

УДК 614.841:536.46

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ЧАСТИНОК МЕТАЛЕВОГО ПАЛЬНОГО У ПРОДУКТАХ РОЗКЛАДАННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ НІТРАТНО-ЦИРКОНІЄВИХ СУМІШЕЙ

<https://doi.org/10.33269/nvz.2024.1.39-46>

Козяр Н. М.¹, ORCID iD 0000-0001-9082-0771
Кириченко О. В.¹, ORCID iD 0000-0002-0240-1807
Романюк І. П.², ORCID iD 0009-0003-7721-9107
Ващенко В. А.¹, ORCID iD 0000-0003-0722-9353
Дядюшенко О. О.^{1*}, ORCID iD 0000-0003-0797-2251
Балло Я. В.³, ORCID iD 0000-0002-9044-1293
*E-mail: oleksandr_diadiushenko@chipb.org.in

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна

²Національний університет цивільного захисту України, Україна

³Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 19.03.2024

Пройшла рецензування: 10.04.2024

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

пожежна безпека, піротехнічні вироби, піротехнічні суміші, зовнішні термічні дії, теплові процеси

АНОТАЦІЯ

У сьогоденні велике практичне значення мають методи запобігання виникненню вимушених пожежонебезпечних руйнувань виробів у разі впливу зовнішніх термічних дій. Для розроблення таких методів необхідно мати результати досліджень процесів розвитку горіння зарядів сумішей у вказаних умовах. Основу цих результатів мають становити дослідження процесів горіння частинок цирконію у продуктах термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів та розглядуваних добавок речовин. Метою роботи є аналіз і встановлення закономірностей процесу горіння частинок цирконію в активних газоподібних продуктах термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів та добавок розглядуваних речовин для визначення пожежонебезпечних властивостей піротехнічних сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. Усі дослідження проводились з порошками цирконію, що випускаються піротехнічною промисловістю, на стандартному піротехнічному обладнанні та з використанням сучасних методів фізико-хімічного аналізу, методів кінознімання та мікрокінознімання, контактних і безконтактних методів вимірювання температури, методів рентгеноструктурного та мікрорентгеноструктурного аналізів тощо. Під час аналізування спалахування та горіння одиночних частинок цирконію у потоці нагрітого повітря встановлено, що спалахування частинок відбувалося за 623 K, а горіння закінчувалося їх розщепленням. Швидкість горіння частинок кальцієтермічного цирконію була вище, ніж натрієтермічного. Наведено результати досліджень процесу горіння частинок цирконію у газоподібних продуктах термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів (нітратів лужних та лужноземельних металів), добавок органічних та неорганічних речовин, які входять до складу піротехнічних багатокомпонентних нітратно-цирконієвих сумішей, що передують передчасному вибухонебезпечному загорянню зарядів сумішей та пожежонебезпечному руйнуванню виробів під час їх обігу (зберігання, транспортування та застосування) з урахуванням впливу зовнішніх термічних дій (нагріву внаслідок виникнення пожеж, ударних термодій в умовах пострілу та польоту тощо).

Постановка проблеми. Із кожним роком у народному господарстві та військовій галузі України все більш широкого застосування набувають піротехнічні вироби різного призначення (спалахувальні та займисті вироби, трасувальні патрони та снаряди, піротехнічні ПЧ-випромінювачі, пристрої ракетно-космічної техніки тощо) для отримання спеціальних ефектів (світлових, кольорово-полумєневих, теплових, звукових, реактивних тощо) [1–6]. Основу цих виробів становлять заряди з багатокомпонентних нітратно-цирконієвих сумішей: ущільнених сумішей з порошків цирконію, нітратовмісних окиснювачів (NaNO_3 , KNO_3 , $\text{Ba(NO}_3)_2$ тощо), добавок органічних (парафіну, стеарину, нафталіну, ідитолу та інших) і неорганічних (фторидів та оксидів металів тощо) речовин, які під час зберігання та транспортування або застосування виробів можуть піддаватись різним зовнішнім термічним впливам. Унаслідок зазначеного відбувається передчасне спрацьовування зарядів сумішей, які входять до складу виробів, та прискорення процесу їх горіння в умовах замкненого об'єму під час зростання температури нагрівання та зовнішнього тиску аж до вибухонебезпечних режимів його протікання. Це призводить до руйнувань виробів, які супроводжуються проявом різних чинників пожежі (полум'я або високотемпературний струмінь продуктів згорання, дисперговані продукти (уламки корпусів, розжарені частинки зарядів, іскри тощо)).

З огляду на це велике практичне значення мають методи запобігання виникненню вимушених пожежонебезпечних руйнувань виробів у разі впливу зовнішніх термічних дій. Для розроблення таких методів необхідно мати результати досліджень процесів розвитку горіння зарядів сумішей у вказаних умовах. Основу цих результатів мають становити дослідження процесів горіння частинок цирконію у продуктах термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів та розглядуваних добавок речовин.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вказані дослідження зазначені у різних монографіях, наукових статтях та працях [7–11], проте немає їх систематизації та узагальнення. Це утруднює їх застосування для теоретичного аналізу процесу горіння зарядів сумішей в умовах зовнішніх термічних дій (підвищені температури нагріву, зовнішні тиски, склад навколишнього середовища тощо).

Недоліком запалювання цирконійвмісних піротехнічних складів є їх висока чутливість до механічних впливів і електричної іскри, що створює значну небезпеку під час роботи з ними. Першочерговим завданням є пошук шляхів зниження чутливості таких піротехнічних складів і небезпеки ручної роботи з ними. Такого результату можна досягти через упровадження додаткової технологічної операції – гранулювання піротехнічного складу на етапі його виготовлення.

Методи дослідження. Усі дослідження проводились з порошками цирконію, що випускаються піротехнічною промисловістю, на стандартному піротехнічному обладнанні та з використанням сучасних методів фізико-хімічного аналізу [1; 3]: методів кінознімання та мікрокінознімання, контактних та безконтактних методів вимірювання температури, методів рентгеноструктурного та мікрорентгеноструктурного (МРСА) аналізів тощо.

З аналізу досліджень поведінки компонентів розглядуваних сумішей у разі підвищених температур нагріву, притаманних κ -фазі, сумішей в умовах горіння (1000...1200 К) [1; 12–15], випливає, що основними активними газоподібними продуктами їх розкладання є O_2 , $\text{O}_2 + \text{N}_2$, CO , CO_2 та інші. Водночас CO та CO_2 становлять соті частки. Отже, нижче розглядаються результати досліджень процесу горіння частинок цирконію у вказаних газоподібних продуктах, включаючи повітря, основою якого є суміш газів $\text{O}_2 + \text{N}_2$.

Формулювання цілей дослідження. Метою цієї роботи є аналіз і встановлення закономірностей процесу горіння частинок цирконію в активних газоподібних продуктах термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів та добавок розглянутих речовин для визначення пожежонебезпечних властивостей піротехнічних сумішей в умовах зовнішніх термічних дій.

Виклад основного матеріалу. Спектрографічними дослідженнями горіння цирконієвої фольги у лампі-спалаху, що заповнена киснем, встановлено поверхневий характер горіння цього металу. У спектрі цирконієвого полум'я знайдені лінії Zr та ZrO₂; ці речовини існували протягом часу горіння та ймовірно були продуктами розпаду ZrO₂. Кольорова температура горіння Zr у лампі-спалаху становила близько 3400...3600 К.

Унаслідок вивчення горіння цирконієвих дротинок, які підвішували вертикально та запалювали з нижнього боку, встановлено: їх горіння у разі концентрації кисню, що перевищує деяку критичну, відбувалося з утворенням крапель розплаву, який складається з суміші металу та оксиду. Краплі збільшувалися у розмірі та періодично зривалися з дротинки, так що горіння мало переривчастий характер. У разі концентрації O₂ нижче критичної на поверхні дротинки утворюється твердий шар оксиду, який може розтріскуватися та руйнуватися, залишаючись як порожнисті оболонки. Критична концентрація O₂ залежить від діаметра дротинки.

Нижні гілки кривих швидкості поширення зони горіння (рис. 1) відповідають утворенню шару твердого оксиду. У цьому разі швидкість горіння практично не залежить від концентрації кисню. У разі режиму горіння, що відповідає розчиненню оксиду в металі (верхні гілки кривих), швидкість поширення полум'я значно залежить від концентрації кисню.

На рис. 2 показано залежність швидкості поширення полум'я від тиску

O₂ для цирконію, що горить у чистому кисні, а на рис. 3 – температура зони горіння, виміряна фотоелектричним методом.

На основі сильної залежності швидкості горіння від концентрації кисню зроблено висновок, що швидкість горіння на поверхні розплавленої суміші оксид – метал визначається здебільшого дифузією кисню з навколишнього середовища.

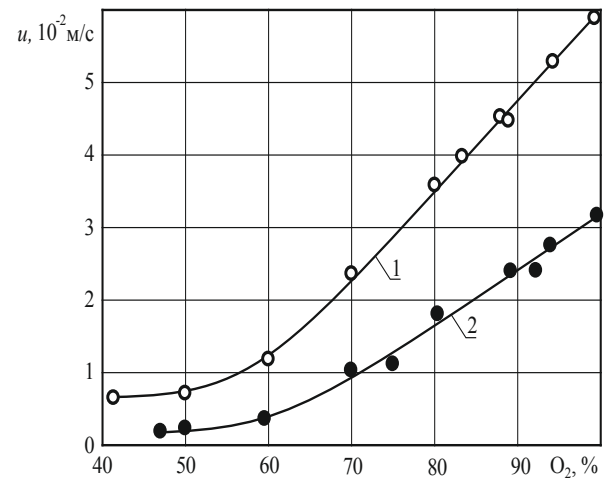


Рисунок 1 – Залежність швидкості поширення зони горіння вздовж металевих дротинок у киснево-азотних сумішах у разі тиску $1,013 \cdot 10^5$ Па від концентрації кисню: 1 – діаметр дротинки $5 \cdot 10^{-4}$ м; 2 – діаметр дротинки 10^{-3} м; •• – експериментальні дані

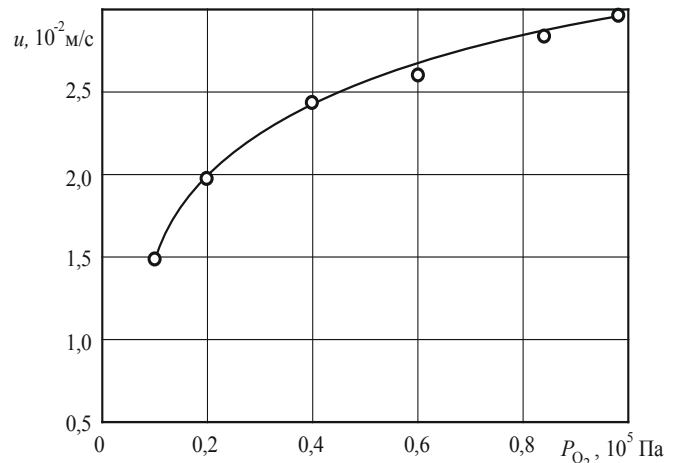


Рисунок 2 – Залежність швидкості поширення зони горіння вздовж дротинки діаметром $1,2 \cdot 10^{-3}$ м від тиску кисню; •• – експериментальні дані

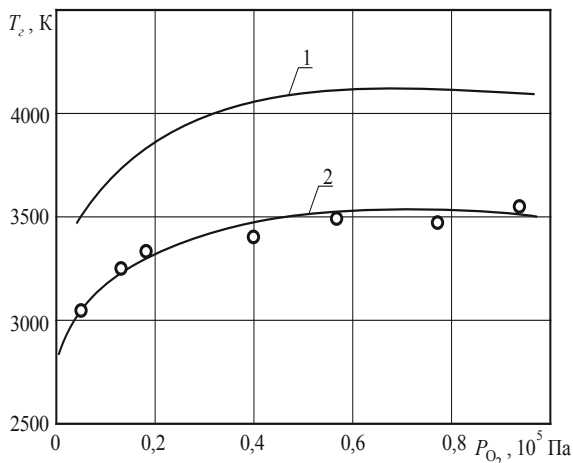


Рисунок 3 – Залежність температури зони горіння дротинки від тиску кисню: 1 – розрахунок, 2 – експеримент; \circ – експериментальні дані

З огляду на баланс тепловиділення та тепловтрат з урахуванням обмежень, що накладаються на тепловиділення дифузійною кисню (рис. 3), обчислена також температура зони горіння. Однак кількісні розрахунки мають суттєве розходження з експериментом, а якісно результати достатньо добре корелюють з експериментом.

Порошок цирконію як розсип горить енергійно з утворенням незначного факела полум'я жовтого кольору. Цирконій як спресований порошок горить повільно, полум'я практично немає. Шлаки, що утворилися після згорання пресованого зразка цирконію, мають щільну структуру. Їх зовнішня поверхня білого кольору, всередині є чорні прошарки. За даними хімічного аналізу, у шлаках міститься близько 45% неокисненого Zr.

Під час спалювання порошоків Zr та його сплавів також підтверджений поверхневий механізм горіння. Диму, полум'я або нальоту на стінках реакційної посудини не виявлено. Водночас спостерігалось два режими горіння – тління та спалах. У разі тління немає різкого стрибка температури порошку в момент спалахування. Величину температури займання можна визначити тільки за показами диференціальної термопари. Горіння відбувається повільно. У разі спалаху температура порошку різко зростає, весь зразок миттєво нагрівається. Перший режим характерний для сплавів із

високою температурою спалахування, наприклад, Zr + 88% Ti, Zr + 37% Si (та більше). Водночас легкозаймісті сплави згорають зі спалахом.

Мікроструктурний, хімічний та рентгеноструктурний аналізи продуктів згорання дали змогу припустити такий механізм цих двох форм горіння.

У разі тління відбувається звичайне високотемпературне окислення металу через зустрічну дифузійну атомів або іонів металу та кисню через оксидну плівку. Рівновага між тепловиділенням та тепловідводом встановлюється за температури зразка 1073...1273 K. Подальшому підвищенню температури у поверхневому шарі зразка перешкоджає тепловідвід випромінюванням, що зростає пропорційно четвертому ступеню температури. У процесі тління товщина оксидної плівки та її дифузійний опір зростають, тепловиділення зменшується, температура зразка падає та після досягнення певної товщини плівки горіння припиняється.

Горіння Zr зі спалахом відбувається у разі появи на поверхні частинки, що горить, хоча б однієї ділянки розплавленого металу. Це призводить, як вже зазначалося, до самоприскорення процесу розчинення оксиду у металі та поширення зони розплавленого металу на усій поверхні частинки. Після досягнення межі розчинності кисню у металі виділяється тверда оксидна фаза на поверхні частинки, горіння припиняється.

Температура горіння аерозолу (сплав Zr + 23,7% Ti) за концентрацій 0,08...0,32 кг/м³ змінюється від 1893...2013 K до 1988...2043 K. Така слабка залежність ще раз свідчить про поверхневий характер горіння цирконію. Під час дослідження спалахування та горіння одиночних частинок цирконію у потоці нагрітого повітря встановлено, що спалахування частинок відбувалося за 623 K, а горіння закінчувалося їх розщепленням. Швидкість горіння частинок кальцієтермічного цирконію була вище, ніж натрієтермічного (табл. 1).

Таблиця 1 – Характеристики спалахування та горіння одиночних частинок цирконію (активність 72,8%) у потоці нагрітого повітря за атмосферного тиску

Вид порошку	Радіус частинки, мкм	Маса частинки, 10^{-12} кг	Діапазон зміни температури повітря за час спалахування частинки, К	Час індукції τ_i , мс	Діапазон зміни температури повітря за час горіння частинки, К	Час горіння частинки τ_g , мс
Кальцієрмічний Zr	35	531	743...693	24	693...673	11,3
			763...713	22	713...703	7,2
			803...753	17	753...733	6,3
	14	76	743...703	19	703...683	8,5
			763...723	18	723...713	4,8
			803...763	14	763...743	4,5
	9	20	743...713	15	713...703	7,0
			763...733	14	733...723	3,6
			803...773	12	773...763	3,4
	5	5	743...713	14	713...703	4,5
			763...733	13	733...723	2,8
			803...783	9	783...773	2,5
Напрієрмічний Zr	13	59	773...723	19	723...703	9,1
			843...763	14	763...703	7,5
			853...773	12	773...713	5,9
	6	5,8	773...733	13	733...723	5,7
			843...773	10	773...733	4,8
			853...803	8	803...763	4,0
	3	0,7	773...743	10	743...723	4,1
			843...803	7	803...773	3,4
			853...813	5	813...783	2,8
			773...753	6	753...723	2,8
			843...813	5	813...793	1,9
			853...823	4,8	823...803	1,6

Висновки та напрями подальших досліджень. Аналіз та узагальнення даних щодо горіння цирконію у активних газоподібних продуктах (O_2 , повітря тощо) термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів ($NaNO_3$, KNO_3 , $Ba(NO_3)_2$, $Sr(NO_3)_2$ та інших), органічних (парафіну, стеарину, ідитолу, тіоколу, уротропіну та інших) і неорганічних (фториди металів (LiF , NaF , SiF , AlF_3 та інших)) речовин показують, що:

– процес горіння цирконієвої фольги у середовищі кисню має поверхневий характер; продуктами згоряння є Zr , ZrO та ZrO_2 , водночас температура продуктів згоряння становить 3400...3600 К;

– під час горіння цирконієвих дротинок у середовищі кисню для критичних концентрацій останнього відбувається утворення крапель розплаву,

який складається із суміші металу та оксиду; водночас краплі збільшуються у розмірі та періодично зриваються з дротинки, процес горіння має переривчастий характер, а швидкість горіння різко зростає зі збільшенням концентрації кисню; у разі концентрації кисню нижче критичної, яка залежить від діаметра дротинки, на її поверхні вже утворюється твердий шар оксиду, а швидкість горіння практично не залежить від концентрації кисню;

– спостерігається сильна залежність швидкості поширення полум'я вздовж цирконієвих дротинок, що горять у чистому кисні, від тиску O_2 : зростання тиску від 10^4 Па до 10^5 Па призводить до збільшення швидкості горіння у 1,8...2 рази. Це свідчить про те, що процес горіння цирконію лімітується здебільшого

дифузією кисню з навколишнього середовища;

– цирконій як порошок горить енергійно з утворенням незначного факела полум'я жовтого кольору, а як спресований порошок – горить повільно, полум'я практично немає; водночас у продуктах згоряння міститься до 45% неокисненого цирконію;

– для порошків цирконію та його сплавів (Zr + 88% Ti, Zr + 37% Si та інших) спостерігається поверхневий механізм горіння. Водночас для процесу горіння характерні такі два режими – тління, коли немає різкого стрибка температури порошку в момент спалахування, процес горіння відбувається повільно, та спалах, коли температура порошку цирконію різко зростає та весь зразок миттєво нагрівається. Перший режим є характерним для сплавів з високою температурою спалахування, а другий – для легкозаймистих сплавів;

– механізм першого режиму горіння порошку цирконію (тління) ґрунтується на високотемпературному окисненні металу через зустрічну дифузію атомів або іонів металу та кисню через оксидну плівку, що призводить до зростання її товщини й дифузійного опору; водночас тепловиділення зменшується, температура зразка знижується, а в разі досягнення повної товщини плівки процес горіння зовсім припиняється;

– механізм другого режиму горіння порошку цирконію (спалах) ґрунтується на появі на поверхні частинок, які горять, ділянок розплавленого металу, що

призводить до самоприскорення розчину оксиду в металі та поширення зон розплавленого металу на усіх поверхнях частинок. У разі досягнення межі розчинності кисню у металі виділяється твердий оксидний шар на поверхнях частинок, і процес горіння припиняється;

– спалахування одиничних частинок цирконію у потоці нагрітого повітря (більше 90% суміші $O_2 + N_2$) відбувається за температури 623 К; на час індукції (τ_i , мс) та час горіння (τ_g , мс) частинок цирконію у потоці нагрітого повітря ($T = 673...829$ К, тиск атмосферний) найбільш суттєво впливає їх радіус (r , мкм): збільшення r від 5 мкм до 35 мкм призводить до зростання τ_i від 9 мс до 24 мс та τ_g від 2,5 мс до 11,3 мс (для кальцієтермічного Zr), а збільшення r від 3 мкм до 13 мкм – до зростання τ_i від 4,8 мс до 14 мс та τ_g від 1,6 мс до 9,1 мс (для натрієтермічного Zr).

– Надалі метою наукових розвідок є отримання більш глибокого розуміння механізмів горіння цирконію та розвиток нових підходів до його контрольованого застосування на практиці, зокрема у галузі піротехніки у частині більш глибокого дослідження впливів концентрації кисню на процес горіння цирконію. Це стосується й механізму дифузії кисню та його взаємодії з поверхнею металу в різних умовах тиску та температури, впливу розміру частинок цирконію на їх горіння у різних середовищах, дослідження процесів горіння цирконію в умовах змішаного газового середовища, наприклад з додаванням азоту чи інших компонентів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Процессы горения металлизированных конденсированных систем : монографія / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. И. Заика, И. В. Яценко, В. В. Цыбулин. Київ : Наукова думка, 2008. 745 с.
2. Кириченко О. В. Повышение эффективности пиротехнических нитратосодержащих изделий в условиях их применения. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2009. Вип. 2. С. 89–94.
3. Діброва О. С. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нитратно-титанових сумішей : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня : 21.06.02 «Пожежна безпека» / НУЦЗ. Харків, 2020. 26 с.
4. Balanyuk V. M., Kozyar N. M., Garasymuyk O. I. Study of fire-extinguishing efficiency of environmentally friendly binary aerosol-nitrogen mixtures. *Eastern-European journal of enterprise technologies. Technical science*. 2016. Vol. 3/10 (71). P. 4–12.
5. Balanyuk V. M., Kovalyshyn V. V., Kozyar N. M. Effect of ecologically safe gas- aerosol mixtures on the velocity of explosive combustion of n-heptane. *Eastern-European journal of enterprise technologies. Technical science*. 2017. Vol.4/10 (88). P. 12–18.
6. Kyrychenko Ie., Diadiushenko O., Kyrychenko O., Dibrova O. Investigation of the Regularities of the Influence of Technological Factors and External Conditions on the Temperature and Content of Condensed Products Oxide-Containing Mixtures. *Solid State Phenomena*. 2022. Vol. 334, 115–123. doi:10.4028/p-kww878.

7. Кириченко О. В., Акіншин В. Д., Вашенко В. А., Тупицький В. М. *Горіння частинок металів у продуктах розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при зовнішньому нагріві*. Актуальні проблеми технічних та природничих наук у забезпеченні діяльності служби цивільного захисту : матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, 5–6 квіт. 2012 р., м. Черкаси. Черкаси : АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2012. С. 17–19.
8. Кириченко О. В., Вашенко В. А. та ін. Керована база даних по часам згорання частинок металевих палих в продуктах розкладання піротехнічних сумішей. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2012. Вип. 4. С. 78–83.
9. Кириченко О. В., Вашенко В. А., Тупицький В. М. *Керована база даних по часам згорання частинок металевих палих в продуктах термічного розкладання піротехнічних нітратно- металевих сумішей*. Технології захисту – 2012 : матеріали 14-ї всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників, 26 верес. 2012 р., м. Київ. Київ : Інститут державного управління у сфері цивільного захисту МНС України. 2012. С. 213–216.
10. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотричук Р. Б., Ващенко В. А., Колінко С. О. Дослідження спалахування та горіння частинок алюмінієво-магнієвих сплавів у продуктах розкладання твердих піротехнічних палив. *Цивільний захист та пожежна безпека*, 2019. Вип. 2(8). № 2(8). С. 81–85.
11. Кириченко О. В. Дослідження спалахування та горіння частинок металевих палих у продуктах розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин при зовнішніх термічних впливах. *Проблеми пожежної безпеки*. 2020 Вип. 47. С. 50–59.
12. Кириченко О. В., Мотричук Р. Б., Діброва О. С., Мельник В. П., Ващенко В. А., Бутенко Т. І. Термічне розкладання добавок органічних речовин в піротехнічних сумішах в умовах зовнішніх термовпливів. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2011. Вип. 4. С. 116–120.
13. Кириченко О. В. Термічне розкладання нітратовмісних окислювачів піротехнічних сумішей в умовах зовнішніх термовпливів. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2012. Вип. 1(25) С. 126–136.
14. Pulpea V. G., Nuță V., Pulpea D., Rotariu A., Trană E., Toader G., Rotariu T., Dîrloman F., Șomoiag P., Ungureanu M. I. Characterization of pyrotechnic composition used in tracer ammunitions. *UPB Scientific Bulletin, Series B : Chemistry and Materials Science*. 2023. Vol. 85. № 2. С. 185–198.
15. León, David, Castells, Blanca, Amez, Isabel, Casín, Juan, García Torrent, Javier, Experimental Quantification of Fire Damage Inside Pyrotechnic Stores. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023. Vol. 13, Is. 10, 6181.

REFERENCES

1. Vashchenko, V. A., Kyrychenko, O. V., Leha, Yu. H., Zayka, P. I., Yatsenko, Y. V., Tsybulin, V. V (2008). Protsessy goreniya metallizirovannykh kondensirovannykh system [Combustion processes of metallized condensed systems]. Kyiv: Naukova dumka. [In Russian].
2. Kyrychenko O. V. Increasing the efficiency of pyrotechnic nitrate-containing products under the conditions of their use. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*. 2009. Vol. 2. P. 89–94.
3. Kyrychenko, O. V., Pashkovskiy, P. S., Vashchenko, V. A., Leha Yu. H (2012). Osnovy pozhezhnoyi bezpeky pirotekhnichnykh nitratovmisnykh vyrobiv v umovakh zovnishnikh termovplyviv [Basics of fire safety of pyrotechnic nitrate-containing products in conditions of external thermal effects. Kyiv: Naukova dumka. [In Ukrainian].
4. Balanyuk, V. M., Kozyar, N. M., Garasymuyk, O. I. Study of fire-extinguishing efficiency of environmentally friendly binary aerosol-nitrogen mixtures. *Eastern-European journal of enterprise technologies. Technical science*. 2016. Vol. 3/10 (71). P. 4–12.
5. Balanyuk, V. M., Kovalyshyn, V. V., Kozyar, N.M. Effect of ecologically safe gas- aerosol mixtures on the velocity of explosive combustion of n-heptane. *Eastern-European journal of enterprise technologies. Technical science*. 2017. Vol.4/10 (88). P. 12 – 18.
6. Kyrychenko, Ie., Diadiushenko, O., Kyrychenko, O., Dibrova, O. Investigation of the Regularities of the Influence of Technological Factors and External Conditions on the Temperature and Content of Condensed Products Oxide-Containing Mixtures. *Solid State Phenomena*. 2022. Vol. 334, 115–123. doi:10.4028/p-kww878.
7. Kyrychenko, O. V., Akinshin, V. D., Vashenko, V. A., Tupytskyi, V. M. *Combustion of metal particles in decomposition products of nitrate-containing oxidizers and organic substances of pyrotechnic mixtures under external heating*. Actual problems of technical and natural sciences in ensuring the activities of the civil protection service: materials of the 5th International scientific and practical conference, April 5–6, 2012, Cherkasy. Cherkasy: APB named after Heroes of Chernobyl. 2012. P. 17–19.
8. Kyrychenko, O. V., Vashenko, V. A. and others. Controlled database on combustion times of metal fuel particles in decomposition products of pyrotechnic mixtures. *Bulletin of the Cherkasy State Technological University*. 2012. Vol. 4. P. 78 – 83.
9. Kyrychenko, O. V., Vashenko, V. A., Tupytskyi, V. M. Controlled database on combustion times of metal fuel particles in products of thermal decomposition of pyrotechnic nitrate-metal mixtures. Materials of the 14th All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Rescuers, September 26, 2012, Kyiv. Kyiv: Institute of State Administration in the Field of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Ukraine. 2012. P. 213–216.
10. Kyrychenko, O. V., Dibrova O. S., Motrichuk R. B., Vashchenko V. A., Kolinko S. O. Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum-magnesium alloys in decomposition products of solid pyrotechnic fuels. *Civil Defense and Fire Safety*. 2019. Vol. 2(8) (ISSN 2518-1777). No. 2 (8). P. 81–85.
11. Kyrychenko, O. V. Investigation of ignition and burning of metal fuel particles in decomposition products of nitrate-containing oxidants and organic substances under external thermal influences. *Problems of fire safety 2020*. Vol 47. P. 50–59.
12. Kyrychenko, V., Motrichuk, R. B., Dibrova, O. S., Melnyk, V. P., Vashchenko, V. A., Butenko, T. I. Thermal decomposition of additives of organic substances in pyrotechnic mixtures under conditions of external thermal influences. *Bulletin of the Cherkasy State Technological University*. 2011. Vol. 4. P. 116–120.

13. Kyrychenko, O. V. Thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers of pyrotechnic mixtures under conditions of external thermal influences. *Scientific Bulletin of UkrNDIPB*, 2012. Vol. 1(25). P. 126–136.
14. Pulpea, B. G., Nuță, C.-V., Pulpea, D., Rotariu, A., Trană, E., Toader, G., Rotariu, T., Dîrloman, F., Șomoiag, P., Ungureanu, M. I. (2023). Characterization of pyrotechnic composition used in tracer ammunitions. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, Volume 85, 2, 185–198
15. León, D., Castells, B., Amez, I., Casin, J., García-Torrent, J. (2023). Experimental Quantification of Fire Damage Inside Pyrotechnic Stores. *Applied Sciences (Switzerland)*, Vol. 13, Issue 10, 6181, doi:10.3390/app13106181.

REGULARITIES OF THE COMBUSTION PROCESS OF METAL FUEL PARTICLES IN THE DECOMPOSITION PRODUCTS OF PYROTECHNIC MULTICOMPONENT NITRATE-ZIRCONIUM MIXTURES

N. Koziar¹, O. Kyrychenko¹, I. Romaniuk², V. Vaschenko¹, O. Diadiushenko¹, Ya. Ballo³

¹*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes National University of Civil Defence of Ukraine, Ukraine*

²*National University of Civil Defence of Ukraine, Ukraine*

³*Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine*

KEYWORDS:

fire safety,
pyrotechnic products
based on nitrate-
zirconium mixtures,
metal fuels, nitrate-
containing oxidizers,
combustion
processes

ANNOTATION

In modern conditions, methods of preventing the occurrence of forced fire-hazardous destruction of products in the event of exposure to external thermal actions are of great practical importance. To develop such methods, it is necessary to have the results of studies of the processes of development of the combustion of mixture charges under the specified conditions. The basis of these results should be studies of the combustion processes of zirconium particles in the products of thermal decomposition of nitrate-containing oxidants and the additives in question. The purpose of the work is to analyze and establish the regularities of the process of combustion of zirconium particles in active gaseous products of thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers and additives of the considered substances to determine the fire-hazardous properties of pyrotechnic mixtures under conditions of external thermal effects. All studies were carried out with zirconium powders produced by the pyrotechnic industry, on standard pyrotechnic equipment and using modern methods of physical and chemical analysis, methods of cinematography and microcinema, contact and non-contact methods of temperature measurement, methods of X-ray structural and micro-X-ray structural analysis, etc. When studying the ignition and burning of individual zirconium particles in a stream of heated air, it was established that the ignition of the particles occurred at 623 K, and the combustion ended with their splitting. The burning rate of calcithermic zirconium particles was higher than that of sodiumthermic zirconium. The results of studies of the process of combustion of zirconium particles in gaseous products of thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers (nitrates of alkali and alkaline earth metals), additives of organic and inorganic substances that are part of pyrotechnic multicomponent nitrate-zirconium mixtures, which precede the premature explosive ignition of mixture charges and fire-hazardous destruction of products are presented. during their circulation (storage, transportation and use), taking into account the influence of external thermal actions (heating as a result of fires, shock thermodynamics in the conditions of a shot and flight etc.).