

УДК 662.613.12:669.046.44

О.В. Кириченко, канд. техн. наук, доц., Акад. пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля, м. Черкаси,
Г.В. Налева, канд. техн. наук, доц., Одес. нац. мор. акад.

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НАГРІВУ НА ШВИДКІСТЬ ТА ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНІ РЕЖИМИ ГОРІННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ НІТРАТНО-МЕТАЛЕВИХ СУМІШЕЙ

О.В. Кириченко, Г.В. Налева. **Влияние температуры нагрева на скорость и взрывонебезопасные режимы горения пиротехнических нитратно-металлических смесей.** Проведено експериментальні дослідження впливу підвищених температур нагріву на швидкість розвитку процесу горіння пиротехнічних нітратно-металевих сумішей для різних зовнішніх тисків, співвідношень компонентів і їх дисперсності.

Ключові слова: пиротехнічні вироби, нітратно-металеві суміші, процеси горіння.

О.В. Кириченко, Г.В. Налева. **Влияние температуры нагрева на скорость и взрывоопасные режимы горения пиротехнических нитратно-металлических смесей.** Проведены экспериментальные исследования влияния повышенных температур нагрева на скорость развития процесса горения пиротехнических нитратно-металлических смесей для различных внешних давлений, соотношений компонентов и их дисперсности.

Ключевые слова: пиротехнические изделия, нитратно-металлические смеси, процессы горения.

O.V. Kirichenko, G.V. Naleva. **Influence of temperature of heating is on speed and explosive modes of burning of pyrotechnic nitrate-metallic mixtures.** The experimental researches of influencing of the promoted temperatures of heating on speed of development of process of burning of pyrotechnic nitrate-metallic mixtures for different external pressures, correlations of components and their dispersion are conducted.

Keywords: pyrotechnic wares, nitrate-metallic mixtures, processes of burning.

Піротехнічні вироби різного призначення (освітлювальні та трасуючі засоби, піротехнічні ГЧ-випромінювачі, фейерверочні та освітлювальні склади та ін.) на основі ущільнених сумішей з порошків металевих пальних та нітратовмісних окислювачів, наприклад, сумішей магній + нітрат натрію, як найбільш широко використовуваних, на практиці піддаються різного роду термовпливам: при спалахуванні приміщень, де зберігаються піротехнічні вироби, споряджені зарядами з розглядуваних сумішей, в умовах транспортування при інтенсивному конвективному нагріві їх поверхонь, або при аеродинамічному нагріві металевих оболонок виробів при пострілі та в польоті [1...3]. В результаті під впливом зовнішніх теплових потоків на металеві корпуси виробів відбувається їх нагрів, що викликає передчасне спалахування та розвиток процесу горіння сумішей в умовах зростаючих температур нагріву та зовнішніх тисків. Це викликає передчасне спрацьовування виробів, що веде до їх руйнування з утворенням високотемпературних продуктів згорання, які розлітаються з великими швидкостями в різні боки і є пожежонебезпечними для навколишніх об'єктів [4...6].

Відсутність систематизованих досліджень впливу вказаних умов на швидкість та формування і розвиток граничних вибухонебезпечних режимів горіння сумішей утруднює формування бази даних пожежонебезпечних властивостей піротехнічних сумішей в умовах різних зовнішніх термовпливів.

Тому важливим є вивчення впливу підвищених температур нагріву T_0 і зовнішніх тисків P на швидкість і межі горіння сумішей для широкого діапазону зміни технологічних чинників, що використовуються в піротехнічному виробництві: коефіцієнта надлишку окислювача α , середнього розміру частинок порошку металевого пального d_m та окислювача d_N , що визначають

граничні, стійкі режими горіння сумішей, відхилення від яких призводить до некерованого розвитку процесу їх горіння: різкого зростання швидкості горіння або суттєвого її зменшення аж до припинення горіння.

Компоненти сумішей виготовлялися за технологією, прийнятною в піротехнічному виробництві [1, 3]. Зразки сумішей отримали пресуванням (коефіцієнт ущільнення $K_y=0,96\dots 0,98$) у металеві оболонки діаметром $2 \cdot 10^{-3}$ м та товщиною $8 \cdot 10^{-4}$ м; при цьому висота запресовки h складала $3\dots 4 \cdot 10^{-2}$ м. Використовувалися суміші з коефіцієнтом надлишку окислювача $\alpha=0,05\dots 6,0$ та середнім розміром частинок порошку металевого пального $d_m=74,5\dots 305$ мкм та окислювача $d_N = 100\dots 140$ мкм. Швидкість горіння u (м/с) зразків сумішей вимірювалася безконтактними методами з використанням датчиків оптичного та теплового випромінювання, що дозволяють реєструвати початок та кінець горіння зразка висотою h та знаходити середнє значення швидкості горіння за формулою $u = \frac{h}{t}$, де t — час згорання зразка.

Для знаходження концентраційних меж горіння (меж горіння по α): верхніх концентраційних меж горіння $\alpha_{\text{ВМГ}}$ та нижніх концентраційних меж горіння $\alpha_{\text{НМГ}}$ ($\alpha_{\text{ВМГ}} < 1 < \alpha_{\text{НМГ}}$) використовувалися перехідні суміші, що складаються з тих же компонентів, що й основні, але з меншим надлишком магнію при знаходженні $\alpha_{\text{ВМГ}}$ або з його більшим вмістом — при знаходженні $\alpha_{\text{НМГ}}$.

При цьому для визначення $\alpha_{\text{ВМГ}}$ (аналогічно $\alpha_{\text{НМГ}}$) використовувалася формула

$$\zeta_{\text{ВПГ}} = \frac{\zeta_{\text{М1}} + \zeta_{\text{М2}}}{2}, \quad (1)$$

де $\zeta_{\text{ВПГ}}$ — відносний масовий вміст магнію в суміші, що відповідає $\alpha_{\text{ВМГ}}$;
 $\zeta_{\text{М1}}$ — відносний масовий вміст магнію, при якому ще згоряють усі зразки;
 $\zeta_{\text{М2}}$ — відносний масовий вміст магнію, при якому вже не горить ні один із взятих для дослідження зразків.

Для проведення досліджень використовувалося відоме в піротехніці лабораторно-випробувальне обладнання [4, 5].

Установка для дослідження швидкості і меж горіння піротехнічних сумішей при підвищених температурах нагріву (до 800 К) і зовнішніх тисках (до 10^7 Па) дозволяє проводити випробування зразків сумішей при підвищених температурах нагріву та різних значеннях тиску зовнішнього середовища.

Установка призначена для одночасного спалювання трьох зразків. Точність підтримки робочого тиску в цій установці складає $\pm 5\%$. Установка включає прилад постійного тиску і систему нагріву, терморегулювання і реєстрації температури. Прилад постійного тиску містить три камери згорання, з'єднані в один блок (рис. 1). Блок камер згорання сполучений з корпусом рідинного фільтра, який перед випробуванням заповнюється водою. Термостатування зразків проводиться безпосередньо в камерах згорання перед спалюванням. При випробуванні прилад постійного тиску надувається інертним газом. Всі три зразки запалюються одночасно. Продукти згорання, охолоджені і очищені від конденсованих частинок в рідинному фільтрі, надходять до клапана постійного тиску, керованого стислим газом.

Камера згорання складається з корпусу 1, сполученого патрубком з загальною кришкою блока камер (рис. 2). На тій частині камери, де розташований зразок 5, встановлюється знімний електронагрівач 3. Електронагрівач складається з ніхромової спіралі, укладеної в ізоляційну кераміку. Корпус нагрівача — зварний, герметичний, виконаний з нержавіючої сталі. Внутрішній простір між корпусом і спіраллю заповнено азбестовим набиванням. До нагрівального елемента підводиться змінна напруга 100...200 В.

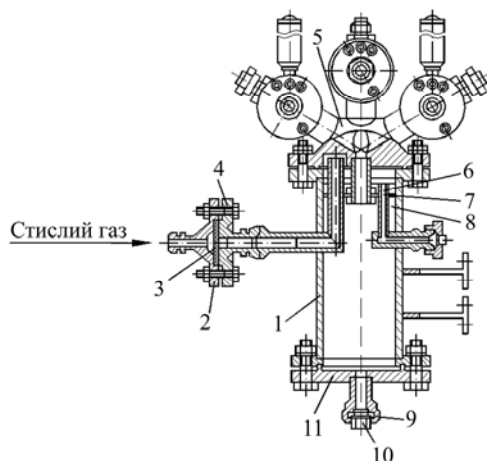


Рис. 1. Прилад постійного тиску установки: 1 — корпус фільтра, 2 — кришка клапана, 3 — мембрана, 4 — корпус клапана, 5 — блок камер згоряння, 6 — зливний патрубок, 7 — механічний дисковий фільтр, 8 — вода, 9 — гайка, 10 — заглушка, 11 — кришка фільтра

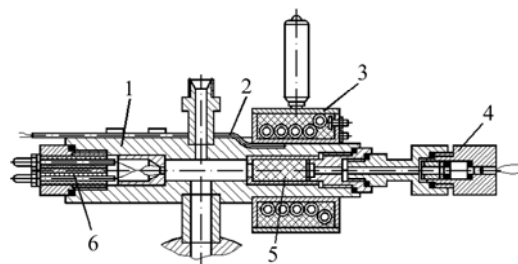


Рис. 2. Камера згоряння установки: 1 — корпус камери, 2 — термопара, 3 — нагрівач, 4 — фотодатчик, 5 — зразок, 6 — вузол електроконтактів із запальником

Задня кришка камери має різьблення, в яке вкручується фотодатчик для реєстрації моменту закінчення горіння зразка через отвір в донному бронюванні. Напроти зразка, на ділянці камери, що не піддається термостатуванню, є місце для установки пірогенного запальника, змонтованого на вузлі електроконтактів 6. Для контролю і регулювання температури термостатування в корпусі камери закарбована ХА-термопара, сполучена з системою терморегулювання, змонтованою на основі електронного регулюючого потенціометра ЕПР-09МЗ. Електронний регулюючий потенціометр є основним вузлом системи і служить для послідовного запису температури в трьох камерах установки на діаграмній стрічці, а також для видачі електричних сигналів на включення і виключення нагрівальних камер при досягненні заданих температур. Точність підтримки температури термостатування складає $\pm 2\%$. Для створення попереднього надування перед спалюванням зразка установка забезпечена відповідною пневмосистемою, що складається з пневмоцилінка, редукторів, балонної батареї і т. д. Одночасне спалювання в однакових умовах трьох зразків дозволяє знизити похибку у визначенні швидкості горіння до $2...3\%$.

В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що для розглядуваних робочих діапазонів зміни технологічних параметрів: коефіцієнта надлишку окислювача та дисперсності порошків металевого пального і окислювача та зовнішніх чинників — температури нагріву, зовнішнього тиску — визначено концентраційні межі горіння для сумішей магній + нітрат натрію + органічна добавка — $\alpha_{\text{ВМГ}}=0,1...0,15$ та $\alpha_{\text{НМГ}}=5,0...5,5$.

З метою дослідження загального характеру поведінки залежності швидкості горіння від температури нагріву $u(T_0)$ для сумішей при розглядуваних значеннях технологічних параметрів та зовнішніх чинників вказані залежності досліджувалися в діапазоні $\alpha_{\text{ВМГ}} < \alpha < \alpha_{\text{НМГ}}$. Це обумовлено тим, що на практиці суміші зі значеннями α , які близькі до $\alpha_{\text{ВМГ}}$ або $\alpha_{\text{НМГ}}$, не застосовують внаслідок їх явної нестабільності в умовах зовнішніх термовпливів.

З отриманих даних випливає, що збільшення T_0 від 293 до 800 К призводить до зростання швидкості горіння у 1,6...3,7 разу; при цьому із зростанням T_0 залежність $u(T_0)$ підсилюється у 1,2...1,5 разу (див. рисунки 3...5). Крім цього, збільшення коефіцієнта надлишку окислювача α призводить до зменшення швидкості горіння та помітного послаблення залежності $u(T_0)$: зростання α від 0,25 до 3,0 приводить до зменшення величини швидкості горіння у 3,9...4,1 разу та послаблення залежності $u(T_0)$ у 2,0...2,2 разу. Зменшення дисперсності порошку металевого пального призводить до зростання швидкості горіння та підсилення залежності $u(T_0)$: зменшення значень d_m від 305 до 74,5 мкм призводить до збільшення швидкості горіння у 1,8...2,7 разу та підсилення залежності $u(T_0)$ у 1,6...1,8 разу. Збільшення зовнішнього тиску призводить до знач-

ного зростання швидкості горіння та підсилення залежності $u(T_0)$ для усіх досліджуваних діапазонів зміни α , d_m та d_N : зміна зовнішнього тиску від 10^5 Па до 10^7 Па призводить до збільшення швидкості горіння у 2,5...2,9 разу та підсилення залежності $u(T_0)$ у 1,7...2,0 разу.

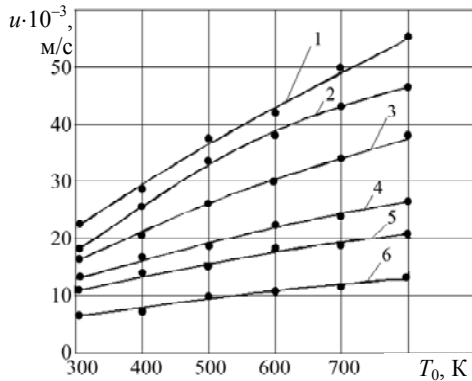


Рис. 3. Вплив коефіцієнта надлишку окислювача α на характер залежності швидкості горіння сумішей магній + нітрат натрію від температури нагріву при коефіцієнті надлишку окислювача $\alpha=0,25$ (1); 0,5 (2); 1,0 (3); 1,5 (4); 2,0 (5); 3,0 (6) ($d_m = 74,5$ мкм, $d_N = 106$ мкм, $P = 10^5$ Па)

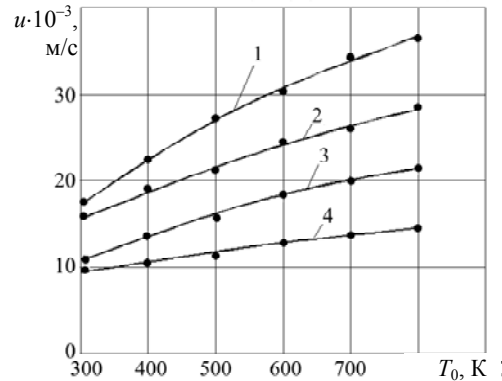


Рис. 4. Вплив дисперсності порошку металевого пального на характер залежності швидкості горіння стехіометричних сумішей магній + нітрат натрію від температури нагріву при дисперсності компонентів $d_m=74,5$ (1); 135 (2); 182 (3); 305 (4) мкм ($\alpha=1,0$, $d_N=106$ мкм, $P=10^5$ Па)

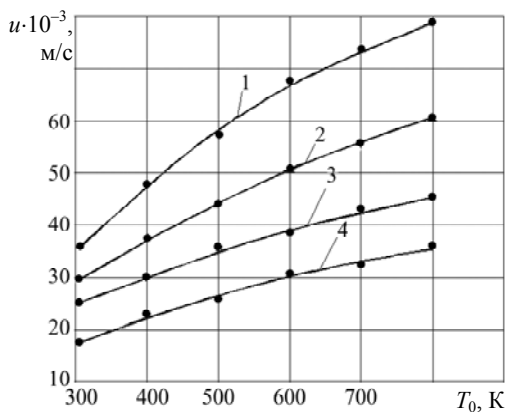


Рис. 5. Вплив зовнішнього тиску на характер залежності швидкості горіння стехіометричних сумішей магній + нітрат натрію від температури нагріву при зовнішніх тисках $P=10^7$ (1); $5 \cdot 10^6$ (2); 10^6 (3); 10^5 (4) Па ($\alpha=1,0$, $d_m=74,5$ мкм, $d_N=106$ мкм)

305 мкм приводить до зменшення швидкості горіння у 1,8...2,7 разу та послаблення залежності $u(T_0)$ у 1,6...1,8 разу; збільшення зовнішнього тиску від 10^5 до 10^7 Па призводить до зростання швидкості горіння у 2,5...2,9 разу та підсилення залежності $u(T_0)$ у 1,7...2,0 разу.

Таким чином, в результаті проведених експериментальних досліджень впливу основних параметрів зовнішніх термовпливів (температури нагріву $T_0=293...800$ К та тиску зовнішнього середовища $P=10^5...10^7$ Па) для розглянутих робочих діапазонів зміни технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окислювача $0,05 \leq \alpha \leq 6,0$; середнього розміру частинок металевого пального $d_m=74,5...305$ мкм) на швидкість та режими горіння сумішей магній + нітрат натрію вперше встановлено такі закономірності:

— визначено концентраційні границі горіння $\alpha_{ВМГ}=0,1...0,15$ та $\alpha_{НМГ}=5,0...5,5$, в яких процес горіння сумішей є стійким та квазістаціонарним;

— встановлено, що зростання T_0 від 293 до 800 К призводить до значного збільшення швидкості горіння в 1,6...1,7 разу та підсилення залежності $u(T_0)$ у 1,2...1,5 разу; при цьому збільшення вмісту окислювача в суміші від $\alpha_{ВМГ}$ до $\alpha_{НМГ}$ приводить до зменшення швидкості горіння у 3,9...4,1 разу та послаблення залежності $u(T_0)$ у 2,0...2,2 разу; збільшення величини d_m від 74,5 мкм до

Література

1. Шидловский, А.А. Основы пиротехники / А.А. Шидловский. — М.: Машиностроение, 1973. — 320 с.
2. Шидловский, А.А. Пиротехника в народном хозяйстве / А.А. Шидловский, А.И. Сидоров, Н.А. Силин. — М.: Машиностроение, 1978. — 231 с.

3. Силин, Н.А. Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем / Н.А. Силин, В.А. Ващенко, Л.Я. Кашпоров. — М.: Машиностроение, 1982. — 232 с.
4. Процессы горения металлизированных конденсированных систем / В.А. Ващенко, О.В. Кириченко, Ю.Г. Лега и др. — К.: Наук. думка, 2008. — 745 с.
5. Кириченко, О.В. Определение участков на поверхности металлических корпусов пиротехнических изделий, подвергающихся разрушениям в условиях эксплуатации / О.В. Кириченко // Вісн. ЧДТУ. — Черкаси. — 2008. — № 1. — С. 149 — 154.
6. Кириченко, О.В. Повышение эффективности пиротехнических нитратосодержащих изделий в условиях их применения / О.В. Кириченко // Вісн. ЧДТУ. — Черкаси. — 2009. — № 2. — С. 89 — 94.

References

1. Shidlovskiy, A.A. Osnovy pirotekhniki [Basics of pyrotechnics] / A.A. Shidlovskiy. — Moscow, 1973. — 320 pp.
2. Shidlovskiy, A.A. Pirotekhnika v narodnom hozyaystve [Pyrotechnics in the national economy] / A.A. Shidlovskiy, A.I. Sidorov, N.A. Silin. — Moscow, 1978. — 231 pp.
3. Silin, N.A. Gorenje metallizirovannykh geterogennykh kondensirovannykh sistem [Burning of the metallic heterogeneous condensed systems] / N.A. Silin, V.A. Vashchenko, L.Ya. Kashporov. — Moscow, 1982. — 232 pp.
4. Protsessy gorennya metallizirovannykh kondensirovannykh sistem [Processes of burning of the metallic condensed systems] / V.A. Vashchenko, O.V. Kirichenko, Yu.G. Lega and others. — Kyiv, 2008. — 745 pp.
5. Kirichenko, O.V. Opredelenie uchastkov na poverkhnosti metallicheskikh korpusov pirotekhnicheskikh izdeliy, podvergayushchikhsya razrusheniyam v usloviyakh jekspluatatsii [Determination of areas on the surface of metallic cases of the pyrotechnic wares exposed to destructions in the service conditions] / O.V. Kirichenko // Visn. ChDTU. — Cherkasy. — 2008. — # 1. — pp. 149 — 154.
6. Kirichenko, O.V. Povyshenie effektivnosti pirotekhnicheskikh nitratosoderzhashchikh izdeliy v usloviyakh ikh primeneniya [Increasing the efficiency of pyrotechnic wares containing nitrates in the conditions of their application] / O.V. Kirichenko // Visn. ChDTU. — Cherkasy. — 2009. — # 2. — pp. 89 — 94.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Черкас. держ. технол. ун-ту Столяренко Г.С.

Надійшла до редакції 22 жовтня 2012 р.