

UDC 614.841:536.46

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.126.1051

SIMULATION OF THE COMBUSTION PROCESSES OF PYROTECHNIC POWDER OF METAL FUEL MAGNESIUM

BIELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
DIADIUSHENKO O.O.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
DIBROVA O.S.³, *Cand. Sc. (Tech.)*,
HRUSHOVINCHUK O.V.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KHYZHNIAK A.A.⁵, *Cand. Sc. (Tech.)*,
NOZHKO I.O.⁶, *Cand. Sc. (Ped.)*

¹ Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.: +38 (067) 611-26-48, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Department of Fire Prevention Work, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka Str., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel.: +38 (093) 407-19-83, e-mail: diadiushenko_oleksandr@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0003-0797-2251

³ Department of Fire Prevention Work, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka Str., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel.: +38 (097) 355-00-55, e-mail: o.dibrova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4104-9500

⁴ Department of Fire Prevention Work, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka Str., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel.: +38 (067) 366-06-02, e-mail: grushovinchuk@dcs.gov.ua, ORCID ID: 0000-0001-5093-5435

⁵ Department of Fire Prevention Work, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka Str., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel.: +38 (067) 470-44-33, e-mail: khyzhniak_andrii@chipb.org.in, ORCID ID: 0009-0005-1745-0432

⁶ Department of Fire Prevention Work, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka Str., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel.: +38 (093) 992-65-72, e-mail: nozhko_ihor@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0003-1554-0088

Abstract. Problem statement. The problem of the lack of a database for evaluating the fire-hazardous properties of pyrotechnic products under conditions of external thermal influences significantly complicates the prediction of the fire-hazardous properties of pyrotechnic mixtures under conditions of various external thermal influences (for example, in the event of ignition of warehouses where pyrotechnic products equipped with charges from the mixtures in question are stored, under conditions of transportation at intense convective heating of their surfaces, or during aerodynamic heating of the metal shells of products during firing and flight), an important characteristic of which is the heat flow that heats the metal cases of pyrotechnic products to critical temperatures that may exceed the flash point of metal fuels in gaseous products of thermal decomposition of oxidants. **Purpose of the article** is to obtain such a database on the ignition temperature of the particles of the considered metals under conditions of elevated heating temperatures and external pressures in the form of simple experimental and statistical models, convenient for practical evaluations. To solve this problem, the methods of experimental and statistical modeling were used and specialized software was developed using regression and interpolation methods, which allows you to calculate the levels of ignition temperatures of metal fuel particles in gaseous products $O_2 + N_2$ (main products decomposition of nitrate-containing oxidizers [1; 12; 15; 18; 19]), which characterize their ability to accelerate the ignition process under conditions of elevated heating temperatures and external pressures. **Conclusion.** New regularities of the complex influence of various controlled parameters on the ignition temperature of magnesium particles in the products of thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers have been established. The combustion processes of pyrotechnic metal fuel powders were simulated and the influence of controlled parameters on the ignition temperature of magnesium metal fuel particles was determined, which is necessary for the further formation of a database on the fire-hazardous properties of pyrotechnic products under conditions of external thermal influences.

Keywords: *fire safety; pyrotechnic products based on multi-component nitrate-metallized mixtures; processes of ignition and development of combustion*

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ ПОРОШКІВ МЕТАЛЕВОГО ПАЛЬНОГО МАГНІЮ

БЕЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
ДЯДЮШЕНКО О. О.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*,
ДІБРОВА О. С.³, *канд. техн. наук*,
ГРУШОВІНЧУК О. В.⁴, *канд. техн. наук*,

ХИЖНЯК А. А.⁵, канд. техн. наук,
НОЖКО І. О.⁶, канд. пед. наук

¹ Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.: +38 (067) 611-26-48, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел.: +38 (093) 407-19-83, e-mail: diadiushenko_oleksandr@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0003-0797-2251

³ Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел.: +38 (097) 355-00-55, e-mail: o.dibrova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4104-9500

⁴ Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел.: +38 (067) 366-06-02, e-mail: grushovinchuk@dcs.gov.ua, ORCID ID: 0000-0001-5093-5435

⁵ Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел.: +38 (067) 470-44-33, e-mail: khyzhniak_andrii@chipb.org.in, ORCID ID: 0009-0005-1745-0432

⁶ Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел.: +38 (093) 992-65-72, e-mail: nozsko_igor@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0003-1554-0088

Анотація. Постановка проблеми. Проблема відсутності бази даних для оцінення пожежонебезпечних властивостей піротехнічних виробів в умовах зовнішніх теплових впливів значно ускладнює прогнозування пожежонебезпечних властивостей піротехнічних сумішей в умовах різноманітних зовнішніх теплових впливів (наприклад, загоряння складів, де зберігаються піротехнічні вироби, споряджені зарядами з відповідних сумішей, в умовах транспортування при інтенсивному конвективному нагріванні їх поверхонь або при аеродинамічному нагріванні металевих оболонок виробів під час стрільби та польоту), важлива характеристика з яких – тепловий потік, що нагріває металеві корпуси піротехнічних виробів до критичних температур, які можуть перевищувати температуру спалаху металевих палив у газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювачів. **Мета статті** – отримати базу даних про температуру займання частинок розглянутих металів в умовах підвищених температур нагріву та зовнішнього тиску у вигляді протиприкладних експериментально-статистичних моделей, зручних для практичних оцінок. Застосовано методи експериментально-статистичного моделювання та розроблено спеціалізоване програмне забезпечення із застосуванням методів регресії та інтерполяції, що дозволяє розрахувати рівні температур займання частинок металевих палив в газоподібних продуктах $O_2 + N_2$ (основні продукти розпаду – нітратумісні окиснювачі [1; 12; 15; 18; 19]), що характеризує їх здатність прискорювати процес займання в умовах підвищених температур нагріву та зовнішнього тиску. **Висновок.** Установлено нові закономірності комплексного впливу різних контрольованих параметрів на температуру займання частинок магнію в продуктах термічного розкладання нітратумісних окиснювачів. Проведено моделювання процесів горіння порошків піротехнічного металевих палив та визначено вплив контрольованих параметрів на температуру займання частинок палива металевих магнію, що необхідно для подальшого формування бази даних про пожежонебезпечні властивості піротехнічних виробів в умовах зовнішніх термічних впливів.

Ключові слова: пожежна безпека; піротехнічні вироби на основі багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей; процеси загоряння та розвитку горіння

Introduction. For the practical use of the obtained results on the ignition of particles of metallic fuel magnesium in various oxidizing media, including gaseous products of thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers (nitrates of alkali and alkaline earth metals) of pyrotechnic mixtures for various purposes [1; 3–13; 16; 17; 20–23], it is necessary to create a database based on them, convenient for evaluating the fire-hazardous properties of pyrotechnic products under conditions of external thermal influences, one of the main

parameters of which is the ignition temperature of metal particles. At present, the specified database is missing, which makes it difficult to predict the fire-hazardous properties of pyrotechnic mixtures under conditions of various external thermal influences (for example, during the ignition of warehouses where pyrotechnic products equipped with charges from the mixtures in question are stored, under conditions of transportation with intense convective heating of their surfaces, or during the aerodynamic heating of the metal

casings of the products during the shot and flight), an important characteristic of which is the heat flow that heats the metal cases of pyrotechnic products to critical temperatures that may exceed the flash point of metal fuels in gaseous products of thermal decomposition of oxidants. This leads to premature activation of the products, which leads to their destruction with the formation of high-temperature combustion products that fly at high speeds in different directions and are a fire hazard for surrounding objects [1; 2; 7; 10–12].

Analysis of publications. Currently, research on the influence of technological parameters of mixture charges (ratio of components and their dispersion, compaction coefficient, diameter of the charge and the material of its shell, humidity of the oxidizer, etc.) and external conditions (heating temperature, external pressures, humidity and composition of the environment, etc.) on the main characteristics of their processes ignition and development of combustion (temperature and composition of combustion products, speed of combustion and explosive modes of its development, etc.) are presented in separate articles, monographs and scientific works [14–29]. However, their systematization and analysis from the point of view of practical application at enterprises of Ukraine to increase efficiency in the organization of fire protection systems at objects with the presence of pyrotechnic products, especially in conditions of external thermal influences, are missing.

Purpose of the article is to obtain such a database on the ignition temperature of the particles of the considered metals under conditions of elevated heating temperatures and external pressures in the form of simple experimental and statistical models, convenient for practical evaluations.

Research results. To solve this problem, the methods of experimental and statistical

modeling were used and specialized software was developed using regression and interpolation methods, which allows you to calculate the levels of ignition temperatures of metal fuel particles in gaseous products $O_2 + N_2$ (main products decomposition of nitrate-containing oxidizers [1; 12; 15; 18; 19]), which characterize their ability to accelerate the ignition process under conditions of elevated heating temperatures and external pressures.

Modeling of combustion processes to calculate the dependence of the ignition temperature (T_c , K) on the size of metal particles (d_m , micron), the relative mass concentration of oxygen in the gas mixture $O_2 + N_2$ and external pressure (P , Pa).

The data used were obtained using standard pyrotechnic equipment, as well as well-known photographic methods and methods of microcinema shooting [1; 9; 16; 12].

The model of the combustion process of magnesium powders for the considered metals has the following expression:

$$T_c(d_m, C_{O_2}, P) = C_{O_2} + 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot (118 - 6,3 \cdot P) \cdot d_m^{0,6} + (375,4 - 75,6 \cdot P) \cdot (1 - C_{O_2}^2) \cdot d_m^{-1} - 59,1 \cdot P^{-2 \cdot d_m} + 1062 - 1,2 \cdot P - 0,5 \cdot P^{0,5} \cdot (d_m + C_{O_2})^{-1}$$

Ranges of change of controlled parameters $54 \leq d_m \leq 305$ micron; $0,2 \leq C_{O_2} \leq 0,8$; $10^5 \leq P \leq 10^7$ Pa.

The results of calculations based on the presented model made it possible to establish the following ranges of changes in the ignition temperature of metal particles in the products of thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers, shown in Fig. 1–9.

For magnesium particles, the flash point is $T_c = 780 \dots 1330$ K.

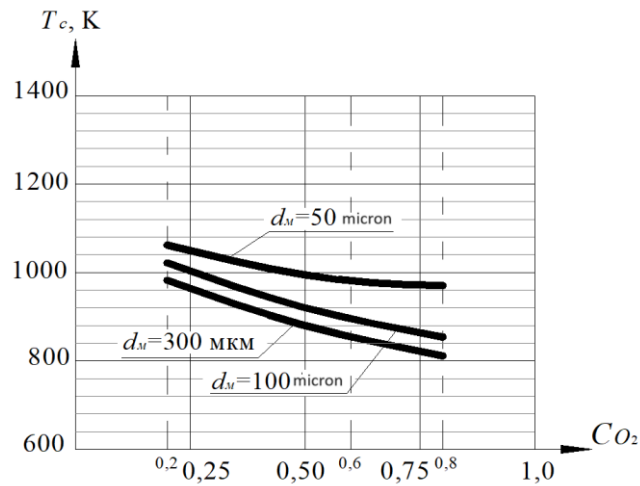


Fig. 1. The influence of the size of magnesium particles and the external pressure $P = 10^5$ Pa on the dependence of the flash point of particles in a gas medium $O_2 + N_2$ on the relative mass concentration of oxygen at different sizes of magnesium particles

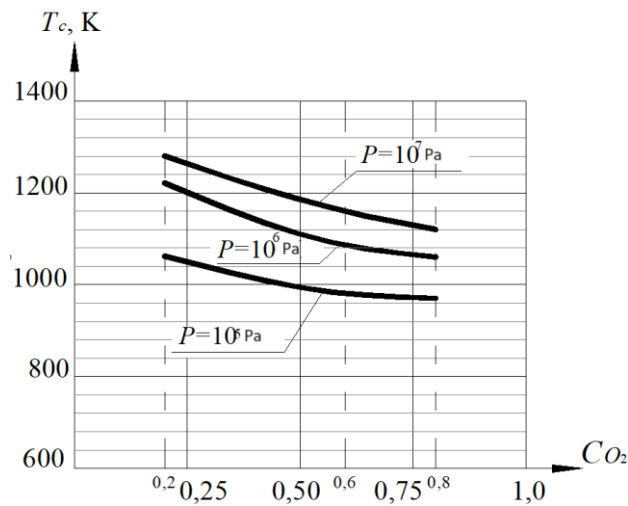


Fig. 2. The influence of the size of magnesium particles $d_m = 50$ мкм and external pressure on the dependence of the flash point of particles in the $O_2 + N_2$ gas environment on the relative mass concentration of oxygen at different external pressures

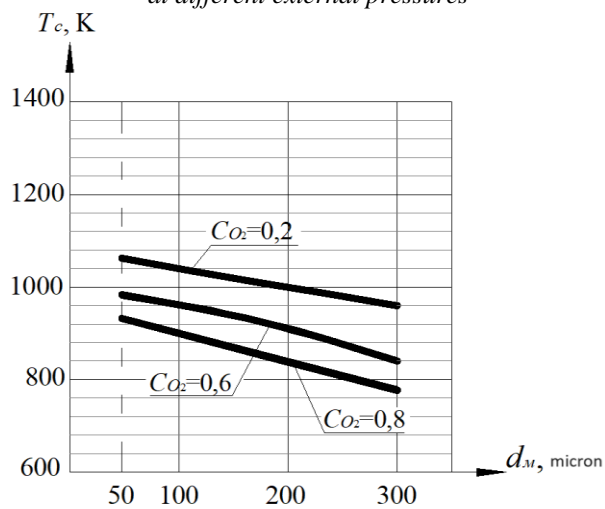


Fig. 3. The influence of the relative mass concentration of oxygen and the external pressure $P = 10^5$ Pa on the dependence of the ignition temperature of a magnesium particle in a gas medium $O_2 + N_2$ on its size at different values of the relative mass concentration of oxygen

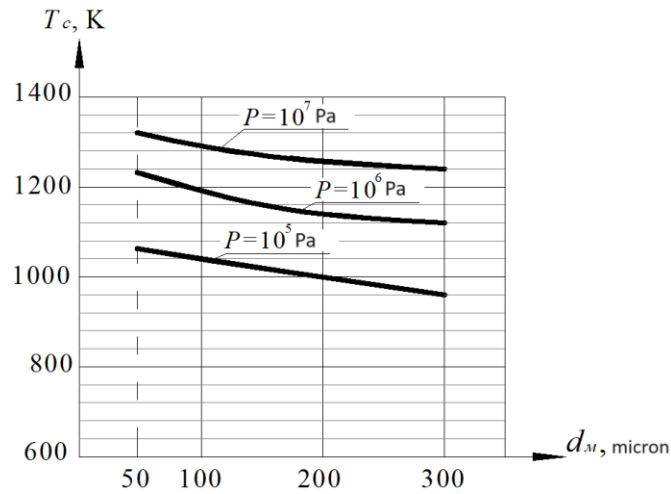


Fig. 4. The influence of the relative mass concentration of oxygen $C_{O_2} = 0,2$ and external pressure on the dependence of the ignition temperature of a magnesium particle in a gas medium $O_2 + N_2$ on its size at different values of the external pressure

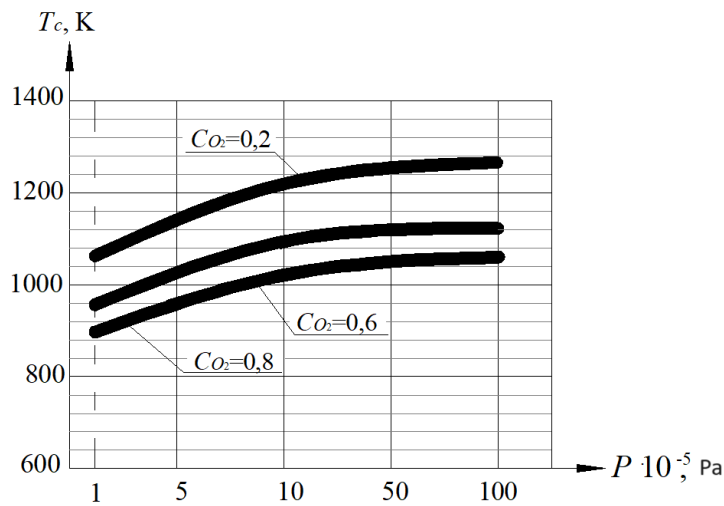


Fig. 5. The effect of the relative mass concentration of oxygen and the size of magnesium particles $d_m = 50$ micron on the dependence of the flash point of the particles on the external pressure at different values of the relative mass concentration of oxygen

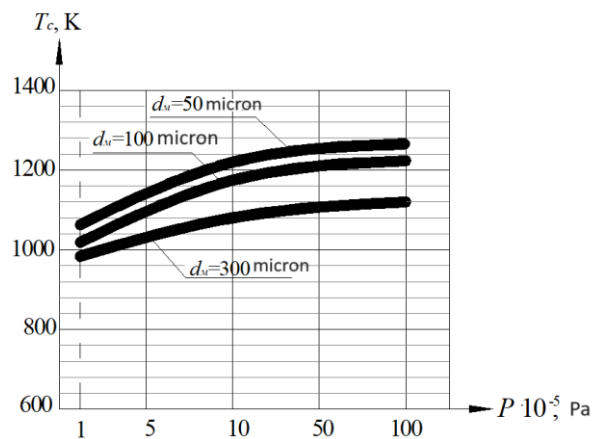


Fig. 6. The influence of the relative mass concentration of oxygen $C_{O_2} = 0,2$ and the size of magnesium particles on the dependence of the flash point of particles on the external pressure at different values of the size of magnesium particles

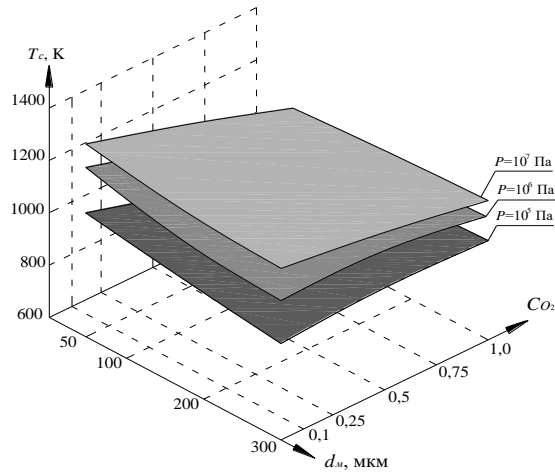


Fig. 7. Three-dimensional image of the dependence of the ignition temperature of a magnesium particle in an $O_2 + N_2$ gas environment C_{O_2} on the parameters and d_m .

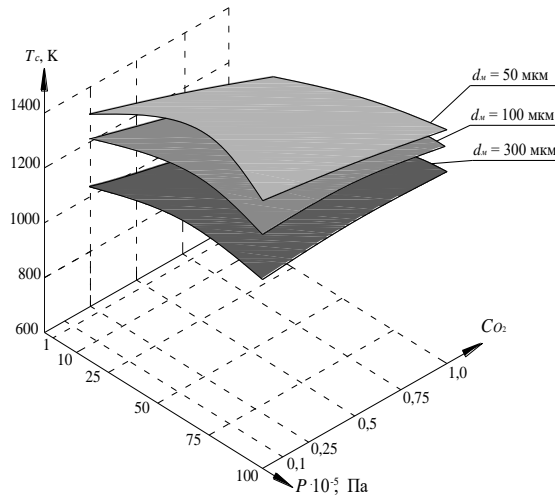


Fig. 8. Three-dimensional image of the dependences of the ignition temperature of a magnesium particle in an $O_2 + N_2$ gas environment on the parameters C_{O_2} and P

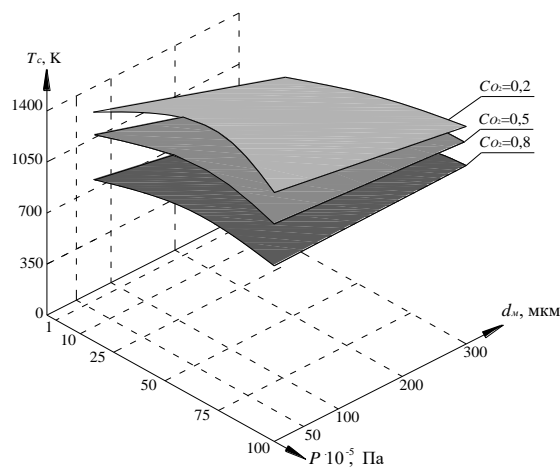


Fig. 9. Three-dimensional image of the dependence of the ignition temperature of a magnesium particle in an $O_2 + N_2$ gas environment on the parameters P and d_m

At the same time, as a result of the calculations for the ranges of changes of the considered parameters (d_m , C_{O_2} , P) used in practice, the processes of ignition and development of combustion of magnesium particles proceed stably and do not have an explosive nature.

In addition, a change in the specified controlled parameters significantly affects the behavior of the ignition temperature of metal particles: an increase d_m in and C_{O_2} leads to a decrease in T_c , and an increase in P – to an increase in T_c .

The obtained model makes it possible to use the software to form a controlled database on the ignition temperatures of magnesium particles in the gaseous decomposition products of nitrate-containing oxidants under external heating conditions.

Conclusion

The regularity of the complex effect on the ignition temperature of magnesium particles of the following parameters was established: an increase in the particle size from $d_m = 5$ micron to $d_m = 300$ micron and a decrease in the relative oxygen content from $C_{O_2} = 0.8$ to $C_{O_2} = 0.2$ leads to a decrease T_c , an increase in external pressure from $P = 10^5$ Pa to $P = 10^7$ Pa leads to an increase. The developed model of the combustion process is used to form a database of calculation data on the effect of the main controlled parameters of pyrotechnic powders (d_m , C_{O_2} , P) on the ignition temperature of magnesium particles in the composition of pyrotechnic mixtures

REFERENCES

1. Vashchenko V.A., Kirichenko O.V., Lega Yu.G., Zaika P.I., Yatsenko I.V. and Tsybulin V.V. *Protsessy gorennya metallizirovannykh kondensirovannykh sistem* [Combustion processes of metallized condensed systems]. *Naukova dumka* [Science Thought]. 2008, 745 p. (in Russian).
2. Kyrychenko O.V., Dibrova O.S., Motrichuk R.B., Tyshchenko E.O. and Tsybulin V.V. *Vyznachennya dopustymykh rezhymiv nahrivu pirotekhnichnykh sumishey pry yikh ekspluatatsiyi* [Determination of permissible modes of heating of pyrotechnic mixtures during their operation]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2018, no. 2, pp. 5–11. (in Ukrainian).
3. Kyrychenko O.V., Dibrova O.S., Motrichuk R.B., Baranovskyi O.S. and Tsybulin V.V. *Vyznachennya vmistu vysokotemperaturnoho kondensatu v produktakh z-horyannya pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishey pry pidvyshchennykh zovnishnikh tyskakh* [Determination of the content of high-temperature condensate in the combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures at elevated external pressures]. *Nauka ta vyrobnytstvo : mizhvuz. temat. zb. nauk. pr.* [Science and Production : interuniversity thematic collection of scientific works]. 2018, iss. 19, pp. 323–332 (in Ukrainian).
4. Kyrychenko O.V., Dibrova O.S., Motrichuk R.B., Vashchenko V.A. and Kolinko S.O. *Doslidzhennya spalakhuvannya ta horinnya chastynok alyuminiyovo-mahnievykh splaviv u produktakh rozkladannya tverdykh pirotekhnichnykh palyv* [Research on the ignition and burning of particles of aluminum-magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels]. *Naukovy visnyk : Tsyvil'nyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka* [Scientific Bulletin : Civil Protection and Fire Safety]. 2019, no. 2 (8), pp. 81–85. (in Ukrainian).
5. Kyrychenko O.V., Dibrova O.S., Motrichuk R.B., Vashchenko V.A., Kolinko S.O. and Tsybulin V.V. *Doslidzhennya vplyvu mitsnosti zaryadiv pirotekhnichnykh nitratnoymetalevykh sumishey na pozhezhnu bezpeku vyrobiv na yikh osnovi* [Study of the impact of the strength of charges of pyrotechnic nitrate-metal mixtures on the fire safety of products on their basis]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2019, no. 3, pp. 56–67. (in Ukrainian).
6. Kyrychenko O.V., Motrichuk R.B., Dibrova O.S., Melnyk V.P., Vashchenko V.A. and Butenko T.I. *Doslidzhennya spalakhuvannya ta horinnya chastynok metalevoho pal'noho u produktakh rozkladannya nitratovmisnykh okysnyuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pry zovnishnikh termichnykh vplyvakh* [Study of ignition and burning of metal fuel particles in decomposition products of nitrate-containing oxidants and organic substances under external thermal influences]. *Problemy pozharney bezopasnosti : zbirnyk nauchnykh trudov* [Problems of Fire Safety : collection of scientific works]. 2020, no. 47, pp. 50–59. (in Ukrainian).
7. Kyrychenko O.V., Dibrova O.S., Motrichuk R.B., Vashchenko V.A., Kolinko S.O., Butenko T.I. and Tsybulin V.V. *Vyznachennya krytychnykh rezhymiv rozvytku protsesiv horinnya pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishey v umovakh zovnishnikh termichnykh diy* [Determination of critical modes of development of pyrotechnic combustion processes of nitrate-metal mixtures under conditions of external thermal effects]. *Visnyk Cherkas'koho*

derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2020, no. 2, pp. 123–133. (in Ukrainian).

8. Dibrova O., Kyrychenko O., Motrychuk R., Tomenko M. and Melnyk V. Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions. *Technology Audit and Production Reserves* (ISSN 2664-9969). 2020, no. 1/1 (51), pp. 44–49.

9. Dibrova O.S., Kyrychenko O.V., Motrichuk R.B. and Vashchenko V.A. *Zakonomirnosti vplyvu tekhnolohichnykh parametriv na pozhezhnu bezpeku pirotekhnichnykh nitratno-tytanovykh sumishey v umovakh zovnishnikh termichnykh diy* [Patterns of influence of technological parameters on fire safety of pyrotechnic nitrate-titanium mixtures under conditions of external thermal effects]. *International Scientific Journal "Internauka"*. 2020, no. 5/5798. URL: <http://www.inter-nauka.com> (in Ukrainian).

10. Motrichuk R.B., Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Kolinko S.O., Butenko T.I., Kyrychenko Ye.P. and Tsybulin V.V. *Zakonomirnosti vplyvu tekhnolohichnykh parametriv ta zovnishnikh chynnykiv na temperaturu ta sklad produktiv z-horyannya pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishey* [Patterns of influence of technological parameters and external factors on the temperature and composition of combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2020, no. 4, pp. 131–142. (in Ukrainian).

11. Zhartovskiy S., Titenko O., Kyrychenko O., Tyshchenko I., Motrichuk R. and 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, no. 1/10 (109), pp. 45–52.

12. Kyrychenko O.V. *Povysheniye effektivnosti pirotekhnicheskikh nitratosoderzhashchikh izdeliy v usloviyakh ikh primeneniya* [Increasing the efficiency of pyrotechnic nitrate-containing products under the conditions of their use]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2009, no. 2, pp. 89–94. (in Ukrainian).

13. Vashchenko V.A. *Fiziko-khimicheskiye svoystva alyuminiya, magniya, titana i tsirkoniya : trudy NII prikladnoy khimii* [Physico-chemical properties of aluminum, magnesium, titanium and zirconium : Proceedings of the Research Institute of Applied Chemistry]. Zagorsk, 1973, no. 8990, 36 p. (in Russian).

14. Vashchenko V.A. *Kineticheskiye kharakteristiki protsessov okisleniya, vosplamneniya i goreniya chastits alyuminiya, magniya, titana i tsirkoniya* [Kinetic characteristics of the processes of oxidation, ignition and combustion of particles of aluminum, magnesium, titanium and zirconium]. *Trudy NII prikladnoy khimii* [Proceedings of the Research Institute of Applied Chemistry]. Zagorsk, 1973, no. 8991, 35 p. (in Russian).

15. Vashchenko V.A. *Vosplamneniye chastits metallov v produktakh razlozheniya pirosovostavov* [Ignition of metal particles in the decomposition products of pyrochemical compositions]. *Trudy NII prikladnoy khimii* [Proceedings of the Research Institute of Applied Chemistry]. Zagorsk, 1974, no. 9130, 70 p. (in Russian).

16. Vashchenko V.A. *Vosplamneniye i goreniye odinoknykh chastits metallov v produktakh razlozheniya mnogokomponentnykh metallizirovannykh sistem* [Ignition and combustion of single metal particles in decomposition products of multicomponent metallized systems]. *Trudy NII prikladnoy khimii* [Proceedings of the Research Institute of Applied Chemistry]. Zagorsk, 1975, no. 10267, 54 p. (in Russian).

17. Vashchenko V.A. *Fiziko-khimicheskiye osnovy protsessa goreniya smesey nitrata natriya s magniyem, alyuminiyem, titanom i tsirkoniyem* [Physico-chemical foundations of the combustion process of mixtures of sodium nitrate with magnesium, aluminum, titanium and zirconium]. *Trudy NII prikladnoy khimii* [Proceedings of the Research Institute of Applied Chemistry]. Zagorsk, 1973, no. 8734, 34 p. (in Russian).

18. Vashchenko V.A. *Vosplamneniye i goreniye sovokupnosti chastits metallov v produktakh razlozheniya mnogokomponentnykh metallizirovannykh sistem* [Ignition and combustion of a set of metal particles in the decomposition products of multicomponent metallized systems]. *Trudy NII prikladnoy khimii* [Proceedings of the Research Institute of Applied Chemistry]. Zagorsk, 1975, no. 10763, 47 p. (in Russian).

19. Silin N.A., Vashchenko V.A., Kashporov L.Ya. et al. *Metallicheskiye goryuchiye geterogennykh kondensirovannykh sistem* [Metallic combustibles of heterogeneous condensed systems]. *Mashinostroyeniye* [Mechanical Engineering]. 1976, 320 p. (in Russian).

20. Vashchenko V.A. *Protsessy vosplamneniya pirotekhnicheskikh sostavov* [Processes of ignition of pyrotechnic compositions]. *Trudy NII prikladnoy khimii* [Proceedings of the Research Institute of Applied Chemistry]. Zagorsk, 1977, no. 11210, 12 p. (in Russian).

21. Vashchenko V.A. *Zakonomernosti goreniya mnogokomponentnykh metallizirovannykh sistem* [Combustion patterns of multicomponent metallized systems]. *Trudy NII prikladnoy khimii* [Proceedings of the Research Institute of Applied Chemistry]. Zagorsk, 1979, no. 11667, 16 p. (in Russian).

22. Silin N.A., Vashchenko V.A. and Kashporov L.Ya. *Goreniye metallizirovannykh geterogennykh kondensirovannykh sistem*. [Combustion of metallized heterogeneous condensed systems]. *Mashinostroyeniye* [Mechanical Engineering]. 1982, 232 p. (in Russian).

23. Vashchenko V.A. *Vysokotemperaturnyye tekhnologicheskiye protsessy vzaimodeystviya kontsentrirrovannykh istochnikov energii s materialami* [High-temperature technological processes of interaction of concentrated energy sources with materials]. Monograph, 1996, 408 p. (in Russian).

24. Pokhil V.P., Belyaev A.F., Frolov Yu.V., Logachev V.S. and Korotkov A.I. *Goreniye poroshkoobraznykh metallov v aktivnykh sredakh* [Combustion of powdered metals in active media]. *Nauka* [Science]. 1972, 294 p. (in Russian).

25. Silin N.A., Vashchenko V.A., Zaripov N.I. et al. *Okisliteli geterogennykh kondensirovannykh sistem* [Oxidizers of heterogeneous condensed systems]. *Mashinostroyeniye* [Mechanical Engineering]. 1978, 456 p. (in Russian).

26. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Akinshin V.D. and Tsybulin V.V. *Spalakhuvannya chastynok alyuminiyu v produktakh rozkladannya nitratomisnykh oksylyuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pirotekhnichnykh sumishey pry pidvyshchennykh temperaturakh nahrivu* [Ignition of aluminum particles in decomposition products of nitrate-containing oxidizers and organic substances of pyrotechnic mixtures at elevated heating temperatures]. *Pozhezhna bezpeka : teoriya i praktyka : zbirnyk naukovykh prats'* [Fire Safety : Theory and Practice : collection of scientific works]. Cherkasy APB named after Heroes of Chernobyl, 2011, no. 9. (in Ukrainian).

27. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Tsybulin V.V. and Tyshchenko S.O. *Vysokotemperaturne oksylennya mahniyu v produktakh rozkladannya nitratomisnykh oksylyuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pirotekhnichnykh sumishey pry zovnishnikh termovplyvakh* [High-temperature oxidation of magnesium in decomposition products of nitrate-containing oxidizers and organic substances of pyrotechnic mixtures under external thermal influences]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2011, no. 3, pp. 115–120. (in Ukrainian).

28. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A. and Tsybulin V.V. *Termichne rozkladannya dobavok orhanichnykh rehovyn v pirotekhnichnykh sumishakh v umovakh zovnishnikh termovplyviv* [Thermal decomposition of additives of organic substances in pyrotechnic mixtures under conditions of external thermal influences]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2011, no. 4, pp. 116–120. (in Ukrainian).

29. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Tsybulin V.V., and Tupytskyi V.M. *Termichne rozkladannya nitratomisnykh oksylyuvachiv pirotekhnichnykh sumishey v umovakh zovnishnikh termovplyviv* [Thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers of pyrotechnic mixtures under conditions of external thermal influences]. *Naukovyy visnyk UkrNDIPB* [Scientific Bulletin of UkrNDIPB]. 2011, no. 2 (24), pp. 71–79. (in Ukrainian).

30. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Tsybulin V.V. and Tupytskyi V.M. *Vysokotemperaturne oksylennya alyuminiyu v produktakh rozkladannya oksylyuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pirotekhnichnykh sumishey v umovakh zovnishn'oho nahrivu*. [High-temperature oxidation of aluminum in decomposition products of oxidants and organic substances of pyrotechnic mixtures under external heating conditions]. *Naukovyy visnyk UkrNDIPB* [Scientific Bulletin of UkrNDIPB]. 2011, no. 1 (24), pp. 47–53. (in Ukrainian).

31. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Tsybulin V.V. and Tupytskyi V.M. *Spalakhuvannya chastynok tsyrkoniyu v produktakh termichnoho rozkladannya nitratomisnykh oksylyuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pirotekhnichnykh sumishey pry pidvyshchennykh temperaturakh nahrivu* [Ignition of zirconium particles in products of thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers and organic substances of pyrotechnic mixtures at elevated heating temperatures]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2012, no. 1, pp. 31–38. (in Ukrainian).

32. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Tsybulin V.V. and Tupytskyi V.M. *Vysokotemperaturne oksylennya metalichnykh pal'nykh v produktakh rozkladannya oksylyuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pirotekhnichnykh sumishey v umovakh zovnishn'oho nahrivu* [High-temperature oxidation of metallic fuels in decomposition products of oxidants and organic substances of pyrotechnic mixtures under external heating conditions]. *Naukovyy visnyk UkrNDIPB* [Scientific Bulletin of UkrNDIPB]. 2011, no. 3 (24). (in Ukrainian).

33. Kyrychenko O.V. *Vysokotemperaturne oksylennya tsyrkoniyu v produktakh rozkladannya nitratomisnykh oksylyuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pirotekhnichnykh sumishey pry zovnishn'omu nahrivi* [High-temperature oxidation of zirconium in decomposition products of nitrate-containing oxidizers and organic substances of pyrotechnic mixtures under external heating]. *Pozhezhna bezpeka : teoriya i praktyka : zbirnyk naukovykh prats'* [Fire Safety: Theory and Practice : collection of scientific works]. Cherkasy : APB named after Heroes of Chernobyl, 2012, no. 10. (in Ukrainian).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ващенко В. А., Кириченко О. В., Лега Ю. Г., Заика П. И., Яценко И. В., Цыбулин В. В. Процессы горения металлизированных конденсированных систем. *Наукова думка*. 2008. 745 с.

2. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Тищенко С. О., Цибулін В. В. Визначення допустимих режимів нагріву піротехнічних сумішей при їх експлуатації. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2018. № 2. С. 5–11.

3. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Барановський О. С., Цибулін В. В. Визначення вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згоряння піротехнічних нітратно-металевих сумішей при підвищених зовнішніх тисках. *Наука та виробництво : міжвуз. темат. зб. наук. пр.* 2018. Вип. 19. С. 323–332.

4. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А., Колінько С. О. Дослідження спалахування та горіння частинок алюмінієво-магнієвих сплавів у продуктах розкладання твердих піротехнічних палив. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2019. № 2 (8). С. 81–85.

5. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А., Колінько С. О., Цибулін В. В. Дослідження впливу міцності зарядів піротехнічних нітратнометалевих сумішей на пожежну безпеку виробів на їх основі. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2019. № 3. С. 56–67.

6. Кириченко О. В., Мотрічук Р. Б., Діброва О. С., Мельник В. П., Ващенко В. А., Бутенко Т. І. Дослідження спалахування та горіння частинок металевого пального в продуктах розкладання нітратовмісних окиснювачів та органічних речовин при зовнішніх термічних впливах. *Сборник научных трудов : Проблемы пожарной безопасности*. 2020. № 47. С. 50–59.

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

8. Dibrova O., Kyrychenko O., Motrychuk R., Tomenko M., Melnyk V. Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions. *Technology audit and production reserves (ISSN 2664-9969)*. 2020. № 1/1(51). Pp. 44–49.

9. Діброва О. С., Кириченко О. В., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А. Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. *International Scientific Journal "Internauka"*. 2020. № 5/5798. URL: <https://www.inter-nauka.com>

10. Мотрічук Р. Б., Кириченко О. В., Ващенко В. А., Колінько С. О., Бутенко Т. І., Кириченко С. 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.

11. Zhartovskiy 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.

12. Кириченко О. В. Повышение эффективности пиротехнических нитратосодержащих изделий в условиях их применения. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2009. № 2. С. 89–94.

13. Ващенко В. А. Физико-химические свойства алюминия, магния, титана и циркония. *Труды НИИ прикладной химии*. Загорск, 1973. № 8990. 36 с.

14. Ващенко В. А. Кинетические характеристики процессов окисления, воспламенения и горения частиц алюминия, магния, титана и циркония. *Труды НИИ прикладной химии*. Загорск, 1973. № 8991. 35 с.

15. Ващенко В. А. Воспламенение частиц металлов в продуктах разложения пиросоставов. *Труды НИИ прикладной химии*. Загорск, 1974. № 9130. 70 с.

16. Ващенко В. А. Воспламенение и горение одиночных частиц металлов в продуктах разложения многокомпонентных металлизированных систем. *Труды НИИ прикладной химии*. Загорск, 1975. № 10267. 54 с.

17. Ващенко В. А. Физико-химические основы процесса горения смесей нитрата натрия с магнием, алюминием, титаном и цирконием. *Труды НИИ прикладной химии*. Загорск, 1973. № 8734. 34 с.

18. Ващенко В. А. Воспламенение и горение совокупности частиц металлов в продуктах разложения многокомпонентных металлизированных систем. *Труды НИИ прикладной химии*. Загорск, 1975. № 10763. 47 с.

19. Силин Н. А., Ващенко В. А., Кашпоров Л. Я. и др. Металлические горючие гетерогенных конденсированных систем. *Машиностроение*. 1976. 320 с.

20. Ващенко В. А. Процессы воспламенения пиротехнических составов. *Труды НИИ прикладной химии*. Загорск, 1977. № 11210. 12 с.

21. Ващенко В. А. Закономерности горения многокомпонентных металлизированных систем. *Труды НИИ прикладной химии*. Загорск, 1979. № 11667. 16 с.

22. Силин Н. А., Ващенко В. А., Кашпоров Л. Я. Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем. *Машиностроение*. 1982. 232 с.

23. Ващенко В. А. Высокотемпературные технологические процессы взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами : монография. 1996. 408 с.

24. Похил В. П., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Логачев В. С., Коротков А. И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. *Наука*. 1972. 294 с.

25. Силин Н. А., Ващенко В. А., Зарипов Н. И. и др. Окислители гетерогенных конденсированных систем. *Машиностроение*. 1978. 456 с.

26. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Акіньшин В. Д., Цибулін В. В. Спалахування частинок алюмінію в продуктах розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при підвищених температурах нагріву. *Пожежна безпека : теорія і практика : зб. наук. пр.* Черкаси : АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2011. № 9.

27. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тищенко С. О. Високотемпературне окислення магнію в продуктах розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при зовнішніх термовпливах. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2011. № 3. С. 115–120.

28. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В. Термічне розкладання добавок органічних речовин в піротехнічних сумішах в умовах зовнішніх термовпливів. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2011. № 4. С. 116–120.

29. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тупицький В. М. Термічне розкладання нітратовмісних окислювачів піротехнічних сумішей в умовах зовнішніх термовпливів. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2011. № 2 (24). С. 71–79.

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

31. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тупицький В. М. Спалахування частинок цирконію в продуктах термічного розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при підвищених температурах нагріву. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2012. № 1. С. 31–38.

32. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тупицький В. М. Високотемпературне окислення металічних палив в продуктах розкладання окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей в умовах зовнішнього нагріву. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2011. № 3 (24).

33. Кириченко О. В. Високотемпературне окислення цирконію в продуктах розкладання нітратовмісних окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей при зовнішньому нагріві. *Пожежна безпека: теорія і практика : зб. наук. пр. Черкаси : АПБ ім. Героїв Чорнобиля*, 2012. № 10.

Надійшла до редакції: 15.02.2024.