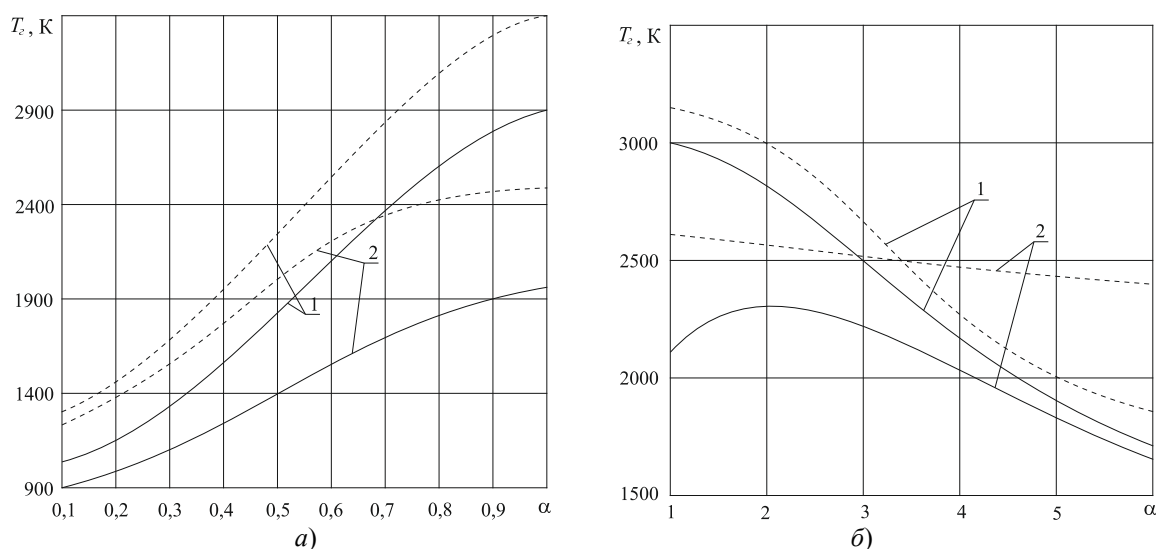


Рисунок 7 – Вплив добавок нафталіну на залежність температури продуктів згорання суміші магнію з нітратом калію від коефіцієнта надлишку окиснювача

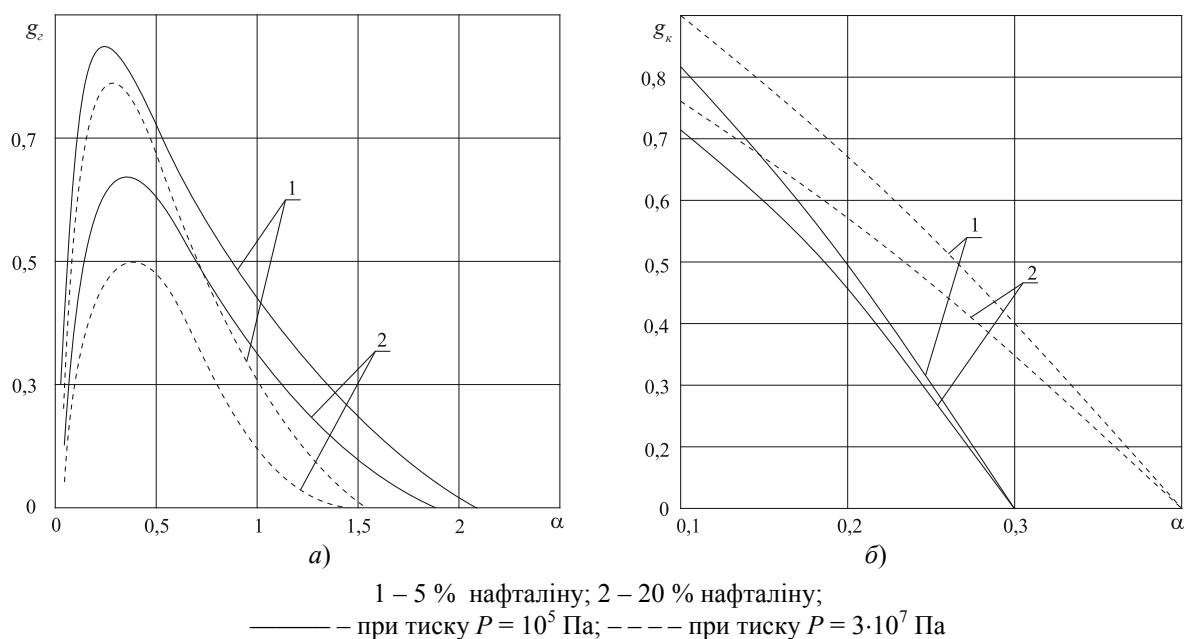


1 – 5 % антрацену; 2 – 20 % антрацену;
 — при тиску $P = 10^5$ Па; - - - при тиску $P = 3 \cdot 10^7$ Па;
 а) криві для співвідношень $\alpha = 0,1 \dots 1,0$; б) криві для співвідношень $\alpha = 1,0 \dots 6,0$

Рисунок 8 – Вплив добавок антрацену на залежність температури продуктів згоряння суміші магнію з нітратом калію від коефіцієнта надлишку окиснювача

Наявність добавок парафіну, стеарину, нафталіну і антрацену впливає на якісний і кількісний склад продуктів згоряння сумішей магнію з нітратом калію. За даними розрахунку, незалежно від природи добавки, основними продуктами згоряння (десяті й соті частки) є: гази – H_2^g , N_2^g , CO^g , K^g , Mg^g ; конденсати – Mg^k , MgO^k . Порівняння отриманого складу продуктів згоряння зі складом продуктів згоряння подвійної суміші вказує на відсутність у про-

дуктах згоряння потрійної суміші O_2^g , MgO^g , K_2O^k . На рисунках 9–12 на прикладі суміші магнію з нітратом калію і добавками нафталіну показано залежність концентрацій продуктів згоряння, що містяться в найбільшій кількості, від коефіцієнта надлишку окиснювача і тиску. З цих даних можна бачити, що також, як і у разі подвійної суміші, якісний і кількісний склад продуктів згоряння найбільше залежить від коефіцієнта надлишку окиснювача.



1 – 5 % нафталіну; 2 – 20 % нафталіну;
 — при тиску $P = 10^5$ Па; - - - при тиску $P = 3 \cdot 10^7$ Па

Рисунок 9 – Вплив добавок нафталіну на залежність від α об'ємного вмісту Mg^g (а) і масової частки конденсованого Mg^k (б) в продуктах згоряння суміші магнію з нітратом калію

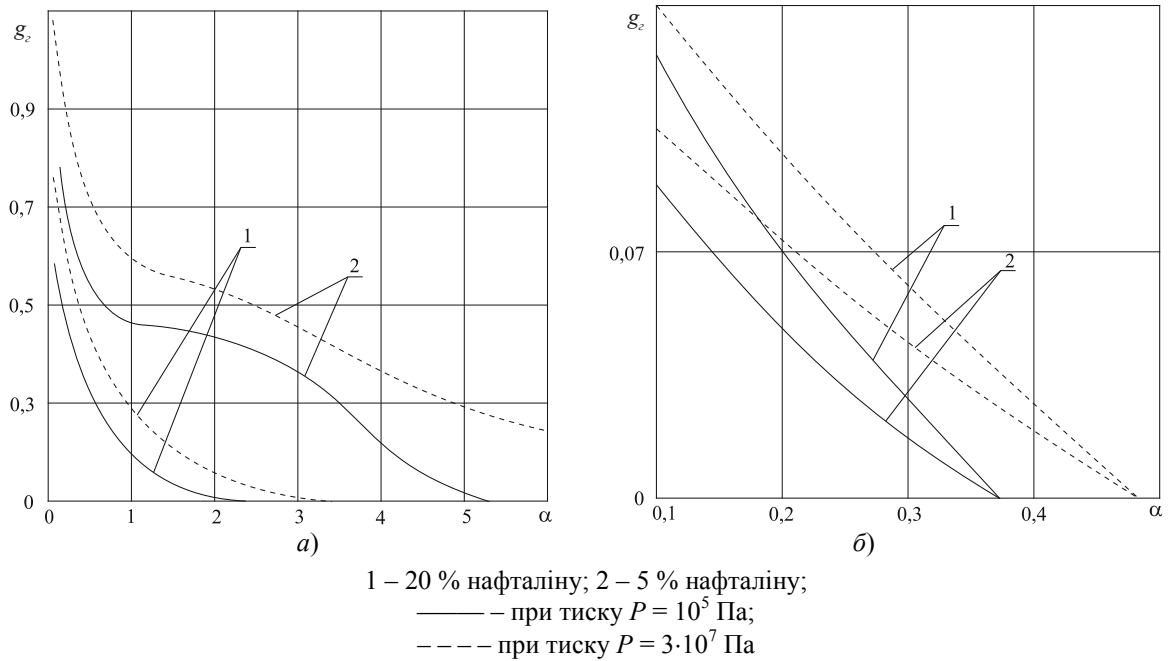


Рисунок 10 – Вплив добавок нафталіну на залежність від α об'ємного вмісту H_2^r (а) і N_2^r (б) у продуктах згоряння суміші магнію з нітратом калію

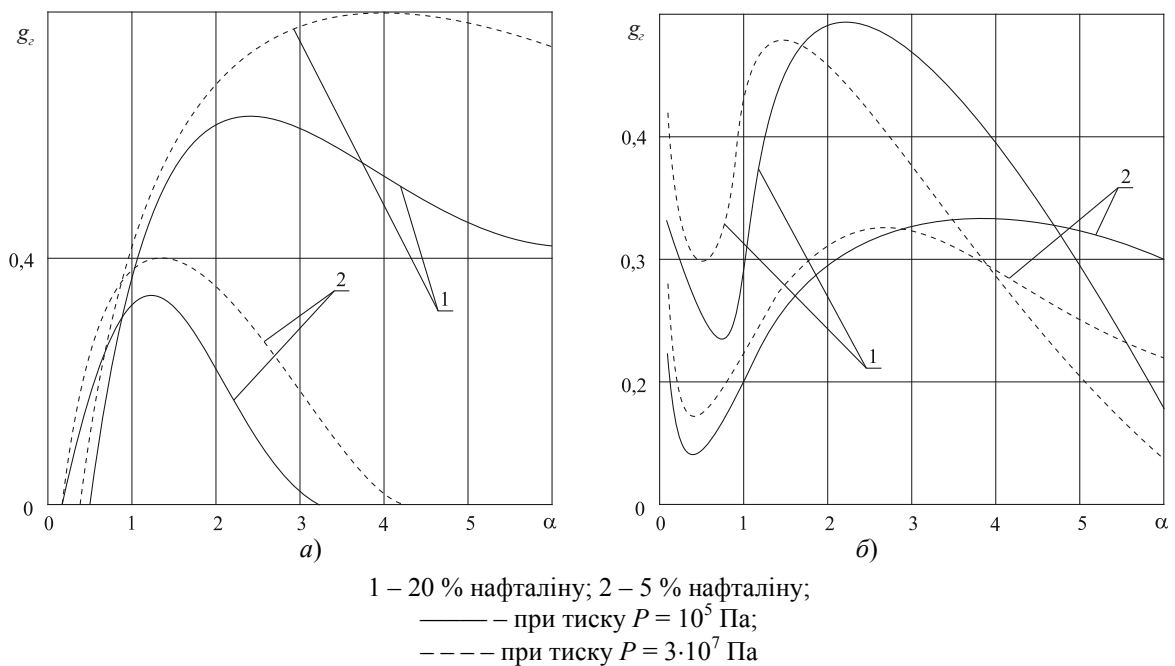


Рисунок 11 – Вплив добавок нафталіну на залежність від α об'ємного вмісту CO^r (а) і K^r (б) у продуктах згоряння суміші магнію з нітратом калію

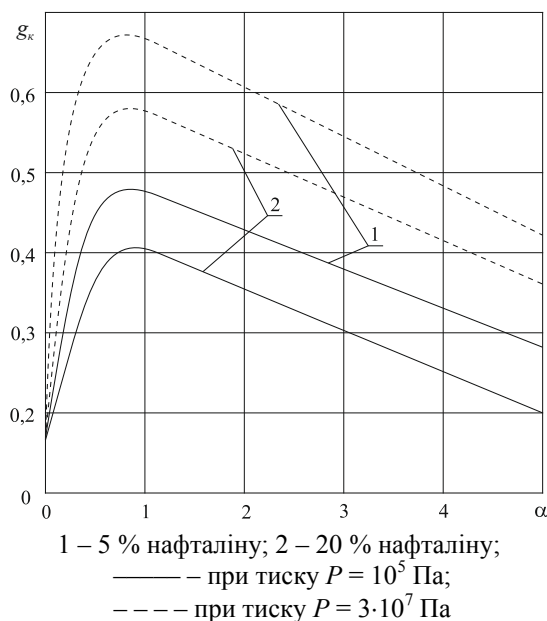


Рисунок 12 – Вплив добавок нафталіну на залежність від α масової частки конденсованого MgO^k в продуктах згоряння суміші магнію з нітратом калію

Висновки. В результаті проведених термодинамічних розрахунків температури та складу продуктів сумішей з порошків магнію та нітрату калію вперше встановлено наступні закономірності:

1. Температура продуктів згоряння найбільш суттєво залежить від коефіцієнта надлишку окиснювача α та має максимальні значення $T_{cmax} = 3080...4150$ К при $\alpha = \alpha_{T_{cmax}} = 1,0...1,15$ і тисках $P = 10^5...3 \cdot 10^7$ Па; введення добавок органічних речовин у суміш приводить до зменшення T_c , а також неоднозначно впливає на характер залежностей $T_c(\alpha)$: для добавок парафіну положення $\alpha_{T_{cmax}}$ на кривій $T_c(\alpha)$ не змінюється, а для добавок стеарину, нафталіну та антрацену – зміщується у бік надлишку металевого пального.

2. Якісний і кількісний склад продуктів згоряння сумішей найбільш суттєво залежить від α та P , водночас характерним діапазонам їх зміни відповідає певний склад газоподібних та конденсованих продуктів згоряння сумішей: десятитисячні частки N^r , NO_2^r ; тисячні – Mg_2^r , K_2^r ; соті – O^r , NO^r , CO^r , K^r ; десятки – Mg^r , MgO^r , K_2O^r , O_2^r , MgO^k , Mg^k , N_2^r . Введення в суміш органічних добавок приводить до помітної зміни якісного та кількісного складу її продуктів згоряння: основними продуктами (десяті та соті частки) є гази N_2^r , H_2^r , CO^r , K^r , Mg^r та конденсати Mg^k , MgO^k , а O_2^r , MgO^r та K_2O^k вже відсутні.

Список використаних джерел

- [1] А. А. Шидловский, *Основы пиротехники*. Москва, Россия: Машиностроение, 1973.
- [2] Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Л. Я. Кашпоров и др. *Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем*. Москва, Россия: Машиностроение, 1982.
- [3] В. В. Тарасов, и Ю. Г. Якушенков, *Инфракрасные системы «смотрящего» типа*. Москва, Россия: Логос, 2004.
- [4] А. Р. Глущенко, В. И. Гордиенко, А. В. Бурак, и А. Ю. Денисенко, *Танковые ночные системы и приборы наблюдения*. Черкассы, Украина: Фотоприбор, 2007.
- [5] В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. И. Заика, И. В. Яценко, и В. В. Цыбулин, *Процессы горения металлизированных конденсированных систем*. Киев, Украина: Наукова думка, 2008.
- [6] А. В. Молодык, "История развития научно-технического направления "Оптические головки самонаведения", на 2-й Укр. наук.-техн. конф. *Спеціальне приладобудування: стан та перспективи*: зб. тез доп. Київ: КП СПБ "Арсенал", 2016.
- [7] А. В. Молодык, Н. И. Носов, Г. А. Смолляр, и Д. В. Лозбин, "Опыт и перспективы решения теплофизических проблем создания оптико-электронных специзделений ИК-техники", на 2-й Укр. наук.-техн. конф. *Спеціальне приладобудування: стан та перспективи*: зб. тез доп. Київ: КП СПБ "Арсенал", 2016.
- [8] Л. П. Вогман, В. А. Зуйков, В. Е. Татаров, и В. В. Лепесий, "Разработка рекомендаций по обеспечению пожарной безопасности фейерверочных пиротехнических изделий", *Пожаровзрывобезопасность: Междунар. науч.-практ. журн.*, № 3, с. 24-41, 2002.
- [9] Г. Н. Кириллов, Ю. И. Дешевых, А. Н. Гилетич, Л. П. Вогман, В. А. Зуйков, А. Н. Нестругин, и А. М. Пшеничников, *Требования пожарной безопасности при обращении с пиротехнической продукцией. Обзорно-аналит. материал*. Москва, Россия: ВНИИПО и ДНД МЧС России, 2010.
- [10] О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, В. В. Цыбулин, та В. М. Тупицький, "Експериментально-статистичні моделі для отримання бази даних по швидкості

- та вибухонебезпечним режимам горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термовпливів", на *I Всеукр. наук.-практ. конф. Актуальні проблеми управління у сфері цивільного захисту*. Харків: Нац. ун-т цивільного захисту України, 2012.
- [11] О. В. Кириченко, "Влияние повышенных температур нагрева и внешних давлений на скорость и пределы горения пиротехнических нитратно-циркониевых смесей", *Науковий вісник УкрНДІПБ*, № 2 (26), с. 104-110, 2012.
- [12] О. В. Кириченко, П. С. Пашковський, В. А. Ващенко, та Ю. Г. Лега, *Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратовмісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів*. Київ, Україна: Наукова думка, 2012.
- [13] О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін, та В. М. Тупицький, "Швидкість та межі горіння піротехнічних нітратно-магнієвих сумішей в умовах зовнішніх термовпливів", *Проблеми пожежної безпеки*, № 34, с. 73-95, 2013.
- [14] О. В. Кириченко, "Математичне моделювання процесу нагріву металевих корпусів піротехнічних виробів в умовах пострілу та польоту", *Науковий вісник УкрНДІЦЗ*, № 1 (27), с. 173-186, 2013.
- [15] В. А. Ващенко, П. И. Заика, Д. М. Краснов, С. И. Стащенко, и Ю. И. Кикоть, "Термодинамические основы прогнозирования пределов горения металлизированных конденсированных систем", *Вісник Сумського державного університету*, № 2 (13), с. 89-98, 1999.
- [16] О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, П. І. Заїка, та В. М. Тупицький, "Термодинамічні розрахунки температури та складу продуктів згорання нітратно-цирконієвих сумішей", *Пожежна безпека: теорія і практика*: зб. наук. пр. АПБ ім. Героїв Чорнобиля, № 6, с. 62-65, 2010.
- [17] О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, та В. М. Тупицький, "Залежність температури та складу продуктів згорання піротехнічних сумішей магнію з нітратовмісними окислювачами від співвідношення компонентів та зовнішнього тиску", на *II Міжнар. наук.-практ. конф. Техногенна безпека: теорія, практика, інновації*. Львів: ЛДУБЖ, 2011.
- [18] О. В. Кириченко, и В. В. Липей, "Метод термодинамического расчета температуры и состава продуктов сгорания высокометаллизированных пиротехнических смесей", на *V Междунар. науч.-практ. конф. студентов и курсантов. Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы*. Минск: ГУО "ГИИ" МЧС Республики Беларусь, 2011.
- [19] О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, та В. В. Цибулін, "Термодинамічний аналіз та прогнозування пожежонебезпечних властивостей піротехнічних втратно-металічних сумішей", на *III Міжнар. наук.-практ. конф. Безпека життєдіяльності в XXI столітті*. Дніпропетровськ: ПГАСА, 2011.
- [20] О. В. Кириченко, В. Д. Акіншин, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін, та В. М. Тупицький, "Керування базою даних по термодинамічним характеристикам піротехнічних нітратно-металевих сумішей, що визначають їх пожежонебезпечні властивості в умовах зовнішніх впливів", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Пожежна безпека – 2011*. Харків: Нац. ун-т цивільного захисту, 2011.

References

- [1] A. A. Shidlovskii, *Bases of pyrotechnics*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1973 [in Russian].
- [2] N. A. Silin, V. A. Vaschenko, L. Ya. Kashporov et al., *Combustion of metalized heterogeneous condensed systems*. Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1982 [in Russian].
- [3] V. V. Tarasov, and Yu. G. Yakushenkov, "Looking" type infrared systems. Moscow, Russia: Logos, 2004 [in Russian].
- [4] A. R. Glushchenko, V. I. Gordienko, A. V. Burak, and A. Yu. Denisenko, *Tank night systems and surveillance devices*. Cherkassy, Ukraine: Fotopribor, 2007 [in Russian].
- [5] V. A. Vashchenko, O. V. Kirichenko, Yu. G. Lega, P. I. Zaika, I. V. Yatsenko, and V. V. Tsybulin, *Combustion processes of metallized condensed systems*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 2008 [in Russian].
- [6] A. V. Molodyk, "The history of the development of scientific and technical direction "Optical homing heads", in *Coll. of Abstracts 2nd Ukr. Sci.-Tech. Conf. Special Instrument Making: State and Prospects*. Kyiv: Arsenal, 2016 [in Russian].
- [7] A. V. Molodyk, N. I. Nosov, G. A. Smolar, and D. V. Lozbin, "Experience and pro-

- spects for solving thermos-physical problems of creating optoelectronic special products for infrared technology", in *Coll. of Abstracts 2nd Ukr. Sci.-Tech. Conf. Special Instrument Making: State and Prospects*. Kyiv: Arsenal, 2016 [in Russian].
- [8] L. P. Vogman, V. A. Zuykov, V. E. Tatarov, and V. V. Lepesiy, "Development of recommendations for ensuring fire safety of fireworks pyrotechnic products", *Pozharovzryvobezопасnost*, no. 3, pp. 24-41, 2002 [in Russian].
- [9] G. N. Kirillov, Yu. I. Deshevykh, A. N. Giletich, L. P. Vogman, V. A. Zuykov, A. N. Nestrugin, and A. M. Pshenichnikov, *Fire safety requirements for handling pyrotechnic products. Review and analytical material*. Moscow, Russia: VNIPO i DND MChS Rossii, 2010 [in Russian].
- [10] O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, V. V. Tsybulin, and V. M. Tupytskyy, "Experimental and statistical models for obtaining a database on the rate and explosive modes of combustion of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal influences", in *Proc. Ist All-Ukr. Sci.-Pract. Conf. Current Management Issues in the Field of Civil Protection*. Kharkiv: Nats. unt tsyvilnoho zakhystu Ukrainy, 2012 [in Ukrainian].
- [11] O. V. Kirichenko, "Influence of elevated heating temperatures and external pressures on the rate and limits of combustion of pyrotechnic nitrate-zirconium mixtures", *Naukovyy visnyk Ukrayinskoho naukovo-doslidnoho instytutu pozhezhnoyi bezpeky*, no. 2 (26), pp. 104-110, 2012 [in Russian].
- [12] O. V. Kyrychenko, P. S. Pashkovsky, V. A. Vaschenko, and Yu. G. Lega, *The bases of fire safety of pyrotechnic nitrate-containing products in the conditions of external thermal influences*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 2012 [in Ukrainian].
- [13] O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, V. V. Tsybulin, and V. M. Tupytskyy, "Speed and limits of combustion of pyrotechnic nitrate-magnesium mixtures under conditions of external thermal influences", *Problemy pozharnoy bezопасnosti*, no. 34, pp. 73-95, 2013 [in Ukrainian].
- [14] O. V. Kyrychenko, "Mathematical modeling of the process of heating of metal housings of pyrotechnic articles in terms of shot and flight", *Naukovyy visnyk Ukrayinskoho naukovo-doslidnoho instytutu tsyvilnoho zakhystu*, no. 1 (27), pp. 173-186, 2013 [in Ukrainian].
- [15] V. A. Vashchenko, P. I. Zaika, D. M. Krasnov, S. I. Stashenko, and Yu. I. Kikot, "Thermodynamic foundations for predicting the combustion limits of metallized condensed systems", *Visnyk Sums'koho derzhavnoho universytetu*, no. 2 (13), pp. 89-98, 1999 [in Russian].
- [16] O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, P. I. Zayika, and V. M. Tupytskyy, "Thermodynamic calculations of temperature and composition of combustion products of nitrate-zirconium mixtures", *Pozhezhna bezpeka: teoriya i praktyka*: coll. of research papers of the Academy of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl, no. 6, pp. 62-65, 2010 [in Ukrainian].
- [17] O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, and V. M. Tupytskyy, "Dependence of temperature and composition of combustion products of pyrotechnic mixtures of magnesium with nitrate-containing oxidants on the ratio of components and external pressure", in *Proc. II Int. Sci.-Tech. Conf. Man-Caused Safety: Theory, Practice, Innovations*. Lviv: LDUBZh, 2011 [in Ukrainian].
- [18] O. V. Kirichenko, and V. V. Lipey, "Method of thermodynamic calculation of temperature and composition of combustion products of highly metallic pyrotechnic mixtures", in *Proc. V Int. Sci.-Tech. Conf. of Studentov and Cadets. Ensuring Life Safety: Problems and Prospects*. Minsk: GUO "GII" MChS Respubliki Beklarus, 2011 [in Russian].
- [19] O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, and V. V. Tsybulin, "Thermodynamic analysis and forecasting of fire-hazardous properties of pyrotechnic loss-metal mixtures", in *Proc. III Int. Sci.-Tech. Conf. Life Safety in the XXI Century*. Dnipropetrovsk: PHASA, 2011 [in Ukrainian].
- [20] O. V. Kyrychenko, V. D. Akinshyn, V. A. Vashchenko, V. V. Tsybulin, and V. M. Tupytskyy, "Management of the database on thermodynamic characteristics of pyrotechnic nitrate-metal mixtures that determine their flammable properties under external influences", in *Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. Fire Safety – 2011*. Kharkiv: Nats. unt tsyvilnoho zakhystu, 2011 [in Ukrainian].

R. B. Motrichuk¹,

e-mail: r.motrichuk@gmail.com

O. V. Kyrychenko¹, Dr.Tech.Sc., professor,

e-mail: okskir@meta.ua

V. A. Vaschenko², Dr.Tech.Sc., professor,

e-mail: v.vaschenko@chdtu.edu.ua

S. O. Kolinko², Ph.D., associate professor,

e-mail: s.kolinko@chdtu.edu.ua

T. I. Butenko², Ph.D., associate professor,

e-mail: but82016@gmail.com

Ye. P. Kyrychenko¹,

e-mail: kyrychenkojp@gmail.com

V. V. Tsybulin²

e-mail: tsybulin22@gmail.com

¹Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl
of the National University of Civil Defense of Ukraine,

Onoprienko str., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

²Cherkasy State Technological University,
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine**REGULARITIES OF INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS
AND EXTERNAL FACTORS ON THE TEMPERATURE AND COMPOSITION
OF COMBUSTION PRODUCTS OF PYROTECHNICAL NITRATE-METAL MIXTURES**

Methods for calculating the temperature and composition of combustion products of mixtures of magnesium and potassium nitrate powders, which are widely used in the equipment of various pyrotechnic articles (lighting, signaling, tracing, etc.), are currently absent. The aim of this work is to determine the use of thermodynamic methods to calculate the dependences of the temperature and composition of combustion products of pyrotechnic mixtures of magnesium and potassium nitrate powders on the ratio of components and external pressure. The results of thermodynamic calculations of the dependences of the temperature and composition of combustion products of pyrotechnic mixtures of magnesium and potassium nitrate powders on the coefficient of excess oxidant $\alpha = 0,1 \dots 3,0$, the value of organic additive $\varepsilon = 5 \dots 20\%$ and external pressure $P = 10^5 \dots 3 \cdot 10^7$ Pa, which determine the explosive modes of their combustion, are obtained. The research has been carried out using the methods of thermodynamic analysis of combustion processes of mixtures taking into account the phase imbalance of their combustion products. According to the thermodynamic calculation, the temperature of the combustion products significantly depends on the coefficient of excess oxidant in the mixture and pressure and has a maximum. From the data of thermodynamic calculations of the temperature of combustion products of mixtures of magnesium + potassium nitrate + paraffin, stearin, naphthalene, anthracene it follows that the introduction of additives of organic matter into the mixture of magnesium with sodium nitrate does not significantly change the overall temperature of combustion products, pressure for double mixture. The analysis of the results of calculations shows that regardless of the nature of the additive, the curve $T_c(\alpha)$, as in the case of a double mixture, at different pressures has a maximum. When adding paraffin, naphthalene and anthracene to the mixture, the value of T_c at $\alpha = 0,1$, in contrast to the double mixture and the mixture with the addition of stearin, is greater than at $\alpha = 6,0$. The introduction of the addition of stearin into the mixture, regardless of the coefficient of excess oxidant and pressure, leads to a significant reduction in T_c . The introduction of the same additives of paraffin, naphthalene and anthracene in the mixture leads to a significant decrease in T_c , regardless of α only in the region of low pressure, in the region of high pressure for large α ($\alpha > 5,0$), on the contrary, increasing the addition of these substances leads to an increase in T_c . When adding stearin, naphthalene and anthracene additives to the mixture, the position of the maximum T_{cmax} is shifted towards the excess of oxidant, which is not observed when adding paraffin to the mixture.

Keywords: pyrotechnic mixtures, thermodynamic calculations, nitrate-containing oxidizer, metal fuel, combustion processes, fire safety.

Стаття надійшла 29.10.2020

Прийнято 02.12.2020