

**ВСТАНОВЛЕННЯ КРИТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНІХ ТЕРМОУДАРНИХ  
ВПЛИВІВ НА ПОВЕРХНЮ ЦИЛІНДРИЧНИХ МЕТАЛЕВИХ ОБОЛОНОК ЗАРЯДІВ,  
ЩО СКЛАДАЮТЬСЯ З ПІРОТЕХНІЧНИХ НІТРАТНО-МЕТАЛЕВИХ СУМІШЕЙ, У  
КОНТЕКСТІ ЇХ ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ**

**Кириченко О.В.**

доктор технічних наук, професор  
завідувачка кафедри пожежно-профілактичної роботи  
ORCID: 0000-0002-0240-1807

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

**Козяр Н.М.**

кандидат технічних наук, докторант  
ORCID: 0000-0001-9082-0771

Національний університет цивільного захисту України

**Школяр Є.В.**

кандидат психологічних наук  
викладач кафедри пожежно-профілактичної роботи  
ORCID: 0000-0002-7304-1677

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

Багато піротехнічних виробів, таких як освітлювальні засоби, піротехнічні ПЧ-випромінювачі та інші, що базуються на компактних сумішах металевих пальних порошків, нітратних окиснювачів та додатків органічного та неорганічного походження, піддаються інтенсивним термоударним впливам під час застосування в умовах надзвукового потоку повітря. Це призводить до значного нагріву реакційно-чутливих сумішей зарядів до підвищених температур, що викликає їх передчасне локальне запалення та подальше прискорення процесу горіння під металевими оболонками в умовах зростаючих температур і зовнішніх тисків. Це може призвести до небезпечних вибухів з утворенням різних пожежних факторів, таких як полум'я або потік гарячих газів, нагріті частинки сумішей зарядів, іскри та інше.

Тому, на етапі проектування та розробки вказаних виробів, важливо мати можливість розраховувати критичні значення параметрів зовнішніх термоударних впливів, таких як швидкості надзвукового обдуву потоком повітря та тривалість їх дії, на металеві оболонки зарядів різної геометричної форми. Контроль за перевищенням цих критичних значень дозволяє попереджати передчасне спрацювання виробів та їх наступні пожежонебезпечні руйнування.

На даний час проведено аналіз та розглянуто стандартні піротехнічні вироби різноманітного призначення. Піротехнічні вироби мають в своєму складі: суміші з порошків металевих пальних (Mg, Al, Ti, Zr та ін.), нітратовмісні окиснювачі ( $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{KNO}_3$  та ін.) та добавки органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, металдегіду, каніфолі, ідитолу та ін.) та неорганічних речовин ( $\text{LiF}$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{SiF}_2$ ,  $\text{SrF}_2$ ,  $\text{AlF}_3$  та ін.) [1-11].

Піротехнічні вироби використовуються в умовах надзвукового обдуву потоком повітря, що призводить до термоударного впливу, який був досліджений у роботах [9,12]. Цей вплив призводить до значного нагрівання зарядів піротехнічних виробів і, відповідно, прискорення процесу горіння піротехнічних сумішей під металевими оболонками виробів, що в результаті може спричинити руйнування виробів під час їх застосування, яке також досліджувалося у роботах [10-16].

Важливим аспектом є здатність до передбачення передчасного спрацьовування піротехнічних виробів шляхом розрахунку критичних значень параметрів зовнішніх термоударних впливів, таких як швидкості надзвукового обдуву потоком повітря та тривалості їх дії, на металеві оболонки зарядів сумішей різної геометричної форми на етапі проектування та розробки виробів.

Мета даної роботи полягає у розробці математичних моделей для аналізу термоударних впливів надзвукового потоку повітря на металеві оболонки циліндричної форми зарядів, що складаються з ущільнених сумішей порошків Mg, Al,  $\text{NaNO}_3$  та додатків органічних та неорганічних речовин. Основна мета полягає у визначенні критичних значень параметрів зовнішніх термоударних впливів, які можуть призвести до передчасних пожежонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів. Ці математичні моделі будуть використовуватись для попередження таких небажаних сценаріїв та поліпшення безпеки піротехнічних виробів. Результати досліджень мають на меті забезпечити наукову основу для розробки стратегій безпеки і встановлення рекомендацій щодо проектування та використання піротехнічних виробів з метою зменшення ризиків передчасного спрацьовування та пожежонебезпечних руйнувань.

Після детального аналізу передчасного спрацьовування виробів, що використовують піротехнічні нітратно-металічні суміші з добавками органічних та неорганічних речовин, в умовах зовнішніх термодій, таких як ударний нагрів корпусів виробів при пострілі та польоті, було встановлено, що основною причиною пожежовибухонебезпечного спрацьовування є значне перевищення температури нагріву металевих корпусів над температурою спалаху розглядуваних компонентів, таких як магній та алюміній, у активних газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювача, яким є нітрат натрію, а також у добавках органічних (парафін, стеарин, нафталін, антрацен, уротропін, метальдегід, каніфоль, ідитол) та неорганічних речовин (фториди металів, такі як LiF, NaF,  $\text{NiF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{SiF}_2$ ,  $\text{SrF}_2$ ,  $\text{AlF}_3$ ), що є основними компонентами піротехнічних сумішей. Розвиток процесу горіння під металевим корпусом виробу прискорює його горіння і переводить його в режим вибухонебезпечного протікання. Це призводить до передчасного спрацьовування виробу та руйнування його металевого корпусу. В результаті такого спрацьовування утворюються високотемпературні залишки, які викидаються у навколишнє середовище, разом з неспаленими частинками суміші, дисперсними потоками, що іскряться тощо. Ці елементи становлять пожежонебезпечну загрозу для навколишніх об'єктів і можуть небезпечно впливати на людей.

На основі проведених досліджень зовнішніх ударних термовпливів надзвукового потоку повітря на поверхню металевих оболонок зарядів сумішей встановлено наступні нові закономірності для циліндричної металевої оболонки:

- для ламінарного режиму обтікання максимум зовнішнього теплового потоку знаходиться поблизу її передньої критичної точки ( $x=0$ ,  $M=0$ ), а для турбулентного режиму обтікання – цей максимум зміщується від  $x=0$  до  $x_{max}=(0,53\dots0,65)L$ ;
- при збільшенні швидкості потоку повітря від  $M=1,5$  до  $M=3,0$  та часу його впливу до 22 с значення максимальної температури зовнішньої поверхні оболонки збільшуються у 2,7...3,5 разу для ламінарного режиму обтікання та у 4,1...5,3 разу – для турбулентного режиму обтікання; заміна матеріалу оболонки на більш теплопровідну (сталеву оболонку на мідну) призводить до зростання її температури у 1,4...2,5 разу.

Так, отримані результати досліджень є дуже корисними на стадії розробки та проектування піротехнічних виробів на основі піротехнічних нітратно-металічних сумішей з добавками органічних та неорганічних речовин. Ці результати дозволяють передбачати можливі пожежонебезпечні ситуації, що виникають при передчасному спрацьовуванні виробів у реальних умовах їх застосування.

### Список літератури:

1. Кириченко О. В. Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратовмісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів. Монографія / О. В. Кириченко, П. С. Пашковський, В. А. Ващенко, Ю. Г. Лега. – К.: Наукова думка, 2012. – 318 с.
2. Conkling J.A. Chemistry of Pyrotechnics: Basic Principles and Theory. New York, 1985.
3. Ledgard J.B. The Preparatory Manual of Black Powder and Pyrotechnics. Washington, 2006.
4. Russell M.S. The Chemistry of Fireworks. Royal Society of Chemistry Paperbacks, 2003.
5. О. В. Кurychenko, О. С. Dibrova, R. B. Motrychuk, О. С. Baanovsyy, V. V. Tsybulin, “Determination of the content of high-temperature condensate in the combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures at elevated external pressures”, *Nauka ta vyrobnytstvo: mizhvuzivskyyu tematychnyy zbirnyk naukovykh prats*, issue. 19, pp. 323-332, 2018.
6. Фатеев В. М. Піротехніка / В. М. Фатеев, Ю. П. Приходько, Л. І. Таборов, // К.: Наукова думка, 2017.
7. V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, O. L. Mirus “Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 5 (95), pp. 68-76, 2018.
8. О. Dibrova, О. Кurychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, V. Melnyk, “Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions”, *Technology audit and production reserves*, No. 1/1(51), pp. 44-49, 2020.
9. Кириченко О. В. Вплив підвищених зовнішніх тисків на температуру і склад продуктів згорання піротехнічних нітратно-алюмінієвих сумішей при різних співвідношеннях компонентів / О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, П. І. Заїка, В. В. Цибулін, Т. І. Владінова, В. М. Тупицький // *Науковий вісник УкрНДІПБ*, 2010. – № 2(22). – с. 87 – 94.
10. Діброва О. С. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій / О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко // *International Scientific Journal “Intenauka”* <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5799.
11. Діброва О. С. Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій / О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко // *International Scientific Journal “Intenauka”* <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5798.
12. Кириченко Є. П. Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах пострілу та польоту / Є. П. Кириченко // *Пожежна безпека: теорія і практика. Збірник наукових праць ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля*, 2021. – Т. 5. – № 2. – С. 87 – 102.
13. Кириченко О. В. Визначення вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згорання піротехнічних нітратно-металевих сумішей при підвищених зовнішніх тисках / О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, О. С. Барановський, В. В. Цибулін // *Наука та виробництво: міжвузівський тематичний збірник наукових праць*, 2018. – Вип. 19. – с. 323 – 332.
14. Кириченко О. В. Дослідження спалахування та горіння частинок алюмінієвомагнієвих сплавів у продуктах розкладання твердих піротехнічних палив / О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко, С. О. Колінько // *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2019. – № 2 (8) (ISSN 2518-1777). №2 (8). – с. 81 – 85.
15. Кириченко О. В. Дослідження спалахування та горіння частинок металевого пального у продуктах розкладання нітратовмісних окиснювачів та органічних речовин при зовнішніх термічних впливах / О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, О. С. Діброва, В. П. Мельник, В. А. Ващенко, Т. І. Бутенко // *Сборник научных трудов: Проблемы пожарной безопасности*, 2020. – № 47. – с. 50 – 59.
16. Кириченко Є. Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинків на температуру займання та час згорання частинок магнію та алюмінію в продуктах

розкладання оксидів металів / Є. Кириченко, В. Гвоздь, В. Ващенко, О. Кириченко, О. Дядюшенко, В. Мельник // Цивільний захист та пожежна безпека, 2021. – № 2(12). – С. 111 – 121.