

*О.В. Кириченко, к.т.н., с.н.с., доцент каф., АПБ ім. Героїв Чорнобиля,
В.А. Ващенко, д.т.н., професор, зав. кафедри, ЧДТУ,
В.В. Цибулін, викладач, ЧДТУ,
В.М. Тупицький, доцент кафедри, АПБ ім. Героїв Чорнобиля*

ШВИДКІСТЬ ТА МЕЖІ ГОРІННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ НІТРАТНО-МАГНІЄВИХ СУМІШЕЙ В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ТЕРМОДІЙ

(представлено д-ром техн. наук Прохачем Е.Ю.)

Представлено результати експериментальних досліджень впливу основних параметрів зовнішніх термодій (підвищених зовнішніх тисків 10^5 Па... 10^7 Па та температур нагріву 293 К...800 К) на швидкість та режими горіння ущільнених сумішей з порошків магнію, нітрату натрію та добавок парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену для широких діапазонів зміни їх технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окислювача 0,05...6,0; середнього розміру частинок металу 74,5 мкм...306 мкм та окислювача 50 мкм...220 мкм, відносного масового вмісту органічної добавки 0,05...0,20). Вперше встановлено допустимі діапазони зміни співвідношення компонентів в суміші, перевищення яких призводить до вибухонебезпечного розвитку процесу їх горіння. Показано, що збільшення зовнішнього тиску та температури нагріву призводить до різкого збільшення швидкості горіння сумішей для досліджуваних діапазонів зміни їх технологічних параметрів.

Ключові слова: піротехнічні вироби, нітратно-металеві суміші, зовнішні термодії.

Постановка проблеми. В теперішній час в народному господарстві та військовій техніці широко застосовуються піротехнічні вироби різного призначення (фейерверочні склади, освітлювальні та трасуючі засоби, сигнальні вогні, піротехнічні ІЧ-випромінювачі, елементи ракетно-космічної техніки тощо) з використанням спалахувальних пристроїв на основі зарядів трьохкомпонентних механічно ущільнених сумішей з порошків магнію, нітрату натрію та добавок органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену), які забезпечують технологічність та безпеку виготовлення, а також спеціальні ефекти – кольорово-полум'яні, каталізатори або інгібітори горіння тощо [1 – 7, 9]. Як показує практика [10, 11 – 14], вироби, які споряджені зарядами вказаних піротехнічних нітратно-магнієвих сумішей (ПНМС), в процесі обігу (зберігання, транспортування та застосування) можуть піддаватися зовнішнім термодіям в різних екстремальних ситуаціях (наприклад, при пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються піротехнічні вироби, в умовах їх транспортування при спалахуванні близько розташованих об'єктів, а також в умовах пострілу та польоту виробів при їх

запусках тощо). В результаті відбувається істотний нагрів зарядів реакційно здатних до підвищених температур ПНМС (рис. 1), що призводить до їх передчасних спалахувань під герметичними корпусами виробів та подальшого розвитку процесу горіння сумішей в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків.

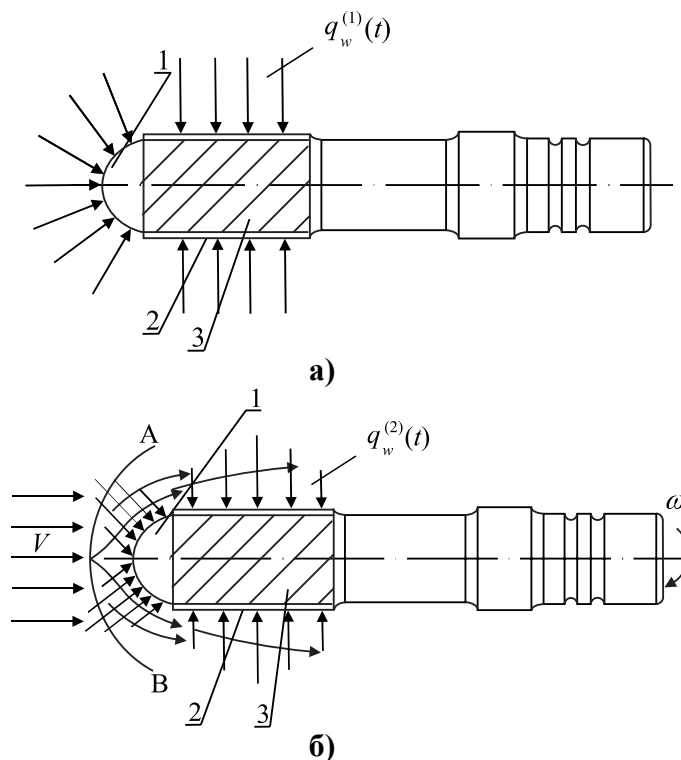


Рис. 1. Схематичне зображення зовнішнього нагріву металевих корпусів піротехнічних виробів, під якими розташовані заряди ПНМС: а) – тепловий вплив на поверхню корпусу нерухомого виробу (умови зберігання або транспортування); б) – тепловий вплив на поверхню корпусу виробу, що рухається з надзвуковою швидкістю (умови пострілу та польоту); 1 – півсферичний обтічник; 2 – металева оболонка; 3 – заряд піротехнічної суміші; V – швидкість надзвукового потоку повітря; ω – кутова швидкість вісесиметричного обертання; АВ – фронт ударної хвилі; $q_w^{(1)}(t)$ та $q_w^{(2)}(t)$ – теплові потоки, що поступають на поверхню корпусу виробу від зовнішніх джерел тепла (зони пожежі, осередки спалахування різних палих речовин), а також з прикордонного шару при гальмуванні надзвукового газового потоку на поверхні корпусу виробу

При цьому в одних випадках вироби нагріваються без видимих руйнувань, а в інших – відбуваються їх вибухонебезпечні руйнування з утворенням різних чинників пожежі (полум'я або високотемпературний струмінь продуктів згорання, дисперговані продукти (уламки металевих корпусів, розжарені частини зарядів сумішей, іскри тощо) (рис. 2). Тому дослідження впливу основних параметрів зовнішніх термодій (підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків) на швидкість процесу горіння зарядів ПНМС та його граничні вибухонебезпечні режими розвитку є актуальною проблемою.

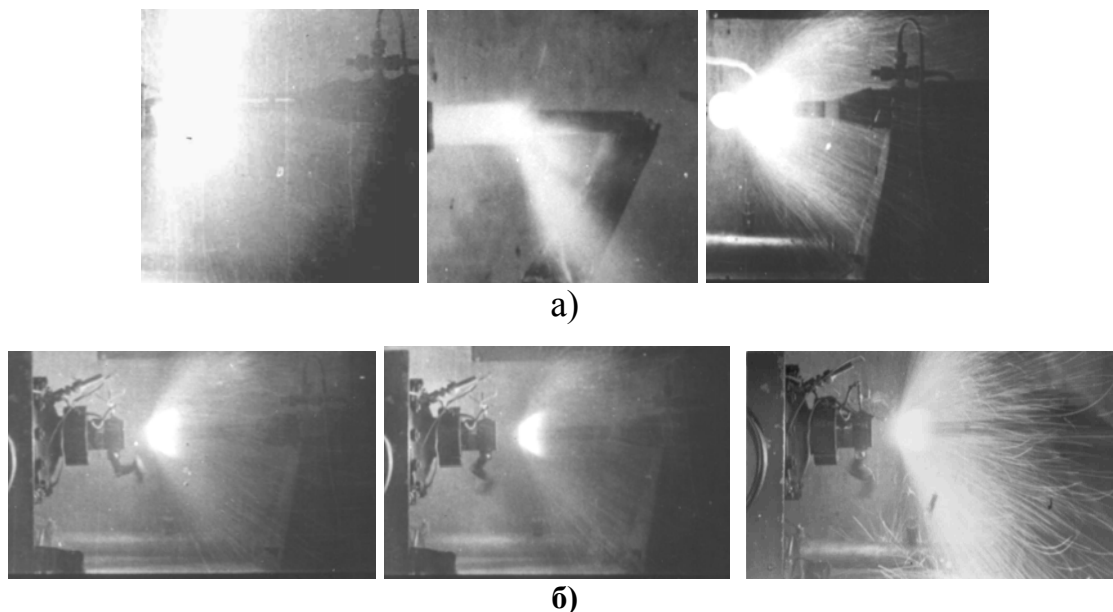


Рис. 2. Кінокадри загальної картини вимушених пожежовибухонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів, споряджених зарядами ПНМС, в умовах інтенсивних зовнішніх термодій на їх поверхні, отриманих при стендових випробуваннях [9, 10, 13]: а) – локальні джерела тепла (використовувався ІЧ-нагрів виробів кварцовими лампами типу КГМ – 220 – 1000 – 1 з застосуванням керованих термодатчиків РИФ – 101 для контролю температури на поверхні виробів в діапазоні 300...1500 К [9, 14]; б) – повздовжній надзвуковий обдув потоком повітря поверхні виробів зі швидкостями до $2 \cdot 10^3$ м/с

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час процес горіння піротехнічних нітратно-магнієвих сумішей достатньо вивчений при нормальних умовах [2, 3, 6, 7, 9]. Однак відсутні дослідження процесу горіння розглядуваних ПНМС в умовах зовнішніх термодій, що характеризуються підвищеними температурами нагріву та зовнішніми тисками, для широкого діапазону регульованих техноогінчних параметрів розглядуваних сумішей (співвідношення та дисперсності компонентів).

Постановка завдання та його вирішення. Виникає необхідність вирішення завдання визначення впливу основних параметрів зовнішніх термодій (підвищених тисків навколишнього середовища та температур нагріву) на швидкість розвитку та граничні режими горіння зарядів ПНМС. Нижче спочатку наводиться опис методики досліджень та розроблених установок [8, 15], що моделюють вплив основних параметрів зовнішніх термодій на швидкість та межі горіння розглядуваних сумішей, а потім наводяться результати експериментальних досліджень та їх аналіз.

Методика досліджень. Компоненти піротехнічних сумішей виготовлялися по технології, прийнятій в піротехнічному виробництві [2-5]. Зразки сумішей отримали пресуванням (коефіцієнт ущільнення $K_y = 0,96...0,98$) у металеві оболонки діаметром $2 \cdot 10^{-3}$ м та товщиною $8 \cdot 10^{-4}$ м; при цьому висоти запресовок склали $h = 3...4 \cdot 10^{-2}$ м. Використовувалися суміші з коефіцієнтом надлишку окислювача $\alpha =$

0,05...6,0, де α виражається відомою формулою [6, 9]

$$\alpha = \frac{\xi_{ок} / \xi_n}{(\xi_{ок} / \xi_n)_{cm}}, \quad (1)$$

$\xi_{ок}, \xi_n$ – відносна масова частка окислювача та пального в даній суміші; індекс “*cm*” позначає стехіометричне співвідношення компонентів ($\alpha = 1$) для розглядуваної суміші ($\xi_{ок} / \xi_n \approx 1,17$, що відповідає 46 % Mg та 54 % NaNO_3 , відносним масовим вмістом органічної добавки $\varepsilon = 0,05...0,20$ та середнім розміром частинок порошоків магнію $d_m = 74,5...305$ мкм та нітрату натрію $d_N = 50...220$ мкм. Швидкість горіння u (м/с) зразків суміші вимірювали за допомогою фотодіодів ФД-1, ФД-2 та ФД-3а [8, 9, 15], що дозволяють реєструвати початок та кінець горіння зразка висотою h та знаходити середнє значення швидкості горіння по формулі $u = \frac{h}{t}$ (t – час згорання зразка). Для знаходження концентраційних меж горіння (меж горіння по α): верхніх концентраційних меж горіння $\alpha_{ВМГ}$ (при $\alpha < \alpha_{ВМГ} < 1$ швидкість процесу горіння сумішей різко збільшується аж до вибухонебезпечного протікання з подальшим затуханням) та нижніх концентраційних меж горіння $\alpha_{НМГ}$ (при $\alpha > \alpha_{НМГ} > 1$ швидкість процесу горіння сумішей різко зменшується аж до його затухання без вибухонебезпечного протікання). Використовувалися перехідні суміші, що складаються з тих же компонентів, що й основні, але з меншим надлишком магнію (при знаходженні $\alpha_{ВМГ}$) або з його більшим вмістом (при знаходженні $\alpha_{НМГ}$).

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

$$\zeta_{ВМГ} = \frac{\zeta_{m1} + \zeta_{m2}}{2}, \quad (1)$$

де ζ_{m1} – відносний масовий вміст магнію, при якому вже не горить ні один з взятих для дослідження зразків; ζ_{m2} – відносний масовий вміст магнію, при якому ще згорають усі зразки; $\zeta_{ВМГ}$ – відносний масовий вміст магнію в суміші, що відповідає $\alpha_{ВМГ}$. Для проведення досліджень використовувались вказані вище установки: на 1-ій установці досліджувався вплив підвищених зовнішніх тисків при нормальній температурі нагріву ($T_0 = 293$ К), а на 2-й установці досліджувався вже вплив підвищених зовнішніх тисків при температурі нагріву, що зростає (до 800 К), яка більш реально відповідає розвитку процесу горіння сумішей в замкнутому об’ємі під металевими корпусами виробів при окислювачі, що

інтенсивно розкладається, в умовах зовнішнього нагріву.

1. Установка, що моделює вплив підвищених зовнішніх тисків (до 10^7 Па) на швидкість та межі горіння ПНМС. Загальний вигляд і схема установки представлені на рис. 3, 4. Вона містить прилад постійного тиску з фільтром, збірку і два мультиплікатори.

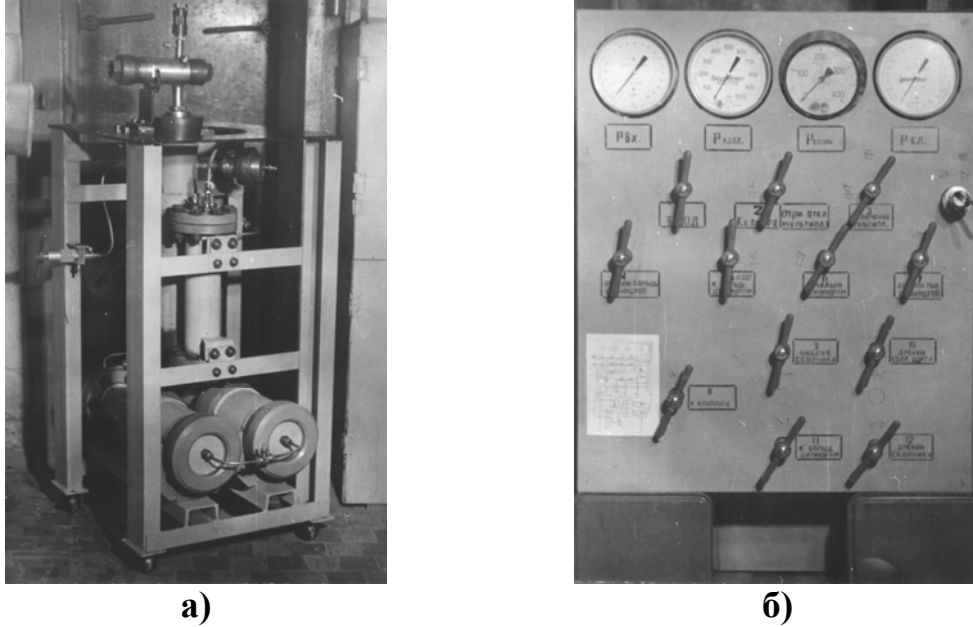


Рис. 3. Зовнішній вигляд (а) і панель управління (б) установки

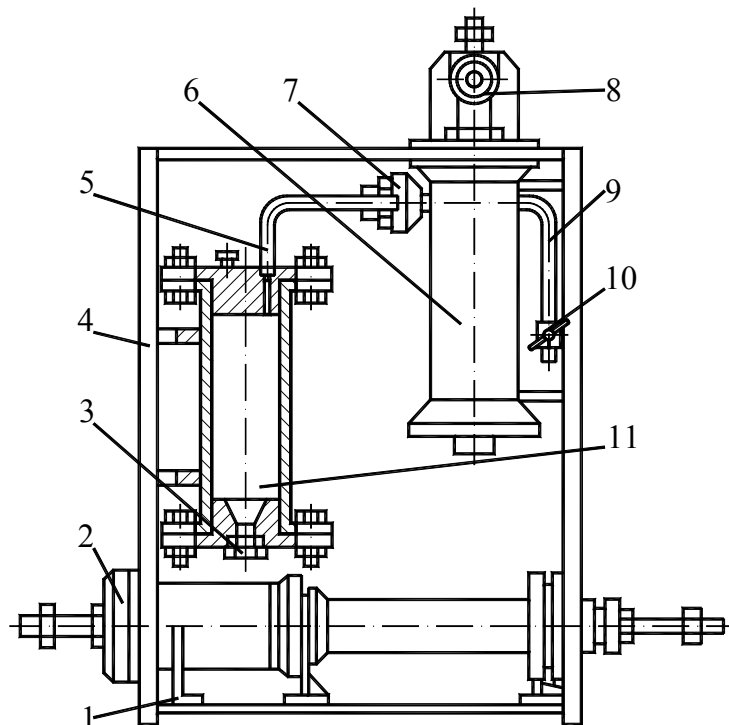


Рис. 4. Схема установки: 1 – кронштейн мультиплікатора; 2 – мультиплікатор; 3 – заглушка збірки; 4 – стіл; 5 – трубопровід від регулятора тиску до збірки; 6 – фільтр; 7 – регулятор тиску; 8 – камера згорання; 9 – трубопровід зливу; 10 – зливний вентиль; 11 – збірка

Установка монтується на столі. Регулятор тиску сполучений із збіркою за допомогою трубопроводу. Фільтр – рідинний. Рівень води при заправці підтримується за допомогою зливного трубопроводу і вентиля. Регулятор тиску – пневматичний. Збірка призначена для збору продуктів згорання і є судиною високого тиску. Для зменшення перепаду тиску на регуляторі збірка заздалегідь наддувається до тиску, дещо меншого робочого тиску при спалюванні зразка. Камера згорання (рис. 5) – зварна, виконана з неіржавіючої сталі. До корпусу приварені: у верхній частині – штуцер для установки перехідника 4 із запобіжною мембраною 6, в нижній частині – патрубок-газохід з гайкою 13 для виходу продуктів згорання в рідинний фільтр, похило (див. перетин А – А) – два штуцери для підведення газу наддування і установки датчика тиску. Запобіжна мембрана захищена від перегріву пластмасовим вкладишем 5 і підібгана накидною гайкою 7. Перехідник 4 (без зняття мембрани) може бути відгвинчений для очищення патрубка-газоходу від конденсованих продуктів згорання. На задньому торці зразка ПНМС встановлюється кінцева петарда для фіксації моменту закінчення горіння. Зразок поміщається в камеру в металевому стакані 10, який нагвинчений на заглушку 11. Запалюється зразок за допомогою електрозапальника з навішуванням зерненого спалахного складу, розміщеного напроти переднього торця зразка у форсажній втулці з соплом, що створює запальник пирогенного типу.

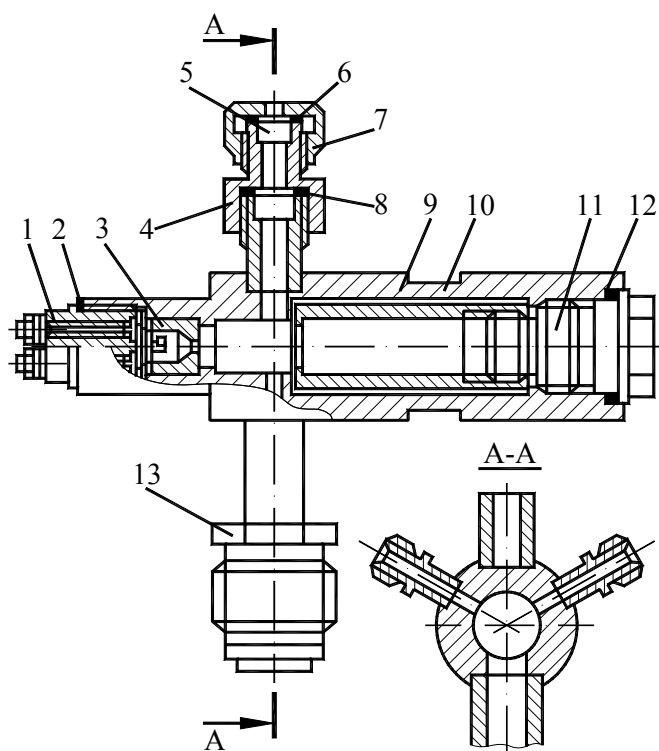


Рис. 5. Схема камери згорання установки: 1 – вузол електроконтактів; 2 – прокладка; 3 – форсажна втулка; 4 – перехідник; 5 – вкладиш; 6 – запобіжна мембрана; 7 – гайка; 8 – прокладка; 9 – корпус камери; 10 – стакан з зразком ПНМС; 11 – заглушка; 12 – прокладка; 13 – гайка

Мультиплікатор (рис. 6) призначений для підвищення тиску в установці до величин, більш високих, ніж тиск зовнішнього джерела (компресора, балонної батареї і т. д.). Він складається з двох сполучених між собою циліндрів – великого 26 і малого 14. Великий циліндр має внутрішній діаметр 0,14 м, малий – $7,5 \cdot 10^{-2}$ м. Таким чином, співвідношення площ мультиплікатора дорівнює 3,5. Вільний кінець великого циліндра закривається заглушкою 3 і гайкою 1. З'єднання великого циліндра з малим проводиться за допомогою переходника 10, гайки 9, кільця 11 з привареним до нього кронштейном і гайки 25. На фланці 20 малого циліндра змонтований зворотний клапан з штуцером 19 і приварений штуцер для підведення газу. У середині великого і малого циліндрів розташовано дві пари поршнів – у великому циліндрі поршні 4 і 7, в малому – 12 і 24. Поршні встановлені попарно для підвищення надійності рухомого ущільнення. Пробки служать для випуску повітря з міжпоршневих порожнин при збірці. Поршні забезпечені стандартними безкаркасними гумовими манжетами 6, 23, закріплені на поршнях за допомогою підтискних кілець 5, 13, 22. Штовхач 8 служить для передачі зусилля від великих поршнів до малих. Похибка вимірювання швидкості горіння складає 10...12 %.

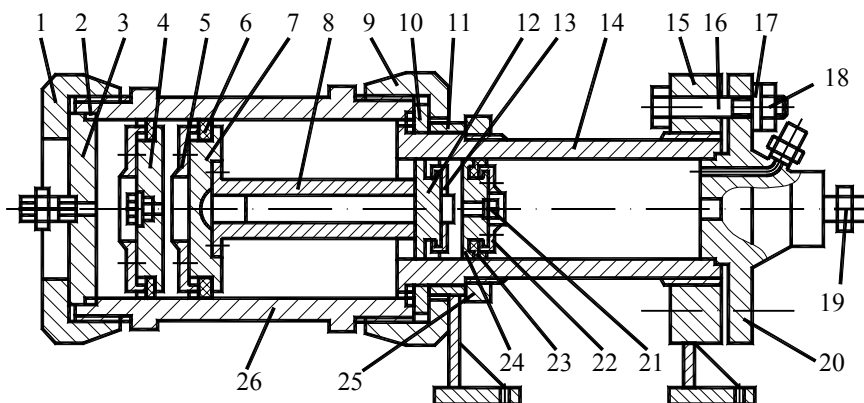


Рис. 6. Мультиплікатор установки: 1, 9, 18, 25 – гайки; 2 – прокладка; 3 – заглушка; 4, 7, 12, 24 – поршні; 5, 13, 22 – кільця підтискні; 6, 23 – манжети; 8 – штовхач; 10 – переходник; 11 – кільце з кронштейном в зборі; 14 – циліндр малий; 15 – фланець з кронштейном в зборі; 16 – болт; 17 – шайба; 19 – штуцер; 20 – фланець; 21 – пробка; 26 – циліндр великий

2. Установка, що моделює сумісний вплив підвищених температур нагріву (до 800 К) і зовнішніх тисків (до 10^7 Па) на швидкість та межі горіння ПНМС. Установка (рис. 7) призначена для одночасно 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 (рис. 8) містить три камери згорання, з'єднані в один блок. Блок камер згорання сполучений з корпусом рідинного фільтра, який перед випробуванням заповнюється водою. Термостатування зразків проводиться безпосередньо в камерах згорання перед спалюванням.

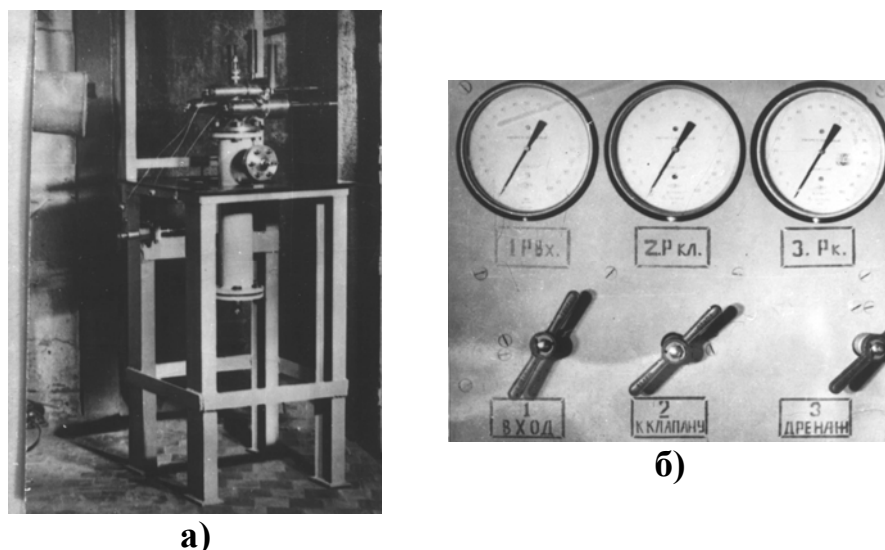


Рис. 7. Зовнішній вигляд (а) і панель управління (б) установки

При випробуванні прилад постійного тиску наддувається інертним газом. Всі три зразки запалюються одночасно. Продукти згорання, охолоджені і очищені від конденсованих частинок в рідинному фільтрі, поступають до клапана постійного тиску, керованого стислим газом.

Камера згорання (рис. 9) складається з корпусу 1, сполученого патрубком з загальною кришкою блоку камер. На тій частині камери, де розташований зразок 5, встановлюється знімний електронагрівач 3.

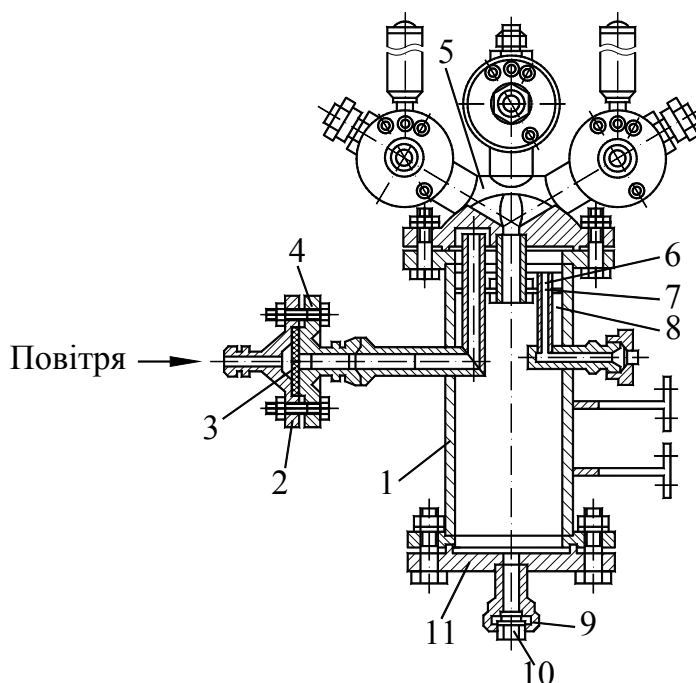


Рис. 8. Прилад постійного тиску установки: 1 – корпус фільтра; 2 – кришка клапана; 3 – мембрана; 4 – корпус клапана; 5 – блок камер згорання; 6 – зливний патрубок; 7 – механічний дисковий фільтр; 8 – вода; 9 – гайка; 10 – заглушка; 11 – кришка фільтра

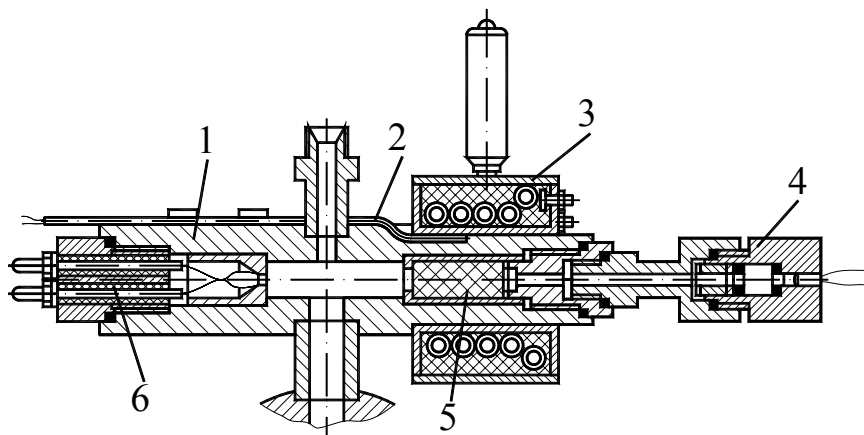
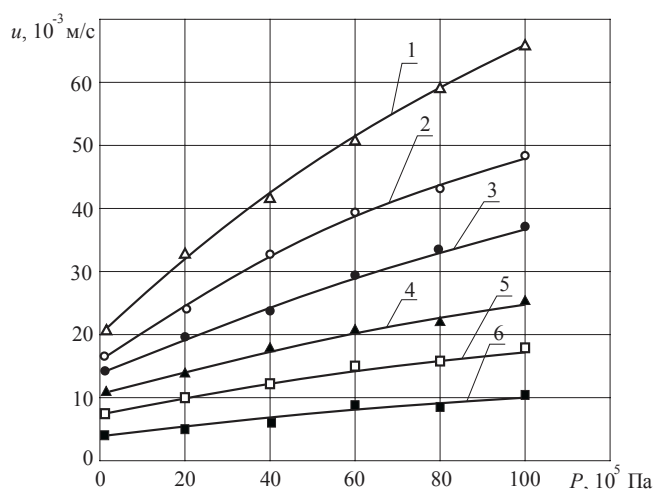


Рис. 9. Камера згорання установки: 1 – корпус камери; 2 – термопара; 3 – нагрівач; 4 – фотодатчик; 5 – зразок суміші; 6 – вузол електроконтактів із запальником

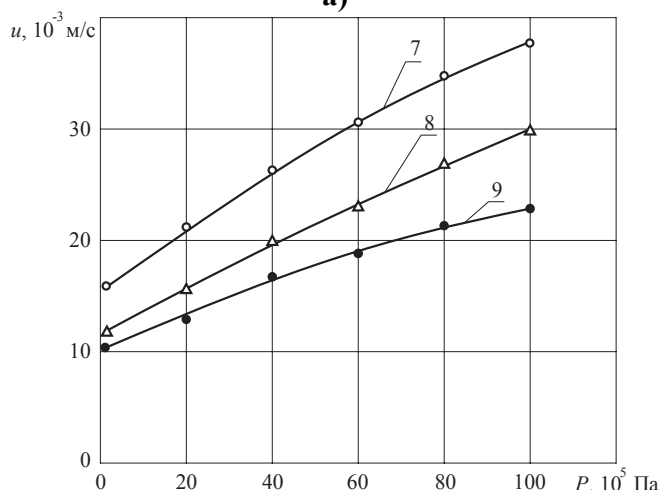
Електронагрівач складається з нихромової спіралі, укладеної в ізоляційну кераміку. Корпус нагрівача – зварний, герметичний, виконаний з неіржавіючої сталі. Внутрішній простір між корпусом і спіраллю заповнений азбестовим набиванням. До нагрівального елемента підводиться змінна напруга 100...200 В. Задня кришка камери має різьблення, в яке укручується 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 пирогенного 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 – 09М3. 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 наддування перед спалюванням зразка установка забезпечена відповідною пневмосистемою, що складається з пневмошита, редукторів, балонної батареї і т. д. Одночасне спалювання в однакових умовах трьох зразків дозволяє знизити похибку у визначенні швидкості горіння до 2...3 %.

3. Результати експериментальних досліджень та їх аналіз. В результаті проведених досліджень (рис. 10 – 14) впливу основних параметрів зовнішніх термодій (тиску навколишнього середовища $P = 10^5 \dots 10^7$ Па та температури нагріву $T_0 = 293 \dots 800$ К) для розглянутих робочих діапазонів зміни технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окислювача $0,05 \leq \alpha \leq 6,0$; серед нього розміру частинок

металевого пального $d_m = 74,5 \dots 305$ мкм та окислювача $d_N = 50 \dots 220$ мкм; відносного масового вмісту органічної добавки $\varepsilon = 0,05 \dots 0,20$) на швидкість та режими горіння розглядуваних сумішей вперше встановлено концентраційні межі горіння $\alpha_{ВМГ} = 0,1 \dots 0,15$ та $\alpha_{НМГ} = 5,0 \dots 5,5$, в межах яких процес горіння сумішей є стабільним та вибухонебезпечним. Збільшення P від 10^5 Па до 10^7 Па призводить до зростання швидкості горіння вже у $1,6 \dots 3,5$ разу; при цьому, із зростанням P залежність $u(P)$ посилюється. Збільшення коефіцієнта надлишку окислювача призводить до помітного зменшення швидкості горіння та послаблення залежності $u(P)$ для усього досліджуваного діапазону зміни зовнішнього тиску: при збільшенні α від $0,25$ до $3,0$ величина послаблюється у $2,3 \dots 2,6$ разу.



а)



б)

Рис. 10. Вплив коефіцієнта надлишку окислювача (а) та дисперсності порошку металевого пального (б) на залежність швидкості горіння сумішей магній + нітрат натрію від зовнішнього тиску ($T_0 = 293$ К, $d_N = 106$ мкм): а) – $d_m = 74,5$ мкм, 1 – $\alpha = 0,25$, 2 – $\alpha = 0,5$, 3 – $\alpha = 1,0$, 4 – $\alpha = 1,5$, 5 – $\alpha = 2,0$, 6 – $\alpha = 3,0$; б) – $\alpha = 1,0$, 7 – $d_m = 74,5$ мкм, 8 – $d_m = 182$ мкм, 9 – $d_m = 305$ мкм, \circ , \bullet , Δ , \blacktriangle , \blacksquare , \square – результати експериментальних досліджень

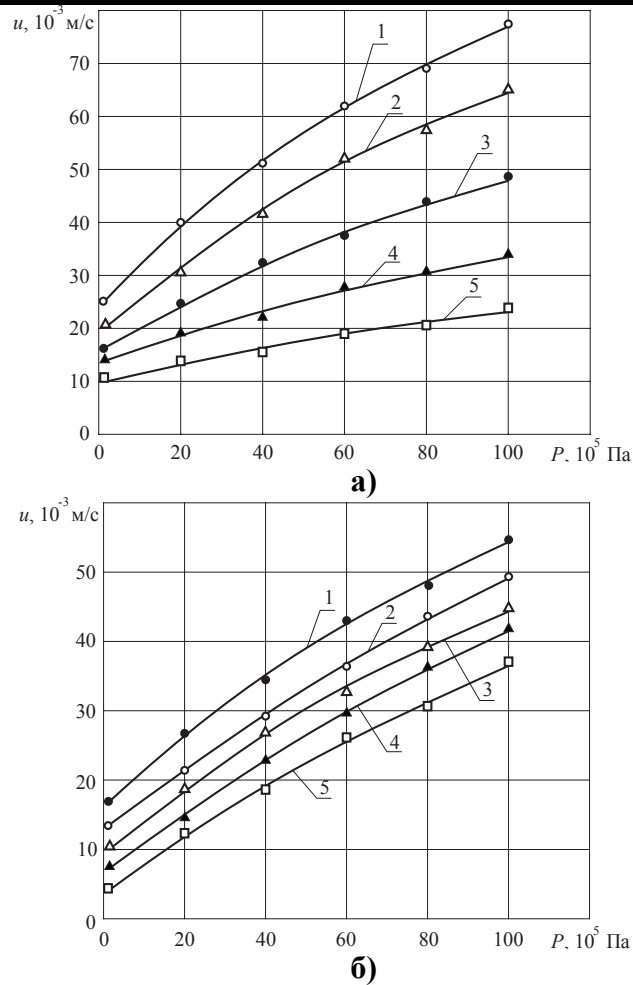


Рис. 11. Вплив дисперсності порошку окислювача на залежність швидкості горіння сумішей магній + нітрат натрію від зовнішнього тиску для різних значень коефіцієнта надлишку окислювача ($T_0 = 293 \text{ K}$, $d_m = 74,5 \text{ мкм}$): а) – $\alpha = 0,25$, б) – $\alpha = 0,5 \dots 0,60$, 1 – $d_N = 50 \text{ мкм}$, 2 – $d_N = 106 \text{ мкм}$, 3 – $d_N = 117,5 \text{ мкм}$, 4 – $d_N = 142,5 \text{ мкм}$, 5 – $d_N = 220 \text{ мкм}$; \circ , \bullet , Δ , \blacktriangle , \square – результати експериментальних досліджень

Збільшення дисперсності порошку металевого пального також веде до зменшення швидкості горіння та послаблення залежності $u(P)$: збільшення значень d_m від $74,5 \text{ мкм}$ до 305 мкм призводить до зменшення швидкості горіння у $1,5 \dots 1,8$ разу та послаблення залежності $u(P)$ у $1,2 \dots 1,6$ разу. Зміна дисперсності порошку окислювача суттєво впливає на швидкість горіння та характер залежності $u(P)$ тільки для певних діапазонів зміни α : зменшення величини d_N від 220 мкм до 50 мкм призводить до зростання швидкості горіння у $2,6 \dots 3,3$ разу та підсилення залежності $u(P)$ у $1,8 \dots 2,0$ разу тільки для значень $\alpha = 0,25 \dots 0,55$, а при $\alpha \geq 0,55 \dots 0,56$ – величина швидкості горіння та характер залежності $u(P)$ стають практично незалежними від величини d_N . Збільшення температури нагріву призводить до суттєвого зростання швидкості горіння та підсилення залежності $u(P)$ для усіх досліджува-

них діапазонів зміни α , d_M та d_N : зміна температури нагріву від 300 К до 800 К призводить до зростання швидкості горіння у 2,2...2,6 разу та підсилення залежності $u(P)$ у 1,4...1,7 разу. Введення у суміш добавок парафіну, стеарину, нафталіну та антрацену призводить до значного зменшення швидкості горіння та деякого послаблення залежності $u(P)$: зростання величини добавки до $\varepsilon = 0,20$ призводить до зменшення швидкості горіння у 1,8...2,2 разу для добавки парафіну, у 2,6...3,7 разу – для добавки стеарину, у 1,3...1,5 разу – для добавки нафталіну та у 2,3...3,2 разу – для добавки антрацену, а також до послаблення залежності $u(P)$ у 1,1...1,2 разу незалежно від природи добавки.

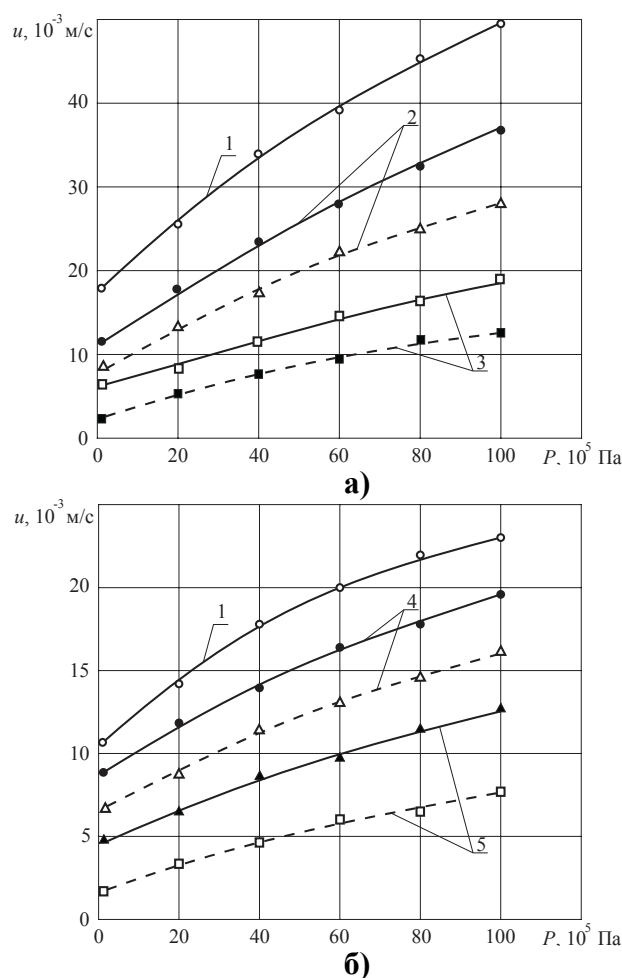


Рис. 12. Вплив добавок органічних речовин на залежність швидкості горіння сумішей магній + нітрат натрію від зовнішнього тиску ($d_M = 74,5$ мкм, $d_N = 106$ мкм, $T_0 = 293$ К): 1 – суміш без добавки; а) – $\alpha = 0,5$, добавки парафіну (2) та стеарину (3); б) – $\alpha = 1,5$, добавки нафталіну (4) та антрацену (5); — — — $\varepsilon = 0,05$; — — — $\varepsilon = 0,2$; $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle, \blacksquare, \square$ – результати експериментальних досліджень

Висновки. Для моделювання впливу параметрів зовнішніх термодій (підвищених зовнішніх тисків (до 10^7 Па) та температур нагріву (до 800 К)) на швидкість та граничні вибухонебезпечні режими горіння ПНМС розроблено комплекс з 2-х випробувальних установок, що дозволяє окремо та у сукупності досліджувати вплив вказаних параметрів.

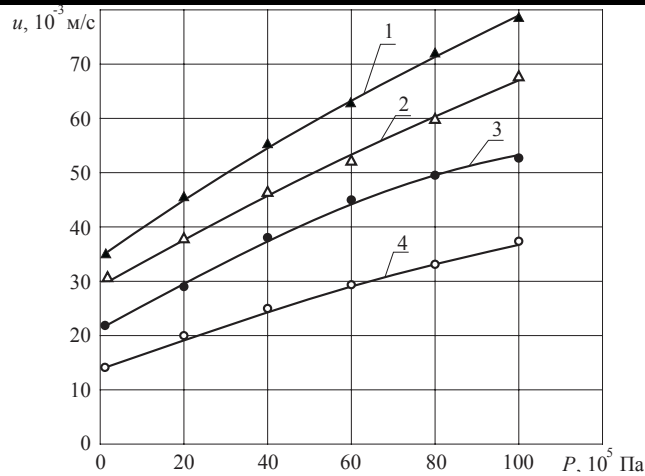


Рис. 13. Вплив температури нагріву на залежність швидкості горіння стехіометричних сумішей магній + нітрат натрію від зовнішнього тиску ($\alpha = 1,0$, $d_M = 74,5$ мкм, $d_N = 106$ мкм): 1 – $T_0 = 800$ К, 2 – $T_0 = 700$ К, 3 – $T_0 = 500$ К, 4 – $T_0 = 300$ К; \circ , \bullet , Δ , \blacktriangle – результати експериментальних досліджень

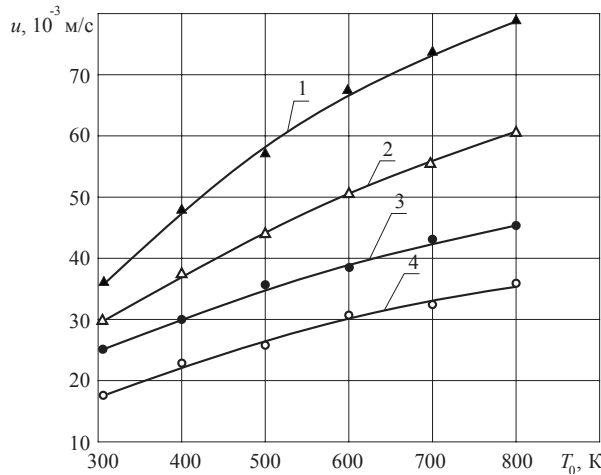


Рис. 14. Вплив зовнішнього тиску на залежність швидкості горіння стехіометричних сумішей магній + нітрат натрію від температури нагріву ($\alpha = 1,0$, $d_M = 74,5$ мкм, $d_N = 106$ мкм): 1 – $P = 10^7$ Па, 2 – $P = 5 \cdot 10^6$ Па, 3 – $P = 10^6$ Па, 4 – $P = 10^5$ Па; \circ , \bullet , Δ , \blacktriangle – результати експериментальних досліджень

В результаті проведених досліджень вперше визначено діапазон зміни гранично допустимих значень співвідношення компонентів $0,1 \dots 0,15 \leq \alpha \leq 5,0 \dots 5,5$, за межами якого процес горіння суміші стає нестійким: вибухонебезпечним при $\alpha < 0,1 \dots 0,15$ та згасаючим при $\alpha > 5,0 \dots 5,5$. Встановлено, що збільшення зовнішнього тиску при температурі нагріву, яка зростає, призводить до суттєвого зростання швидкості горіння сумішей та підсилення залежності $u(P)$, тобто процес горіння сумішей різко прискорюється аж до вибухонебезпечного протікання. При збільшенні вмісту окислювача та органічної добавки у суміші, середнього розміру частинок порошку металевого пального швидкості горіння суміші та залежність $u(P)$ послаблюються, що веде до стабілізації процесу горіння сумішей та запобігання їх пожежовибухонебезпечного спрацьовування. Тому шляхом цілеспрямованої зміни значень вказаних вище технологічних параметрів можна

регулювати характер протікання процесу горіння розглядуваних ПНМС. При значному надлишку металевого пального в суміші ($\alpha = 0,25 \dots 0,55$) до числа вказаних вище технологічних параметрів можна віднести й середній розмір частинок порошку окислювача.

ЛІТЕРАТУРА

1. Брауэр К. О. Пиротехнические устройства для космических аппаратов/ Брауэр К. О. // Вопросы ракетной техники, 1969. – вып. 10. – С. 47-61.
2. Шидловский А. А. Основы пиротехники / Шидловский А. А. – М.: Машиностроение, 1973. – 320 с.
3. Шидловский А. А. Пиротехника в народном хозяйстве / Шидловский А. А., Сидоров А. И., Силин Н. А. – М.: Машиностроение, 1978. – 231 с.
4. Силин Н. А. Металлические горючие гетерогенных конденсированных систем / Силин Н. А., Ващенко В. А., Кашпоров Л. Я. – М.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
5. Силин Н. А. Окислители гетерогенных конденсированных систем / Силин Н. А., Ващенко В. А., Зарипов Н. И. – М.: Машиностроение, 1978. – 456 с.
6. Силин Н. А. Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем / Силин Н. А., Ващенко В. А., Кашпоров Л. Я. – М.: Машиностроение, 1982. – 232 с.
7. Ващенко В. А. Высокотемпературные технологические процессы взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами / Ващенко В. А. [Монография]. – М.: Деп. в ВИНТИ 07.08.96, № 62 – хп 96. – 408 с.
8. Похил П. Ф. Методы исследования процессов горения и детонации / Похил П. Ф., Мальцев М. И., Зайцев В. М. – М.: Наука, 1969. – 303 с.
9. Ващенко В. А. Процессы горения металлизированных конденсированных систем / Ващенко В. А., Кириченко О. В., Лега Ю. Г., Заика П. И., Яценко И. В., Цыбулин В. В. – К.: Наукова думка, 2008. – 745 с.
10. Кириченко О. В. Определение участков на поверхности металлических корпусов пиротехнических изделий, подвергающихся разрушениям в условиях эксплуатации / Кириченко О. В. // Вісник ЧДТУ, 2008. – № 1. – С. 149 – 154.
11. Кириченко О. В. Повышение эффективности пиротехнических нитратосодержащих изделий в условиях их применения / Кириченко О. В. // Вісник ЧДТУ, 2009. – № 2. – С. 89 – 94.
12. Кириченко О. В. Термодинамічні методи прогнозування пожежонебезпечних властивостей високометалізованих пиротехнічних нітратно-металічних сумішей в умовах зовнішніх термовпливів / Кириченко О. В., Акіншин В. Д., Ващенко В. А., Цибулін В. В. // Проблеми пожарной безопасности. – Харьков: НГЗУ, 2011. – № 30. – С. 104 – 106.

13. Кириченко О. В. Пожаровзрывоопасные термовоздействия на поверхность металлических корпусов пиротехнических изделий в условиях выстрела и полета / Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цыбулин В. В. // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: НУГЗУ, 2012. – № 3. – С. 98 – 112.

14. Кириченко О. В. Створення бази даних по швидкостям та вибухонебезпечним режимам горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей / Кириченко О. В. // Вісник ЧДТУ, 2012. – № 3. – С. 88 – 90.

15. Ващенко В. А. Комплекс испытательных установок, моделирующих реальные условия применения пиротехнических нитратосодержащих изделий / Ващенко В. А., Кириченко О. В., Акинъшин В. Д., Цыбулин В. В., Яценко И. В. // Науковий вісник УкрНДІПБ, 2009. – № 1(19). – С. 127 – 137.

Кириченко О.В., Ващенко В.А., Цыбулин В.В., Тупицкий В.М.

Скорость и пределы горения пиротехнических нитратно-магниевых смесей в условиях внешних термовоздействий

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния основных параметров внешних термовоздействий (повышенных внешних давлений 10^5 Па... 10^7 Па и температур нагрева 293 К...800 К) на скорость и режимы горения уплотненных смесей из порошков магния, нитрата натрия и добавок парафина, стеарина, нафталина и антрацена для широких диапазонов изменения их технологических параметров (коэффициента избытка окислителя 0,05...6,0; среднего размера частиц порошков металла 74,5 мкм...305 мкм и окислителя 50 мкм...220 мкм, относительного массового содержания органической добавки 0,05...0,20). Впервые установлены допустимые диапазоны изменения соотношения компонентов в смеси, превышение которых приводит к взрывоопасному развитию процесса их горения. Показано, что увеличение внешнего давления и температуры нагрева приводит к резкому увеличению скорости горения смесей для исследованных диапазонов изменения их технологических параметров.

Ключевые слова: пиротехнические изделия, нитратно-металлические смеси, внешние термовоздействия.

O.V. Kirichenko, V.A. Vaschenko, V.V. Tsybulin, V.M. Tupitskii

Speed and limits burning pyrotechnic nitrate-magnesium mixtures in terms of external thermo-influences

The results of experimental research of influence of basic parameters of external thermo-influences (high external pressure 10^5 Pa... 10^7 Pa and heating temperatures 293...800 K) for speed and combustion modes compacted mixtures of powdered magnesium, nitrate sodium and additives paraffin, stearin, naphthalene and anthracene for broad ranges of changes their technological parameters (coefficient of excess oxidizer 0,05...6,0; the average particle size of powders of metal 74,5 mkm...305 mkm and oxidizer 50 mkm...220 mkm, relative mass content of organic additives 0,05...0,20) presents. The valid ranges of changes in the ratio of components in a mixture, the excess of which leads to explosive development of combustion process first established. It is shown that the increase of external pressure and temperature of heating leads to a sharp increase in the speed of combustion of mixtures for the investigated ranges change parameters.

Keywords: pyrotechnic wares, nitrate-metallic mixtures, external thermo-influences.