

UDC 614.841:536.46

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.1.122.130>

*Anatolii BELIKOV¹, Doctor of technical science, professor
(ORCID: 0000-0001-5822-9682),*

Ievgenii SHKOLIAR², PhD in psychological sciences (ORCID:0000-0002-7304-1677),

Roman MOTRICHUK³, doctor of philosophy (ORCID: 0000-0002-5670-6788),

Maryna TOMENKO², PhD in pedagogical sciences, docent (ORCID:0000-0002-2354-9106),

Valentin DYVEN², PhD in history, docent (ORCID ID: 0000-0002-8700-0761),

Serhii HONCHAR, (ORCID: 0000-0003-4806-7012),

¹*Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture*

²*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University
of Civil Protection of Ukraine*

³*The Main Department of State Emergency Service of Ukraine in Cherkasy Region*

COMBUSTION PROCESSES OF ALUMINUM POWDER IN PYROTECHNIC MIXTURES

This paper examines the problem of thermal stability of pyrotechnic mixtures used in various pyrotechnic products. The main attention is paid to the analysis of the influence of high temperatures and external pressures on the burning rate and stability limits of these mixtures. It has been established that an increase in temperature and external pressure can lead to unstable combustion, creating a risk of explosion. The results of the study indicate the concentration limits of combustion, within which the process remains stable, as well as the change in the combustion speed depending on the temperature, the content of the oxidizer, the size of the metal fuel particles, and the content of organic additives. Further research is planned to focus on theoretical analysis and modeling of the combustion process in order to determine safe parameters for pyrotechnic mixtures that will prevent explosive modes.

In addition, the research emphasizes the importance of understanding the influence of technological parameters on the fire safety of pyrotechnic mixtures. It has been established that optimizing the composition of mixtures can significantly reduce the risk of unstable combustion and explosion. In particular, studies show that the correct choice of metal fuel particle size and concentration of organic additives can provide more stable combustion. Attention is also focused on the need to further study the influence of external factors, such as temperature and pressure, on the safety of pyrotechnic mixtures. This work makes an important contribution to the development of safe practices in the pyrotechnic industry and contributes to safety in the use of pyrotechnic products.

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

Formulation of the problem. Pyrotechnic products for various purposes (lighting, tracers, pyrotechnic IR emitters, fireworks compositions, etc. [1 – 4]) based on compacted mixtures of metal flammable powders and nitrate-containing oxidizers (for example, mixtures of aluminum + sodium nitrate, as the most widely used) in practice are exposed to various types of thermal influences (in case of a fire in warehouses where pyrotechnic products loaded with charges of the mixtures in question are stored, during transportation with intense convective heating of their surfaces, or during aerodynamic heating of the metal shells of products during firing and flight). As a result, under the influence of external heat flows on the metal bodies of the products, they overheat, which leads to premature ignition and the

development of the combustion process of mixtures under conditions of increasing temperatures and external pressures.

Analysis of recent research and publications. This leads to premature operation of products, their destruction with the formation of high-temperature combustion products, which fly in different directions at high speeds and are a fire hazard for surrounding objects, which is presented in Figure 1. Currently, there are no systematic studies of the influence of these conditions on the speed, formation and development of extreme explosive combustion modes of mixtures, which complicates the formation of a database on the fire hazardous properties of pyrotechnic mixtures under conditions of various external thermal influences.

Setting the problem and solving it. Therefore, **the purpose** of this work is to study the effect of elevated heating temperatures (T_0 , K) and external pressures (P , Pa) on the rate and limits of combustion of compacted mixtures of aluminum and sodium nitrate powders with additives of organic substances (naphthalene, anthracene) for a wide range of changes in technological factors used in pyrotechnic production (oxidizer excess coefficient α , of medium particle size of metal fuel powder (d_m , μm), of relative mass content of organic substance additives ε (naphthalene, anthracene)) and various external pressures (P , Pa), which determine the limiting, stable combustion modes of mixtures, deviation from which leads to uncontrolled development of their combustion process (a sharp increase in the combustion rate or its significant decrease until combustion ceases).

Presentation of the main research material. The components of the mixtures were produced using technology adopted in pyrotechnic production. Samples of mixtures were obtained by pressing (coefficient of compaction $C_c = 0,96..0,98$) in metal shells with a diameter $2 \cdot 10^{-2}$ m and thickness $8 \cdot 10^{-4}$ m; At the same time, the press-fit heights were $h = 3..4 \cdot 10^{-2}$ m. Mixtures with an excess oxidant ratio were used $\alpha = 0,1..1,5$.

$$\alpha = \frac{\zeta_{OK} / \zeta_{\varepsilon}}{(\zeta_{OK} / \zeta_{\varepsilon})_{cm}}$$

where ζ_{OK} , ζ_{ε} – relative mass fractions of oxidizer and metal fuel in a given mixture; index “cr” denotes the stoichiometric ratio of components; while the values $\alpha < 1$ correspond to over-enrichment of the mixture with metal fuel, and when $\alpha > 1$ the mixture contains an oxidizing agent in excess, the relative mass content of the organic substance additive in the mixture $\varepsilon = 0,05..0,20$ and dispersion of components $d_M = 50..306 \mu\text{m}$ and $d_N = 100..106 \mu\text{m}$. Burning rate u (m/s) samples of mixtures were measured by non-contact methods using photo sensors, which make it possible to record the beginning and end of combustion of a sample with the height h and find the average burning rate using the formula

$$u = \frac{h}{t}$$

(t – sample combustion time). To find the concentration limits of combustion (combustion limits according to α): upper concentration limits of combustion α_{BIII} and lower concentration limits of combustion α_{HIII} ($\alpha_{BIII} < 1 < \alpha_{HIII}$) transition mixtures were used, consisting of the same components as the main ones, but with a smaller excess of aluminum (when determining α_{BIII}) or with more content (when determining α_{HIII}). Moreover, to determine α_{BIII} (similarly α_{HIII}) the following formula was used:

$$\zeta_{BIII} = \frac{\zeta_{M1} + \zeta_{M2}}{2}, \quad (1)$$

where ζ_{M1} – relative mass content of aluminum at which none of the samples taken for research burns anymore; ζ_{M2} – relative mass content of aluminum at which all samples

still burn; ζ_{BIII} – relative mass content of aluminum in the mixture, which corresponds to α_{BIII} . Standard metrologically certified equipment was used to conduct the research [4, 7].

As a result of the studies, it was established that for the considered operating ranges of changes in technological parameters (oxidizer excess coefficient, organic additive content and dispersion of metal fuel and oxidizer powders) and external factors (heating temperature, external pressure), the concentration limits of combustion of mixtures α_{BIII} and α_{HIII} (α_{BIII} – upper combustion concentration limit (the maximum permissible content of metal fuel in the mixture, at which the combustion process is still stable), α_{HIII} – lower combustion concentration limit (the maximum content of oxidizer in the mixture at which the combustion process does not yet die out)): $\alpha_{BIII} = 0,1...0,20$ and $\alpha_{HIII} = 1,4...1,5$.

In order to study the general nature of dependencies behavior $u(T_0)$ for mixtures at the considered values of technological parameters and external factors, the indicated dependencies were studied in the range of variation α : $\alpha_{BIII} < \alpha < \alpha_{HIII}$. This was due to the fact that in practice mixtures with values α , which are close to α_{BIII} or α_{HIII} are not used due to their obvious instability under external thermal influences.

All the patterns of behavior of dependencies established below $u(T_0)$ are obtained for the first time and can be used as part of a general database on the formation of fire hazardous properties of mixtures under conditions of external thermal influences.

The influence of the oxidizer excess coefficient, the dispersion of the metal fuel and external pressure on the dependence of the combustion rate on the heating temperature. From the data obtained, the main ones of which are presented in Fig. 1 – 4, it follows that the increase T_0 from 293 K to 800 K leads to an increase in combustion rate by 1.4...2.6 times; with increasing T_0 dependence $u(T_0)$ amplifies 1.2...1.4 times.

In addition, an increase in the oxidizer excess coefficient leads to a decrease in the combustion rate and a noticeable weakening of the dependence $u(T_0)$: increase α from 0,15 to 1,5 leads to a decrease in the combustion rate by 3.9...4.1 times and a weakening of the dependence $u(T_0)$ by 1.5...1.7 times.

Reducing the dispersion of metal fuel powder leads to an increase in the combustion rate and an increase in the dependence $u(T_0)$: decreasing values d_m from 306 μm to 56 μm leads to an increase in the combustion rate by 2.1...2.4 times and an increase in the dependence $u(T_0)$ by 1.3...1.5 times.

An increase in external pressure leads to a significant increase in the combustion rate and an increase in the dependence $u(T_0)$ for all studied ranges of change α , d_m and d_N : change in external pressure from 10^5 Pa to 10^7 Pa leads to an increase in the combustion rate by 1.9...2.2 times and an increase in the dependence $u(T_0)$ by 1.2...1.4 times.

Introduction of organic additives into the mixture in amounts up to $\varepsilon = 0,20$ leads to a decrease in the burning rate by 1.5...3.6 times and a weakening of the dependence $u(T_0)$ by 1.1...1.3 times: for example, an increase in the amount of additive from $\varepsilon = 0,05$ to $\varepsilon = 0,20$ leads to a decrease in the burning rate by 1.5...1.8 times for the addition of naphthalene and 2.9...3.3 times for the addition of anthracene, as well as a weakening of the dependence $u(T_0)$ for all additives 1.15... 1.20 times.

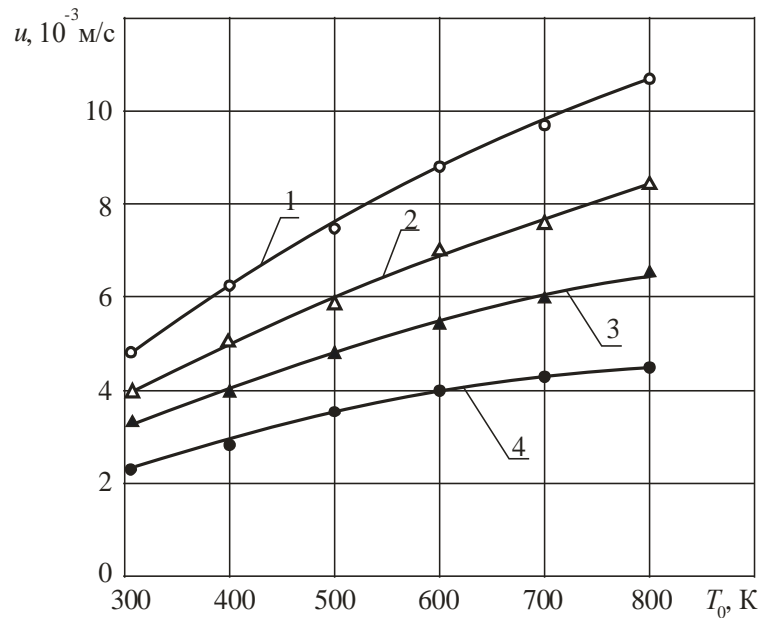


Figure 1 – The influence of the dispersion of metal fuel powder on the dependence of the combustion rate of stoichiometric mixtures of aluminum + sodium nitrate on the heating temperature at external pressure $P = 10^5$ Pa ($\alpha = 1,0$, $d_N = 106 \mu\text{m}$): 1 – $d_M = 56 \mu\text{m}$; 2 – $d_M = 105 \mu\text{m}$; 3 – $d_M = 179 \mu\text{m}$; 4 – $d_M = 306 \mu\text{m}$

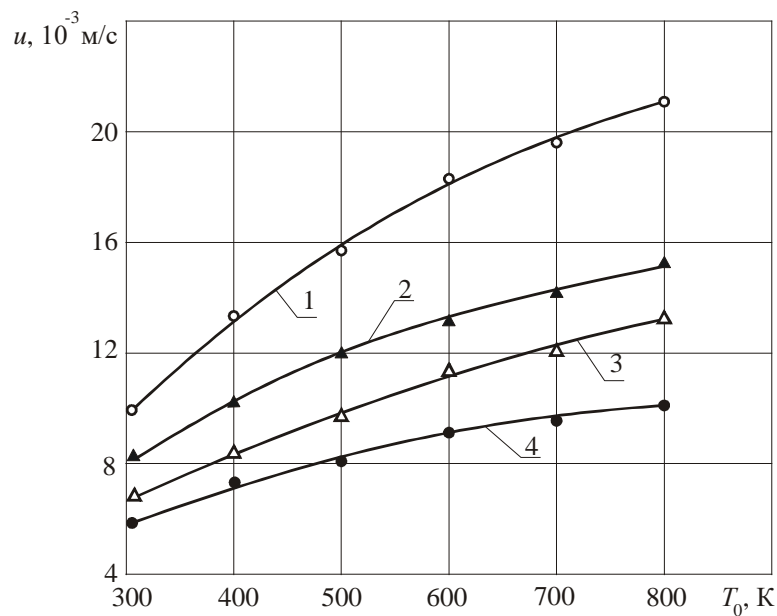


Figure 2 – The influence of the dispersion of metal fuel powder on the dependence of the combustion rate of stoichiometric mixtures of aluminum + sodium nitrate on the heating temperature at external pressure $P = 10^7$ Pa ($\alpha = 1,0$, $d_N = 106 \mu\text{m}$): 1 – $d_M = 56 \mu\text{m}$; 2 – $d_M = 105 \mu\text{m}$; 3 – $d_M = 179 \mu\text{m}$; 4 – $d_M = 306 \mu\text{m}$

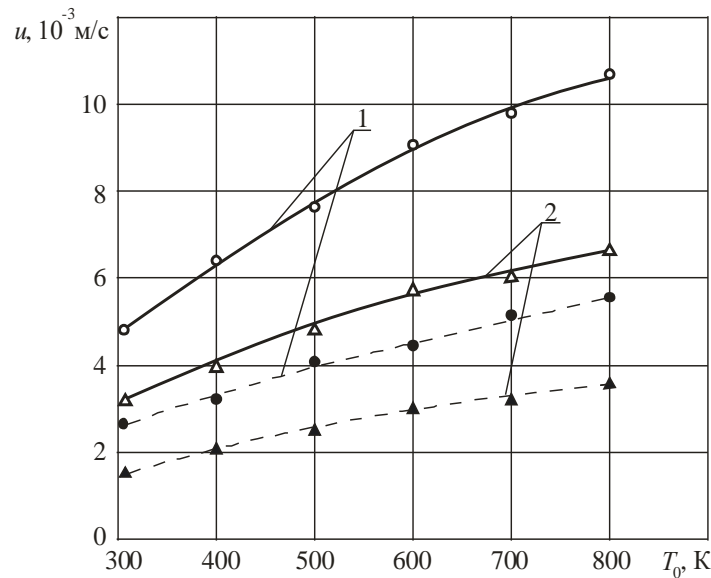


Figure 3 – The influence of naphthalene additives on the dependence of the combustion rate of stoichiometric mixtures of aluminum + sodium nitrate on the heating temperature when $P = 10^5$ Pa ($\alpha = 1,0$, $d_N = 106$ μm): 1 – $d_M = 56$ μm ; 2 – $d_M = 179$ μm ; ————— – mixture without additive; - - - - - $\varepsilon = 0,20$

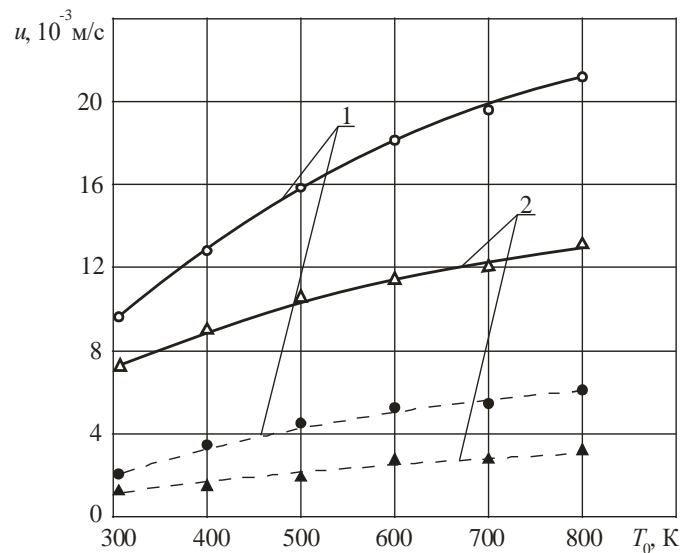


Figure 4 – The influence of anthracene additives on the dependence of the combustion rate of stoichiometric mixtures of aluminum + sodium nitrate on the heating temperature when $P = 10^7$ ($\alpha = 1,0$, $d_N = 106$ μm): 1 – $d_M = 56$ μm ; 2 – $d_M = 179$ μm ; ————— – mixture without additive; - - - - - $\varepsilon = 0,20$

Conclusions. As a result of the research, the following patterns were established:

- combustion concentration limits were determined $\alpha_{BIII} = 0,1...0,2$ and $\alpha_{HIII} = 1,4...1,5$, within which the combustion process of mixtures is stable and quasi-stationary;
- increasing T_0 from 293 K to 800 K leads to a significant increase in the combustion rate within 1.4...2.6 times and an increase in the dependence $u(T_0)$ by 1.2...1.4 times; at the same time, an increase in the oxidizing agent content in the mixture from α_{BIII} to α_{HIII} leads to a decrease in the burning rate by 2.6...2.9 times and a weakening of the dependence

$u(T_0)$ by 1.5...1.7 times; increase in magnitude d_m from 56 μm to 306 μm leads to a decrease in the burning rate by 2.1...2.4 times and a weakening of the dependence $u(T_0)$ by 1.3...1.5 times; increase in external pressure from 10^5 Pa to 10^7 Pa leads to an increase in the combustion rate by 1.9...2.2 times and an increase in the dependence $u(T_0)$ by 1.2...1.4 times; –increasing the relative content of organic additives in the mixture (naphthalene, anthracene) from 0.05 до 0.2 leads to a decrease in the burning rate by 1.5...1.8 times and a weakening of the dependence $u(T_0)$ by 1.15...1.20 times.

In further research, it is planned to consider the issues of theoretical analysis and modeling of the combustion process of multicomponent pyrotechnic mixtures in order to predict the permissible ranges of changes in the technological parameters of the initial mixture (ratio of components and their dispersity) and parameters of external thermal influences (heating temperature, external pressure), which do not lead to the occurrence of unstable, explosive regimes of combustion of mixtures.

REFERENCES

1. 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.
2. Vashchenko V. A. Kompleks eksperymentalnykh ustanovok ta metodyk dlia vyznachennia shvydkosti ta mezh horinnia metalizovanykh kondensovanykh system u dynamichnykh umovakh ekspluatatsii / V. A. Vashchenko, P. I. Zaika, D. M. Krasnov // *Visnyk Sumskoho derzhavnogo universytetu*, 2001. – № 19. – S. 112 – 124.
3. Kyrychenko O.V. Vyznachennia dopustymykh rezhymiv nahrivu pirotekhnichnykh sumi-shei pry yikh ekspluatatsii / O.V. Kyrychenko, O.S. Dibrova, R.B. Motrichuk, Ye.O. Tyshchenko, V.V. Tsybulin // *Visn. Cherkas. derzh. tekhnol. un-tu*, 2018. – № 2. – S. 5 – 11.
4. Kyrychenko O.V. Vyznachennia vmistu vysokotemperaturnoho kondensatu v produktakh zghoriannia pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishei pry pidvyshchennykh zovnishnikh tys-kakh / O.V. Kyrychenko, O.S. Dibrova, R.B. Motrichuk, O.S. Baranovskiy, V.V. Tsybulin // *Nauka ta vyrobnytstvo: mizhvuz. temat. zb. nauk. pr.* 2018. – Vyp. 19. – S. 323 – 332.
5. Kyrychenko O.V. Doslidzhennia spalakhuvannia ta horinnia chastynok aliuminiievo-mahnievykh splaviv u produktakh rozkladannia tverdykh pirotekhnichnykh palyv /O.V. Kyrychenko, O.S. Dibrova, R.B. Motrichuk, V.A. Vashchenko, S.O. Kolinko // *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 2019. – № 2 (8), – S. 81–85.
6. Kyrychenko O.V. Doslidzhennia vplyvu mitsnosti zariadiv pirotekhnichnykh nitratno metalevykh sumishei na pozhezhnu bezpeku vyrobiv na yikh osnovi / O.V. Kyrychenko, O.S. Dibrova, R.B. Motrichuk, V.A. Vashchenko, S.O. Kolinko, V.V. Tsybulin // *Visn. Cherkas. derzh. tekhnol. un-tu*, 2019. –№ 3. – S. 56 – 67.
7. Kyrychenko O.V. Doslidzhennia spalakhuvannia ta horinnia chastynok metalevoho palnoho u produktakh rozkladannia nitratovmisnykh okysniuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pry zovnishnikh termichnykh vplyvakh / O.V. Kyrychenko, R.B. Motrichuk, O.S. Dibrova, V.P. Melnyk, V.A. Vashchenko, T.I. Butenko // *Zbirnyk naukovykh prats: Problemy pozhezhnoi bezpeky*, 2020. – № 47.– S. 50 – 59.
8. Kyrychenko O.V. Vyznachennia krytychnykh rezhymiv rozvytku protsesiv horinnia pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishei v umovakh zovnishnikh termichnykh dii / O.V. Kyrychenko, O.S. Dibrova, R.B. Motrichuk, V.A. Vashchenko, S.O. Kolinko, Butenko, V.V. Tsybulin // *Visn. Cherkas, derzh. tekhnol. un-tu*, 2020. – №2. – S. 123 – 133.

9. Dibrova O. Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions / O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, V. Melnyk // TECHNOLOGY AUDIT AND PRODUCTION RESERVES (ISSN 2664-9969), 2020. – № 1/1(51). – P.44 – 49.
10. Dibrova O.S. Pidvyshchennia pozhezhnoi bezpeky pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishei v umovakh zovnishnykh termichnykh dii / O.S. Dibrova, O.B. Kyrychenko, R.B. Motrichuk, V.A. Vashchenko // International Scientific Journal “Internauka” <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5799.
11. Dibrova O.S. Zakonomirnosti vplyvu tekhnolohichnykh parametriv na pozhezhu bezpeku pirotekhnichnykh nitratno-tytanovykh sumishei v umovakh zovnishnykh termichnykh dii / O.S. Dibrova, O.V. Kyrychenko, R.B. Motrichuk, V.A. Vashchenko // International Scientific Journal “In-ternauka” <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5798.
12. Motrichuk R.B., Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Kolinko S.O., Butenko T.I, Kyrychenko Ye.P., Tsybulin V.V. Zakonomirnosti vplyvu tekhnolohichnykh parametriv ta zovnishnykh chynnykiv na temperaturu ta sklad produktiv zghoriannia pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishei // Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu, 2020. № 4 S. 131 - 142.
13. Zhartovskyi S., Titenko O., Kyrychenko O., Tyshchenko I., Motrichuk R., Melnyk V. Procedure for constructing a mathematical model to determine the time of the initial stage of fire evolution // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2021. № 1/10 (109). С. 45 – 52.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ващенко В. А. Процеси горіння металізованих конденсованих систем / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. І. Заїка, І. В. Яценко, В. В. Цибулін. – К.: Наукова думка, 2008. – 745 с.
2. Ващенко В. А. Комплекс експериментальних установок та методик для визначення швидкості та меж горіння металізованих конденсованих систем у динамічних умовах експлуатації / В. А. Ващенко, П. І. Заїка, Д. М. Краснов // Вісник Сумського державного університету, 2001. – № 19. – С. 112 – 124.
3. Кириченко О.В. Визначення допустимих режимів нагріву піротехнічних сумішей при їх експлуатації / О.В. Кириченко, О.С. Діброва, Р.Б. Мотрічук, Є.О. Тищенко, В.В. Цибулін // Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту, 2018. – № 2. – С. 5 – 11.
4. Кириченко О.В. Визначення вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згоряння 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: міжвуз. темат. зб. наук. пр. 2018. – Вип. 19. – С. 323 – 332.
5. Кириченко О.В. Дослідження спалахування та горіння частинок алюмінієво-магнієвих 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), – С. 81–85.
6. Кириченко О.В. Дослідження впливу міцності зарядів піротехнічних нітратно-металевих сумішей на пожежну безпеку виробів на їх основі / О.В. Кириченко, О.С. Діброва, Р.Б. Мотрічук, В.А. Ващенко, С.О. Колінько, В.В. Цибулін // Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту, 2019. – № 3. – С. 56 – 67.
7. 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 // Збірник наукових праць: Проблеми пожежної безпеки, 2020. – № 47.– С. 50 – 59.

8. 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, Бутенко, В.В. Цибулін // Вісн. Черкас, держ. технол. ун-ту, 2020. – №2. – С. 123 – 133.

9. Dibrova O. Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions / O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, V. Melnyk // TECHNOLOGY AUDIT AND PRODUCTION RESERVES (ISSN 2664-9969), 2020. – № 1/1(51). – P.44 – 49.

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 “Internauka” <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 “Internauka” <http://www.inter-nauka.com>, 2020. – № 5/5798.

12. Мотрічук Р.Б., Кириченко О.В., Ващенко В.А., Колінько С.О., Бутенко Т.І, Кириченко Є.П., Цибулін В.В. Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру та склад продуктів згоряння піротехнічних нітратно-металевих сумішей // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2020. № 4 С. 131 - 142.

13. Zhartovskyi S., Titenko O., Kyrychenko O., Tyshchenko I., Motrichuk R., Melnyk V. Procedure for constructing a mathematical model to determine the time of the initial stage of fire evolution // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2021. № 1/10 (109). С. 45 – 52.

Анатолій БЄЛІКОВ¹, доктор технічних наук, професор
(ORCID: 0000-0001-5822-9682),

Євгеній ШКОЛЯР², кандидат психологічних наук (ORCID:0000-0002-7304-1677),

Роман МОТРИЧУК³, доктор філософії (ORCID: 0000-0002-5670-6788),

Марина ТОМЕНКО², кандидат педагогічних наук, доцент
(ORCID:0000-0002-2354-9106),

Валентин ДИВЕНЬ², кандидат історичних наук, доцент
(ORCID ID: 0000-0002-8700-0761),

Сергій ГОНЧАР², (ORCID: 0000-0003-4806-7012),

¹Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,

²Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

Національного університету цивільного захисту України,

³Головне управління ДСНС України у Черкаській області

ПРОЦЕСИ ГОРІННЯ ПОРОШКІВ АЛЮМІНІЮ В СКЛАДІ ПІРОТЕХНІЧНИХ СУМІШЕЙ

У даній роботі розглядається проблема термічної стабільності піротехнічних сумішей, які використовуються в різноманітних піротехнічних виробках. Основна увага приділяється аналізу впливу високих температур та зовнішніх тисків на швидкість горіння та межі стійкості цих сумішей. Встановлено, що підвищення температури та зовнішнього тиску може призвести до нестабільного горіння, що створює ризик вибу-

ху. Результати дослідження вказують на концентраційні межі горіння, в межах яких процес залишається стабільним, а також на зміну швидкості горіння в залежності від температури, вмісту окислювача, розміру частинок металевого палива та вмісту органічних добавок. Подальші дослідження плануються зосередити на теоретичному аналізі та моделюванні процесу горіння з метою визначення безпечних параметрів для піротехнічних сумішей, що запобігатимуть вибухонебезпечним режимам.

Окрім того дослідження підкреслює важливість розуміння впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних сумішей. Встановлено, що оптимізація складу сумішей може значно знизити ризик нестабільного горіння та вибуху. Зокрема, дослідження показують, що правильний вибір розміру частинок металевого палива та концентрації органічних добавок може забезпечити більш стабільне горіння. Також акцентується увага на необхідності подальшого вивчення впливу зовнішніх факторів, таких як температура та тиск, на безпеку піротехнічних сумішей. Ця робота вносить важливий вклад у розробку безпечних практик у піротехнічній індустрії та сприяє забезпеченню безпеки при використанні піротехнічних виробів.

Ключові слова: *піротехнічні вироби, нітратно-алюмінієві суміші, процеси горіння сумішей.*