

UDC 614.841:536.46

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.1.131.138>

*Oleh MYROSHNYK, doctor of technical sciences, professor  
(ORCID: 0000-0001-8951-9498),*

*Ievgenii SHKOLIAR, PhD in psychological sciences (ORCID:0000-0002-7304-1677),  
Valentyn MELNYK, PhD in technical sciences, docent (ORCID:0000-0001-6593-5964),*

*Oleksandr DIADIUSHENKO, PhD in technical sciences, docent  
(ORCID:0000-0003-0797-2251),*

*Kostiantyn MYHALENKO, PhD in technical sciences, docent  
(ORCID:0000-0002-7125-8442),*

*Maryna TOMENKO, PhD in pedagogical sciences (ORCID:0000-0002-2354-9106),  
Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes  
of the National University of Civil Protection of Ukraine*

## **ANALYSIS OF THE TEMPERATURE EFFECT ON THE INITIATION OF COMBUSTION OF METALLIC FUEL IN PYROTECHNIC MIXTURES**

*Experimental-statistical models for evaluating the influence of technological parameters of charges of pyrotechnic nitrate-metal ignition sources and external factors on the ignition temperature of metal fuel particles in the products of thermal decomposition of nitrate-containing oxidizer and organic substance additives are presented. Thermal decomposition of the nitrate-containing oxidizer (sodium nitrate), additives of organic substances (paraffin, stearin, naphthalene, anthracene) and high-temperature oxidation of particles of metallic fuel magnesium in the decomposition products takes place. This leads to intensive heat release, ignition of metal particles, premature explosive activation of ignition sources and subsequent fire-hazardous destruction of products. At the same time, in many cases, premature explosive triggering of pyrotechnic products had catastrophic consequences, since the burning process of pyrotechnic charges that has begun cannot be effectively eliminated by modern fire extinguishing means.*

**Key words:** *pyrotechnic mixtures, nitrate-metal sources of ignition, pyrotechnic products, combustion processes.*

**Formulation of the problem.** Every year, the number of fires and explosions during the storage, transportation and use of general industrial pyrotechnic products is increasing in Ukraine and around the world, which entail the destruction of objects, human casualties and significant material damage. In particular, in Ukraine, according to statistical data, only during last ten years there have been 566 fires and explosions at objects with the presence of pyrotechnic products, which led to the destruction of objects, the destruction of material values (direct losses amounted to UAH 24.6 million, collateral damage – UAH 33.9 million), 10 people died, 48 were injured.

**Analysis of recent research and publications.** The analysis of the specified cases shows that ignition and preliminary destruction of products are usually preceded by external thermal effects to which they are subjected (for example, in case of a fire in warehouses where products are stored, in the conditions of their transportation, in case of ignition of nearby objects, as well as in the conditions of the shot and flight of products during their launches, etc. [1 – 4]). Thermal decomposition of the nitrate-containing oxidizer (sodium nitrate), additives of organic substances (paraffin, stearin, naphthalene, anthracene) and high-temperature oxidation of particles of metallic fuel magnesium in the decomposition products takes place. This leads to intensive heat release, ignition of metal particles, premature explosive activation of ignition sources and subsequent fire-hazardous destruction of

products. At the same time, in many cases, premature explosive triggering of pyrotechnic products had catastrophic consequences, since the burning process of pyrotechnic charges that has begun cannot be effectively eliminated by modern fire extinguishing means.

Therefore, the prevention of forced fire-hazardous destruction of products in case of exposure to external thermal actions is of great practical importance. At the same time, they should be based on experimental methods of determining the ignition temperature of metal fuel particles in the decomposition products of the considered components.

**Setting the problem and solving it.** Currently, there are no data on the complex influence of the technological parameters of the ignition source charges and external factors on the ignition temperature of metal particles. Therefore, the purpose of this work is to conduct experimental studies and build experimental-statistical models to determine the dependence of the ignition temperature of metal fuel particles in the decomposition products of pyrotechnic mixtures on their dispersion, oxygen content in the products, and external pressure.

**Presentation of the main research material.** On the basis of existing data [1 – 6], it was established that at temperatures characteristic of the condensed phase of pyrotechnic mixtures under the conditions of their ignition and development of combustion, the main active gaseous products of the thermal decomposition of sodium nitrate and the considered organic substances are  $O_2 + N_2$ . Therefore, based on comprehensive research conducted using standard pyrotechnic equipment and well-known research methods [3 – 12], the obtained experimental and statistical models for assessing the impact on the ignition temperature<sup>\*</sup> of metal particles such important parameters as the size of metal particles ( $d_m$ ,  $\mu m$ ), relative mass content of oxygen in the stream of gaseous decomposition products ( $C_{O_2}$ ), which characterize their ability to accelerate the ignition process and the development of combustion under conditions of elevated heating temperatures and external pressures are given below.

To obtain experimental-statistical models, developed specialized software based on regression and interpolation methods was used [3 – 12].

**Models for calculating the dependence of the ignition temperature on the size of metal particles, the relative mass concentration of oxygen in the gas mixture  $O_2 + N_2$  and external pressure.**

The models for the considered metals have the following form (relative error 10 %):

$$T_3(d_m, C_{O_2}, P) = a + b \cdot C_{O_2} + c \cdot C_{O_2}^2 + d \cdot d_m + e \cdot d_m^2 + f \cdot P + g \cdot P^2 + h \cdot C_{O_2} \cdot d_m, \quad (1)$$

where  $a, b, c, d, e, f, g, h$  – empirical coefficients, the values of which depend on the nature of the metal (table 1).

A comparison of the results of calculations based on models (1) with the obtained array of experimental data shows that the difference between them does not exceed 10 – 15 %. The results of calculations according to formula (1) are presented in Figure 1 – 3. They allowed to establish the following ranges of changes in the ignition temperature of metal particles:  $T_3 = 600 – 1100$  K – for zirconium particles (when  $5 \leq d_m \leq 15 \mu m$ ;  $0,2 \leq C_{O_2} \leq 0,8$ ;  $10^5 \leq P \leq 10^7$  Pa).

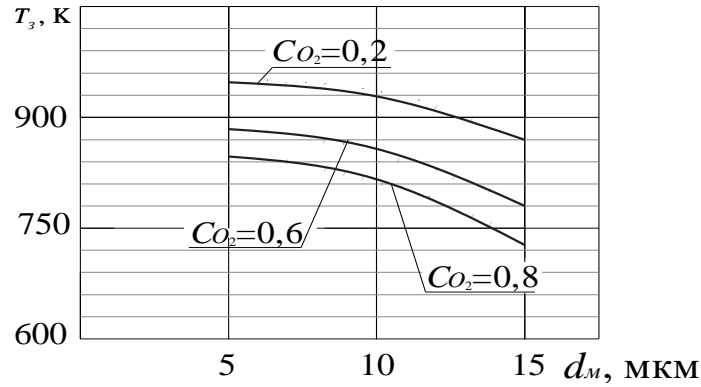
At the same time, as a result of the research for the ranges of changes of the considered parameters used in practice ( $d_m, C_{O_2}$ ) the processes of ignition of metal particles are stable and do not have an explosive nature. In addition, changing the specified controlled parameters significantly affects the behavior of the ignition temperature of metal particles: an increase of  $d_m$  and  $C_{O_2}$  leads to a decrease of  $T_3$  1.5 times.

The obtained experimental-statistical models (1) make it possible to create a controlled database on the ignition temperatures of metal particles in the gaseous decomposition products of sodium nitrate and organic additives under external heating with the help of the

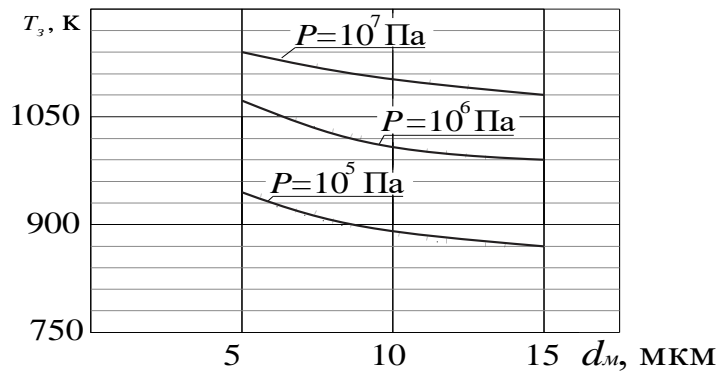
developed special software on a computer in dialog mode. The specified database can be used as a basis for a more general controlled database of theoretical and experimental data for predicting the fire-hazardous properties of products with nitrate-metal ignition sources under conditions of external thermodynamics.

**Table 1** – Values of empirical coefficients of magnesium

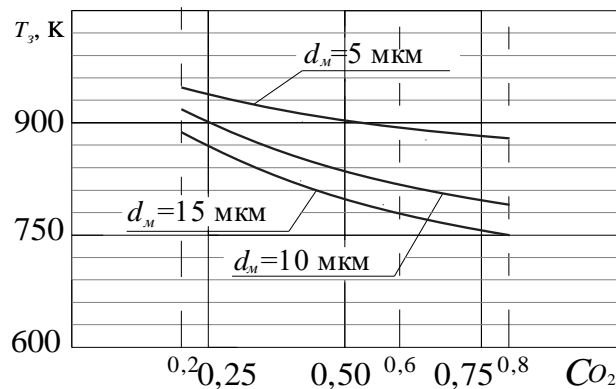
Coefficient Metal	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
Zr	905	-156,6	-45,8	-0,1275	-2,5·10 <sup>-6</sup>	1,142·10 <sup>-4</sup>	-0,8475·10 <sup>-11</sup>	-1,7·10 <sup>-3</sup>



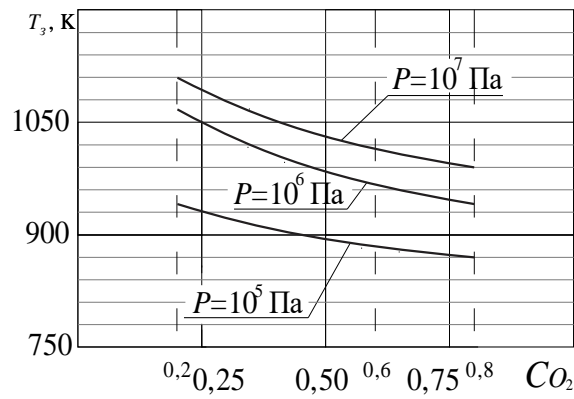
**Figure 1** – Influence of the relative mass concentration of oxygen ( $CO_2$ ) on the dependence of the ignition temperature of a zirconium particle in a gas environment  $O_2 + N_2$  on its size.



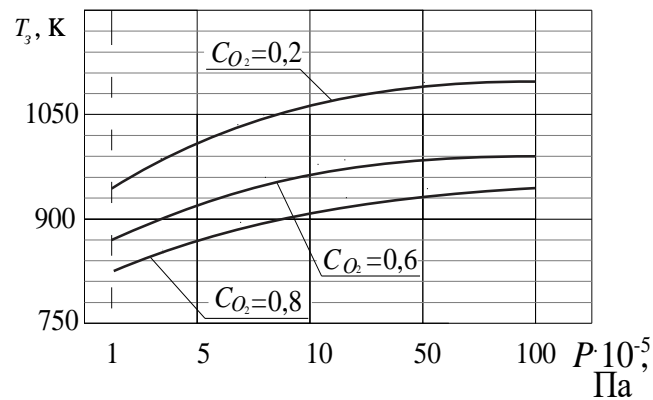
**Figure 2** – The influence of external pressure on the dependence of the ignition temperature of a zirconium particle in a gaseous medium  $O_2 + N_2$  on its size.



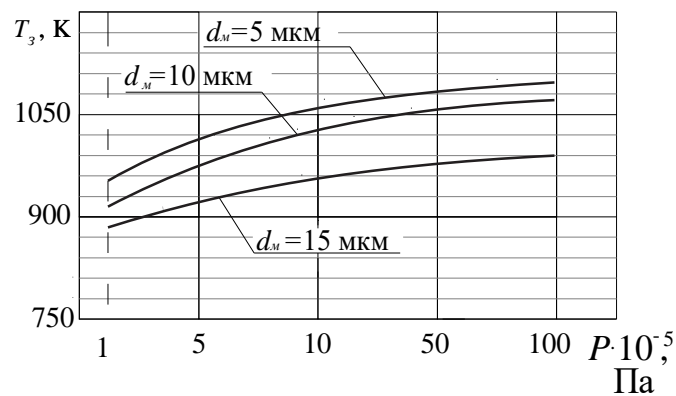
**Figure 3** – The influence of the size of zirconium particles ( $d_m$ ) on the dependence of the particle ignition temperature in a gas environment



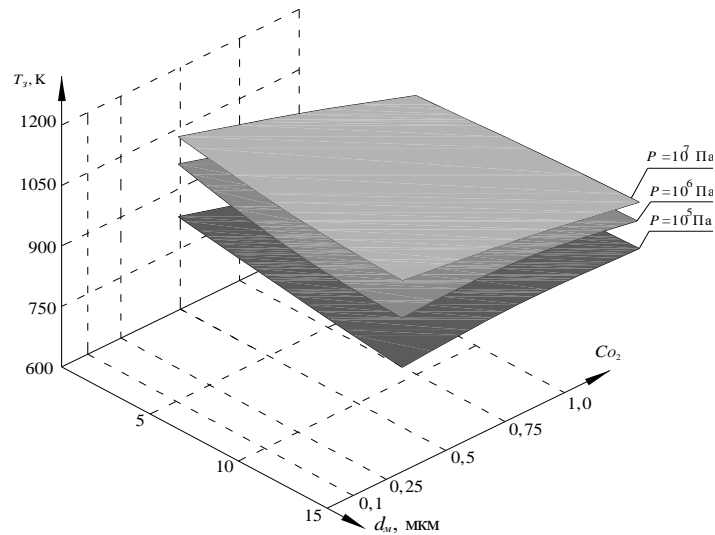
**Figure 4** – Influence of external pressure (P) on the dependence of the ignition temperature of particles in a gaseous medium  $O_2 + N_2$  on the relative mass concentration of oxygen



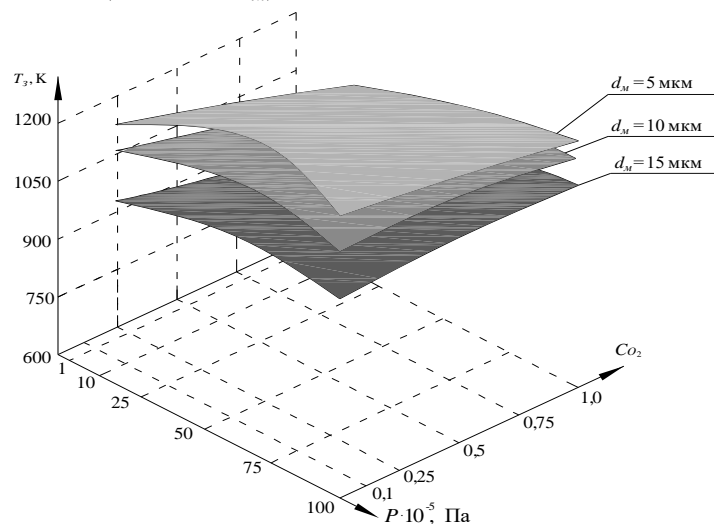
**Figure 5** – Influence of the relative mass concentration of oxygen ( $C_{O_2}$ ) on the dependence of the ignition temperature of zirconium particles on the external pressure



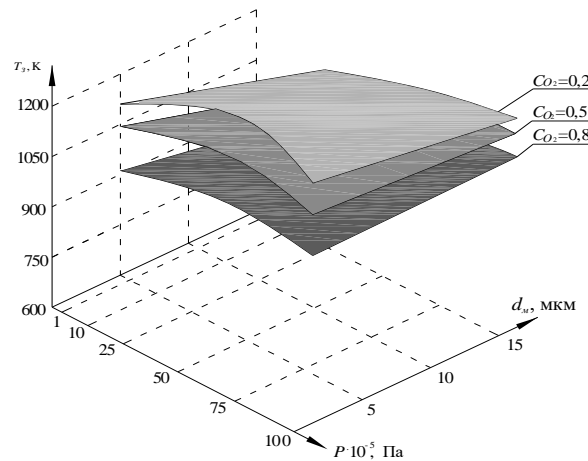
**Figure 6** – Effect of zirconium particle size ( $d_m$ ) on the dependence of particle ignition temperature on external pressure



**Figure 7** – Image of the dependences of the ignition temperature of a zirconium particle in a gaseous medium  $O_2 + N_2$  on the relative mass concentration of oxygen and the size of zirconium particles ( $C_{O_2}$  and  $d_m$ )



**Figure 8** – Image of the dependences of the ignition temperature of a zirconium particle in a gaseous medium  $O_2 + N_2$  on the relative mass concentration of oxygen and pressure ( $C_{O_2}$  and  $P$ )



**Figure 9** – Image of the dependences of the ignition temperature of a zirconium particle in a gaseous medium  $O_2 + N_2$  on pressure and size of zirconium particles ( $P$  and  $d_m$ )

### **Conclusions.**

The following regularities of the complex influence on the ignition temperature of zirconium metal particles of the following parameters were established: an increase in the size of metal particles from 5 to 15  $\mu\text{m}$  and relative oxygen content from 0.2 to 0.8 leads to a decrease in the ignition temperature by 1.5 times.

On the example of zirconium metal, experimental and statistical models are presented for determining the dependence of the ignition temperature of metal fuel particles in the products of thermal decomposition of pyrotechnic mixtures under conditions of external thermodynamics on the main parameters (metal fuel particles, relative oxygen content, elevated pressure). These models allow with a relative error of 10-15% to form a database on the critical values of technological parameters of ignition source charges (ratio and dispersion of components), exceeding which leads to the ignition of metal particles and premature fire-explosive activation of the ignition source.

### **REFERENCES**

1. Kyrychenko O. V. Zakonomirnosti vplyvu tekhnolohichnykh parametriv na pozhezhnu bezpeku pirotekhnichnykh nitratno-tytanovykh sumishei v umovakh zovnishnikh termichnykh dii / O. S. Dibrova, O. V. Kyrychenko, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko // International Scientific Journal "Intenauka" <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5798.
2. Vaschenko V. A., Kiritchenko O. V., Lega Yu. G., Zaika, P.I., Yatsenko I. V., Tsybulin V. V. (2008). Processes of the combustion of the metalized condensed systems. *Kiev: Naukova dumka Publ.*, 745 p.
3. Kirichenko O. V., Tsybulin V. V., Vaschenko V. A. (2012). Fire risks thermo-influences on the surface of metal buildings of pyrotechnic products in terms of shot and flight. *The problems of fire safety. Kharkov: National University of the civil defence of Ukraine*, (32), pp. 98-112.
4. Kirichenko O. V., Vaschenko V. A., Tsybulin V. V., Tupitskij V. M. (2013). Speed and limits burning pyrotechnic nitrate-magnesium compounds in terms of external thermo-influences. *The problems of fire safety. Kharkov: National University of the civil defence of Ukraine*, (34), pp. 73-95.
5. Kirichenko O. V. (2011). The dependence of the content the unoxidized aluminium in the products of the combustion of pyrotechnic nitrate-aluminum mixtures from the ratio of components and external pressure. *Scientific bulletin of Ukrainian Scientific Research Institute of fire safety*, (23), pp. 60-68.
6. Kirichenko O. V. (2011). The dependence of the content of high-temperature condensate in the products of the combustion of pyrotechnic mixtures of aluminium with nitrate-containing oxidants from the ratio of the components and external pressure. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, (1), pp. 119-124.
7. Kirichenko O. V., Vaschenko V. A., Akinshin V. D., Tsybulin V. V. (2011). Ignition aluminum particles in the products of decomposition of nitrate-containing oxidant and organic substances of pyrotechnic mixtures at elevated temperatures of heating. *Fire safety: theory and practice. Collection of scientific papers. Cherkasy: Academy of fire safety*, (9), pp. 17-25.
8. Kirichenko O. V., Vaschenko V. A., Tsybulin V. V., Tischenko E. O. (2011). High temperature oxidation of magnesium in the products of decomposition nitrate-containing oxidizers and organic substances of pyrotechnic mixtures with external thermo-influences. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, (3), pp. 115-120.
9. Kirichenko O. V., Vaschenko V. A., Tsybulin V. V. (2011). Thermal decomposition of organic substances in the pyrotechnic mixtures in terms of external thermo-influences. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, (4), pp. 116-120.
10. Kirichenko O. V., Vaschenko V. A., Tsybulin V. V., Tupitskij V. M. (2011). High temperature oxidation of aluminum in products of decomposition of oxidizers and organic

substances of pyrotechnic mixtures in terms of external heating. *Scientific bulletin of Ukrainian Scientific Research Institute of fire safety*, (24), pp. 47-53.

11. Kirichenko O. V., Akinshin V. D., Tupitskiy V. M., Vaschenko V. A., Tsybulin V. V. Ignition particles of metallic fuel in products of decomposition nitrate-containing oxidizers and organic substances of pyrotechnic mixtures when the external thermo-influences, in: *International scientifically-practical conference "Fire safety: theory and practice"*, Cherkasy (2011), pp. 30-33.

12. Kirichenko O. V. (2012). Thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers of pyrotechnic mixtures in terms of external thermo-influences. *Scientific bulletin of Ukrainian Scientific Research Institute of fire safety*, (25), pp. 126-136.

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кириченко О. В. Визначення критичних режимів розвитку процесів горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій / О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, Т. І. Бутенко, В. В. Цибулін // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2020. – № 2. – С. 123 – 133.

2. Ващенко В. А. Процеси горіння металізованих конденсованих систем / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. І. Заика, І. В. Яценко, В. В. Цибулін. – К.: Наукова думка, 2008. – 745 с.

3. Кириченко О. В. Пожежонебезпечні термовпливи на поверхню металевих корпусів піротехнічних виробів в умовах пострілу та польоту / Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В. // Проблеми пожежної безпеки. – Харків: НУЦЗУ, 2012. – № 32. – с. 98 – 112.

4. Кириченко О. В. Швидкість та межі горіння піротехнічних нітратно-магнієвих сумішей в умовах зовнішніх термовпливів / Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тулицький В. М. // Проблеми пожежної безпеки. – Харків: НУЦЗУ, 2013. – № 34. – с. 73 – 95.

5. Кириченко О. В. Залежність вмісту неокисленого алюмінію в продуктах згорання піротехнічних нітратно-алюмінієвих сумішей від співвідношення компонентів та зовнішнього тиску // Науковий вісник УкрНДІПБ, 2011. – № 1(23). – с. 60 – 68.

6. Кириченко О. В. Залежність вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згорання піротехнічних сумішей алюмінію з нітратовмісними окислювачами від співвідношення компонентів та зовнішнього тиску // Вісник ЧДТУ, 2011. – № 1. – с. 119 – 124.

7. Кириченко О. В. Спалахування частинок алюмінію в продуктах розкладання нітратовмісних окиснювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при підвищених температурах нагріву / Кириченко О. В., Ващенко В. А., Акіньшин В. Д., Цибулін В. В. // Пожежна безпека: теорія і практика. Збірник наукових праць. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2011. – № 9. – с. 17 – 25.

8. Кириченко О. В. Високотемпературне окислення магнію в продуктах розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при зовнішніх термовпливах / Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тищенко Є. О. // Вісник ЧДТУ, 2011. – № 3. – с. 115 – 120.

9. Кириченко О. В. Термічне розкладання добавок органічних речовин в піротехнічних сумішах в умовах зовнішніх термовпливів / Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В. // Вісник ЧДТУ, 2011. – № 4. – с. 116 – 120.

10. Кириченко О. В. Високотемпературне окислення алюмінію в продуктах розкладання окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей в умовах зовнішнього нагріву / Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тулицький В. М. // Науковий вісник УкрНДІПБ, 2011. – № 1(24). – с. 47 – 53.

11. Кириченко О. В. Спалахування частинок металічних палих в продуктах розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при зовнішніх термовпливах / Кириченко О. В., Акіньшин В. Д., Тулицький В. М.,

Ващенко В. А., Цибулін В. В. // Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції “Пожежна безпека: теорія і практика”, 7 жовтня 2011 р., м. Черкаси. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2011. – с. 30 – 33.

12. Кириченко О. В. Термічне розкладання нітратовмісних окислювачів піротехнічних сумішей в умовах зовнішніх термовпливів // Науковий вісник УкрНДПБ, 2012. – № 1(25). – с. 126 – 136.

**УДК 614.841:536.46**

*Олег МИРОШНИК, доктор технічних наук, професор (ORCID: 0000-0001-8951-9498),*

*Євгеній ШКОЛЯР, кандидат психологічних наук (ORCID:0000-0002-7304-1677),*

*Валентин МЕЛЬНИК, кандидат технічних наук, доцент (ORCID:0000-0001-6593-5964),*

*Олександр ДЯДЮШЕНКО, кандидат технічних наук, доцент  
(ORCID:0000-0003-0797-2251),*

*Костянтин МИГАЛЕНКО, кандидат технічних наук, доцент  
(ORCID:0000-0002-7125-8442),*

*Марина ТОМЕНКО, кандидат педагогічних наук (ORCID:0000-0002-2354-9106),*

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

#### **АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО ЕФЕКТУ НА ІНІЦІАЦІЮ ГОРІННЯ МЕТАЛЕВОГО ПАЛЬНОГО У ПІРОТЕХНІЧНИХ СУМІШЕЙ**

*Представлено результати експериментальних досліджень та експериментально-статистичні моделі для оцінки впливу технологічних параметрів зарядів піротехнічних нітратно-металевих джерел запалювання та зовнішніх чинників на температуру займання частинок металевих палив в продуктах термічного розкладання нітратовмісного окиснювача та добавок органічних речовин.*

*Термічне розкладання нітратовмісного окиснювача (нітрату натрію) та органічних добавок (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену) при високій температурі спричиняє інтенсивне виділення тепла, займання частинок металу та передчасне вибухонебезпечне спрацьовування джерел запалювання. Це може призвести до пожежонебезпечного руйнування виробів. В багатьох випадках передчасне вибухонебезпечне спрацьовування піротехнічних виробів має катастрофічні наслідки, оскільки процес горіння піротехнічних зарядів, що почався, неможливо ефективно ліквідувати сучасними засобами пожежогасіння.*

**Ключові слова:** *піротехнічні суміші, нітратно-металеві джерела запалювання.*