



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.01>

*В. М. Баланюк, В. С. Мирошкін, Н. І. Гузар, В. С. Пикус, О. І. Гірський*  
*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,*  
*м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0853-4229> – В. М. Баланюк  
<https://orcid.org/0000-0003-3907-6945> – В. С. Мирошкін  
<https://orcid.org/0009-0003-7189-6545> – Н. І. Гузар  
<https://orcid.org/0000-0002-8850-9068> – В. С. Пикус  
<https://orcid.org/0000-0001-6225-0601> – О. І. Гірський  
✉ [bagr33@ukr.net](mailto:bagr33@ukr.net)

## ЧИННИКИ ВПЛИВУ НА ШВИДКІСТЬ ГОРІННЯ СПОЛУК, ІЗ ЯКИХ УТВОРЮЮТЬСЯ ВОГНЕГАСНІ АЕРОЗОЛІ

У статті розглядається актуальне питання впливу різних чинників на швидкість горіння вогнегасних аерозолеутворювальних сполук (АУС). Аерозольні засоби пожежогасіння набувають усе більшої популярності завдяки своїй ефективності, низьким вогнегасним концентраціям та екологічній безпеці. Однак для їх ефективного застосування необхідно розуміти й контролювати фактори, що впливають на швидкість горіння АУС та утворення вогнегасного аерозолію.

Виявлення й аналіз чинників, що впливають на швидкість горіння АУС, з метою оптимізації їх складу й підвищення ефективності гасіння пожеж.

У роботі використано метод наукового аналізу та синтезу, а також експериментальний метод дослідження.

Визначено основні чинники, що впливають на швидкість горіння АУС, хімічний склад і співвідношення компонентів АУС (паливо, окисник, каталізатори, добавки), геометричні параметри заряду АУС (наявність каналів, отворів), фізичні властивості компонентів (температура плавлення, молекулярна маса), наявність внутрішньо зв'язаного оксигену в молекулярній будові палива. Установлено, що для збільшення швидкості горіння АУС необхідно використовувати термічно нестійкі горючі речовини (каучуки, ідитол, сахарозу, епоксидну смолу), оптимальне співвідношення окисників (нітрат калію, хлорат калію, перхлорат калію) і каталітичні добавки. Показано, що забезпечення максимальної площі горіння АУС і використання складної геометричної конструкції заряду сприяють збільшенню швидкості утворення вогнегасного аерозолію.

Швидкість горіння АУС є ключовим фактором, що визначає ефективність гасіння пожеж.

Для досягнення високої швидкості горіння необхідно оптимізувати склад АУС, урахувавши хімічні й фізичні властивості компонентів, а також геометричні параметри заряду.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на детальне вивчення впливу кожного з чинників на швидкість горіння АУС і розроблення нових ефективних складів аерозолеутворювальних сполук.

**Ключові слова:** вогнегасні аерозолеутворювальні сполуки, швидкість горіння, паливо, окисник, каталізатор, геометричні параметри, вогнегасна ефективність.

## **FACTORS INFLUENCING THE BURNING RATE OF COMPOUNDS FROM WHICH FIRE EXTINGUISHING AEROSOLS ARE FORMED**

The article deals with the topical issue of the influence of various factors on the combustion rate of fire extinguishing aerosol compounds (AFC). Aerosol fire extinguishing agents are becoming increasingly popular due to their efficiency, low fire extinguishing concentrations and environmental safety. However, for their effective use, it is necessary to understand and control the factors that affect the burning rate of AFC and the formation of fire extinguishing aerosol.

To identify and analyse the factors affecting the burning rate of AUS in order to optimise their composition and increase the efficiency of fire extinguishing.

The method of scientific analysis and synthesis, as well as the experimental method of research were used in the work.

The main factors influencing the burning rate of AFC were determined. The chemical composition and ratio of the components of the AFC (fuel, oxidant, catalysts, additives). Geometric parameters of the AFC charge (presence of channels, holes). Physical properties of the components (melting point, molecular weight). The presence of internally bound oxygen in the molecular structure of the fuel. It has been established that to increase the combustion rate of AFC, it is necessary to use thermally unstable combustibles (rubbers, iditol, sucrose, epoxy resin), the optimal ratio of oxidants (potassium nitrate, potassium chlorate, potassium perchlorate) and catalytic additives. It is shown that ensuring the maximum combustion area of the AFC and the use of a complex geometric charge design contribute to an increase in the rate of fire extinguishing aerosol formation.

The combustion rate of AFC is a key factor determining the effectiveness of fire extinguishing.

To achieve a high combustion rate, it is necessary to optimise the composition of the AFC, taking into account the chemical and physical properties of the components, as well as the geometric parameters of the charge.

Further research should be aimed at a detailed study of the influence of each of the factors on the burning rate of the AFC and the development of new effective compositions of aerosol-forming compounds.

**Key words:** fire extinguishing aerosol-forming compounds, combustion rate, fuel, oxidant, catalyst, geometric parameters, fire extinguishing efficiency.

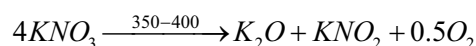
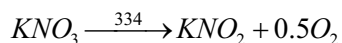
**Постановка проблеми.** Відомо, що останнім часом у сфері пожежогасіння широкого застосування набули вогнегасні аерозолеутворювальні сполуки (далі – АУС). Вони мають певні переваги [1–4], найважливіші з яких такі: вогнегасна концентрація аерозолу, яку необхідно створити в осередку пожежі, є близько 5 разів меншою за необхідну концентрацію для гасіння порошковими засобами, для зберігання аерозолеутворювальних зарядів не потрібно посудин під тиском, твердопаливний аерозолеутворювальний заряд і вогнегасний аерозоль, що утворюється, екологічно безпечні (озононеруйнівні) та нетоксичні. На відміну від порошоків, аерозоль створює захист від повторного виникнення дифузійного горіння протягом 30 хвилин, собівартість протипожежного захисту 1 м<sup>3</sup> вогнегасними аерозолями є найменшою порівняно з іншими засобами об'ємного пожежогасіння – галоїдовуглеводнями, газовим і порошковим пожежогасінням [5]. З огляду на це, аерозольні засоби пожежогасіння можна вважати універсальними засобами об'ємного пожежогасіння, але вони також характеризуються певними

недоліками. Під час утворення вогнегасного аерозолу спостерігається утворення форсу полум'я, що набуває значних розмірів, а температура його сягає 1000 °С, вогнегасна концентрація більшості вогнегасних аерозолів лежить у межах від 10 до 100 г/м<sup>3</sup> при різних компонентних рецептурах АУС. Деякі АУС володіють високою температурою кінцевого продукту – аерозолу. Крім цього, у продуктах горіння АУС спостерігається наявність продуктів неповного окислення в кількостях, які можуть бути небезпечними для людини. Для АУС спостерігається така закономірність: АУС із високою температурою горіння характеризуються низькою вогнегасною концентрацією порядку 25–45 г/м<sup>3</sup>, утворенням форсу полум'я та високою температурою вогнегасного аерозолу, генератори на базі таких АУС обладнані додатковими блоками охолодження, що знижують як температуру аерозолу, так і вогнегасну ефективність аерозолу. Для генераторів вогнегасного аерозолу на базі АУС, до склад якого внесені охолоджувачі, спостерігається інша закономірність: температура горіння АУС є низькою за рахунок

наявності в АУС фізичних охолоджувачів – КСl,  $K_2CO_3$ ,  $K_2SO_4$ , силікатів, цементу. Під час горіння такого АУС збільшується вогнегасна концентрація аерозолу, а в газову фазу потрапляє більша кількість токсичних продуктів горіння. Швидкість згорання зазначених АУС становить близько від 10 до 100 г/с. При цьому, відповідно, заряд АУС може згоріти в проміжку часу від 20 до 90 секунд залежно від конфігурації АУС і його маси. Як видно з результатів досліджень авторів [6], швидкість горіння АУС залежить від таких чинників, як хімічний склад рецептури АУС, геометричний розмір АУС, забезпечення максимальної площі горіння АУС тощо. Швидко утворення вогнегасного аерозолу забезпечує значне зменшення часу гасіння й ліквідації пожежі. Бажаний час утворення аерозолу для ефективного та швидкого гасіння може становити до 10 секунд.

**Виклад основного матеріалу.** Щоб правильно спрогнозувати пошук оптимальних складів АУС із великою швидкістю горіння й одержати, відповідно, ефективні вогнегасні аерозолі з них, необхідно розглянути можливий фізико-хімічний механізм дії аерозолів і виявити найважливіші фактори, що впливають на їх вогнегасну ефективність. Відомо [7], що для збільшення швидкості горіння як паливо в АУС використовують термічно нестійкі горючі речовини, такі як каучуки, ідітол, сахароза, епоксидна смола. Якщо розглянути властивості сахарози як палива, то сахароза ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ) у складі води не має й тому не потребує затрат тепла на її видалення, температура її плавлення 160 °С із розкладанням [8]. Епоксидна смола має більшу молекулярну масу – близько 390 г/моль, ніж новолачна смола – ідітол, як наслідок, найнижчу ефективність завдяки зменшенню ступеня перетворення АУС в аерозоль. Сподівання на те, що фрагменти недопалу палива (особливо ідітолу й епоксидно-діанової смоли) можуть позитивно впливати на вогнегасну ефективність аерозолів, як видно, не підтверджується. Як указує автор [9], основною умовою вогнегасної ефективності аерозолів є максимально повне перетворення палива в  $CO_2$  і  $H_2O$  та твердофазні аерозолі. Таким чином, необхідно зазначити, що для збільшення швидкості горіння АУС горючі речовини повинні максимально швидко розкладатися для підготовки до їх згорання [10]. Важливим чинником є наявність у молекулярній будові палива внутрішньозв'язаного кисену, який забезпечує більш швидку термодеструкцію та згорання горючої речовини. Потреба кисню для згорання вуглеводнів є меншою, ніж для інших горючих речовин [11]. На користь того, що умовою високої ефективності є повнота згорання палива, свідчать

і результати дослідів, проведених на рецептурах АУС, у яких наявний додатково активний окисник  $KClO_4$ , що різко збільшує швидкість перетворення АУС в аерозоль і, відповідно, до зростання вогнегасної ефективності порівняно з АУС на основі  $KNO_3$  [12]. Також, як указує автор [13], особливо цікавим є той факт, що зразки АУС, де окисником є тільки  $KClO_4$ , проявляють вогнегасну ефективність, значно нижчу, ніж із  $KNO_3$  [10].  $KNO_3$  розкладається, відповідно, на молекулярний кисен, нітрид та оксид калію при температурах 334, 350, 400 °С.



Відомо [14], що в рецептурах АУС, у яких міститься  $KNO_3$  та  $KClO_4$ , проявляється максимальна вогнегасна ефективність, а також найвищий ступінь перетворення цих компонентів у кінцевий аерозоль. Це можна пояснити ефектом синергізму компонентів аерозолу – КСl та  $K_2O$  або  $K_2CO_3$  або (і) КОН [15]. Якщо розглянути процес горіння на прикладі сахарози, то необхідно зазначити, що вогнегасна концентрація для такого АУС становить близько 10 г/м<sup>3</sup>, причому збільшення вмісту  $KClO_4$  в складі АУС призводить до деякого зменшення вогнегасної концентрації. І при зменшенні концентрації до  $KNO_3$  до 60 г і збільшенні концентрації перхлорату калію до 12 г вогнегасна концентрація зменшується до 10,1 г/м<sup>3</sup> (таблиця 1).

Таблиця 1

**Залежність вогнегасної ефективності від співвідношення окислювачів для палива сахарози**

Уміст компонентів АУС, грамів			$C_{в},$ г/м <sup>3</sup>
окисники		паливо	
$KNO_3$	$KClO_4$	сахароза	
70	2	30	14,5
65	7	30	12,5
60	12	30	10,8
55	15	30	10,1

З огляду на вищесказане, необхідно зазначити, що з урахуванням параметрів горіння АУС як окисники необхідно використати нітрат калію, хлорат калію, перхлорат калію або їх суміші. Що стосується сумішей на основі нітрату калію, то необхідно зазначити, що нітрат калію розкладається з утворення проміжних продуктів, які можуть активно вступати у взаємодію з горючими елементами, такими як деревне вугілля, ідітол, епоксидна смола й сахароза.

Щодо характеристик кожного із цих палив, то необхідно зазначити, що майже всі вони легко розкладаються з утворенням готових до швидкого згорання компонентів. При цьому відбувається утворення фронту полум'я над поверхнею зразка та перехід продуктів горіння в аерозоль. При цьому перехід продуктів горіння в аерозоль відбувається внаслідок конденсації солей калію, водяної пари, вуглекислого газу й азоту. При цьому більша кількість газової фази буде утворюватися внаслідок збільшення концентрації горючого в АУС у невеликій перевазі над стехіометричною концентрацією, що є ще одним шляхом збільшення швидкості горіння через зміну фізичного чинника, а саме тиску.

Також хочемо зазначити, що збільшення швидкості горіння АУС буде працювати в разі збільшення тиску всередині генератора, що буде тягнути за собою збільшення швидкості горіння заряду АУС, що є ще одним перспективним шляхом збільшення швидкості горіння АУС. Збільшення кількості палива, дещо більше за стехіометричну концентрацію, як зазначає автор [8], призведе до утворення більшого факела, а також підвищення сумарної кількості гарячих продуктів, тобто більш нагрітого аерозолю, на охолодження якого витратиметься більше часу. У цьому випадку нагрітий аерозоль буде накопичуватися у верхній частині приміщення, тобто буде створюватися градієнт концентрацій аерозолю за висотою. Як зазначає автор [8], складання рецептур АУС із надлишком палива ставить вимоги й до конструкції генераторів, а саме необхідності забезпечення контакту утворюваного аерозолю з киснем повітря. У протилежному разі не буде забезпечено утворення додаткового тепла, необхідного для повного розкладу  $\text{KNO}_3$ , що, у свою чергу, змістить перебіг реакцій горіння в бік утворення продуктів розкладу  $\text{CO}$  та  $\text{KNO}_2$ . При цьому, зважаючи на описане, збільшення тиску внаслідок збільшення об'єму газоподібних продуктів може становити від 60 атмосфер і більше залежно від перерізу отворів вихідних сопел генератора вогнегасного аерозолю. При такому збільшенні тиску теоретичне зростання швидкості горіння АУС може становити декілька сотень разів залежно від збільшення концентрації кисню.

Виходячи з вищенаведеного, можемо сформулювати умови, які б забезпечували максимальну швидкість горіння АУС, а саме:

1) стехіометричне, або з надлишком палива співвідношення компонентів у суміші. Оптимальне співвідношення компонентів горючого в суміші (якщо їх є більше);

2) наявність каталітичних добавок, які забезпечують збільшення швидкості горіння АУС;

складна геометрична конструкція заряду АУС, яка передбачає наявність каналів, отворів в АУС.

**Висновки.** Таким чином, для збільшення швидкості горіння АУС необхідно дослідити низку чинників, які можуть впливати на швидкість горіння АУС, а саме: тип і співвідношення палива, тип і співвідношення окисника, тип і кількість каталізаторів, які необхідно додати до рецептури АУС, цільові добавки, які підвищують вогнегасну ефективність та експлуатаційні показники, а також геометричні параметри заряду АУС.

### Список літератури

1. Meenakshi Rohilla, Amit Saxena, Prem chand, Braham Prakash, Kavita Devi, Rajesh Kumar Tanwar, Rajiv Narangl & Yogesh Kumar Tyagi Graphene oxide-enhanced aerosol forming composites: A study for fire extinguishing applications *Indian Journal of Chemical Technology*. 2024. Vol. 31. P. 44–56. DOI: 10.56042/ijct.v31i1.4596.
2. Condensed Aerosol Based Fire Extinguishing System Covering Versatile Applications: A Review / R. Meenakshi et al. *Fire Technology*. 2022. Vol. 58. P. 327–351. DOI: 10.1007/s10694-021-01148-4.
3. Zhang X., Ismail M.H.S., Hee C. Hot aerosol fire extinguishing agents and the associated technologies: a review. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2015. Vol. 32. P. 707–724.
4. Piotr I., Artur K. Mechanism of fire-extinguishing aerosol's action. *Safety & Fire Technology*. 2017. Vol. 46 (2). P. 56–71.
5. Порівняння вогнегасних речовин для гасіння пожеж легкозаймистих та горючих рідин / Баланюк В. М., Мирошкін В. С., Копистинський Ю. О. та інші. *Пожежна безпека*. 2022. № 41. С. 12–19. DOI: 10.32447/20786662.41.2022.02.
6. Study of Fire-extinguishing Efficiency of Environmentally Friendly Binary Aerosol-nitrogen Mixtures / V. Balanyuk et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 3. № 10. P. 4–11. Doi: 10.15587/1729-4061.2016.72399.
7. Balanyuk V., Kovalyshyn V., Kozyar N. Effect of ecologically safe gas-aerosol mixtures on the velocity of explosive combustion of n-heptane. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 4 (10 (88)). P. 12–19. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108427>.
8. Баланюк В. М. Удосконалення аерозолевої вогнегасної речовини на основі солей калію та обґрунтування умов її застосування : дис. ... канд. тех. наук : 21.06.02. Львів, 2006, 172 с.
9. Sonkar R. Condensed aerosol fire suppression system. *Fire Engineer*. 2017. № 42.2. P. 8–10.
10. Бондаренко С. М. Розробка генераторів вогнегасного аерозолю із покращеними характеристиками : дис. ... канд. тех. наук : 21.06.02. Харків, 2004. 250 с.
11. Перебіг окремих внутрішніх процесів у вогнегасних аерозолях під час гасіння дифузійного полум'я/



В. М. Баланюк, Ю. О. Копистинський, О. І. Лавренюк. *Науковий вісник УкрНДІПБ. Серія «Технічні науки»*. Київ, 2008. № 1 (17). С. 155–159.

12. Rohilla M., Saxena A., Tyagi Y. K. Factors affecting the burn rate and combustion temperature of fire-extinguishing aerosol-forming composite material. *Journal of Materials Research*. 2023. № 38(3). P. 789–798.

13. Two-stage aerosol formation in low-temperature combustion / O. El Hajj, K. Atwi, Z. Cheng et al. *Fuel*. 2021. № 304. P. 121322.

14. Quantifying the CO and CO<sub>2</sub> Mole Fraction in the Plume of an Aerosol-Based Fire Extinguishing Agent Using 4560 nm and 4320 nm QCLs A. Roy, R. S. Chawhan, R. Patel et al. *IEEE Sensors Journal*. 2019. № 19 (21). P. 9728–9735.

15. Improving strontium nitrate-based aerosol by magnesium powder / Z. Chen-guang, W. Jun, X. Wan-Xing et al. *Fire Technol*. 2014. № 51. P. 97–107. <https://doi.org/10.1007/s10694-013-0361-6>.

### References

1. Meenakshi, Rohilla, Amit, Saxena, Prem, chand, Braham, Prakash, Kavita. Devi, Rajesh. Kumar, Tanwar, Rajiv, Narangl & Yogesh Kumar (2024). Tyagi Graphene oxide-enhanced aerosol forming composites: A study for fire extinguishing applications *Indian Journal of Chemical Technology* Vol. 31, January 2024, pp. 44–56. DOI: 10.56042/ijct.v31i1.4596 [in English].

2. Meenakshi, R., Amit, S., Yogesh, K., Inderpal, S., Kumar, T., Rajiv, N. (2022). Condensed Aerosol Based Fire Extinguishing System Covering Versatile Applications: A Review. *Fire Technology*. 2022. Vol. 58, P. 327–351. DOI: 10.1007/s10694-021-01148-4 [in English].

3. Zhang, X., Ismail, M.H.S., & Hee, C. (2015). Hot aerosol fire extinguishing agents and the associated technologies: a review. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 32, 707–724 [in English].

4. Piotr, I., & Artur, K. (2017). Mechanism of fire-extinguishing aerosol's action. *Safety & Fire Technology*, 46 (2), 56–71 [in English].

5. Balaniuk V. M., Myroshkin V. S., Kopystynskyi Yu. O., Hirskyi O. I., Harasymiuk O. I. (2022). Porivniannia vohnehasnykh rehovyn dlia hasinnia pozhezh lehkozaimystykh ta horiuchykh ridyn. [Comparison of extinguishing agents for extinguishing fires of flammable and combustible liquids]. *Pozhezhna bezpeka*. Fire safety. № 41. С. 12–19. DOI: 10.32447/20786662.41.2022.02 [in Ukrainian].

6. Balanyuk, V. M. (2016). Study of Fire-extinguishing Efficiency of Environmentally Friendly Binary Aerosol-nitrogen Mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 10, pp. 4–11, doi: 10.15587/1729-4061.2016.72399 [in English].

7. Balanyuk, V., Kovalishin, V., & Kozyar, N. (2017). Effect of ecologically safe gas-aerosol mixtures on the velocity of explosive combustion of n-heptane. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (10 (88)), 12–19. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108427> [in English].

8. Balaniuk V. M. (2006). Udoskonalennia aerezolevoi vohnehasnoi rehovyny na osnovi solei kaliuu ta obhruntuvannia umov yii zastosuvannia [Improvement of an aerosol fire extinguishing agent based on potassium salts and substantiation of its application conditions] : dys. kand. tekhn. nauk 21.06.02. Lviv, 172 s. [in Ukrainian].

9. Sonkar, Rahul. (2017). Condensed aerosol fire suppression system. *Fire Engineer* 42.2 (2017): 8–10 [in English].

10. Bondarenko, S. M. (2004). Rozrobka heneratoriv vohnehasiachoho aerezoliu iz pokrashchenymy kharakterystykamy [Development of fire extinguishing aerosol generators with improved characteristics]. Rukopys : dys. kand. tekhn. nauk : 21.06.02. Kharkiv, 250 p. [in Ukrainian].

11. Balaniuk, V. M., Kopystynskyi, Yu. O., Lavreniuk, O. I., & Zhurbynskyi, D. A. (2008). Perebih okremykh vnutrishnikh protsesiv u vohnehasnykh aerezoliakh pid chas hasinnia dyfuziinoho polumia. [The course of some internal processes in fire extinguishing aerosols during extinguishing of diffusion flames.] *Naukovyi visnyk UkrNDIPB* [Scientific Bulletin of UkrNDIPB.] *Tekhnichni nauky*. Kyiv. № 1 (17). P. 155–159 [in Ukrainian].

12. Rohilla, M., Saxena, A., & Tyagi, Y. K. (2023). Factors affecting the burn rate and combustion temperature of fire-extinguishing aerosol-forming composite material. *Journal of Materials Research*, 38 (3), 789–798 [in English].

13. El Hajj, O., Atwi, K., Cheng, Z., Koritzke, A. L., Christianson, M. G., Dewey, N. S., Saleh, R. (2021). Two-stage aerosol formation in low-temperature combustion. *Fuel*, 304, 121322 [in English].

14. Roy, A., Chawhan, R. S., Patel, R., Varadhara-jan, S., Tiwari, L. M., Chakraborty, A. L., & Srivastava, G. (2019). Quantifying the CO and CO<sub>2</sub> Mole Fraction in the Plume of an Aerosol-Based Fire Extinguishing Agent Using 4560 nm and 4320 nm QCLs. *IEEE Sensors Journal*, 19 (21), 9728–9735 [in English].

15. Chen-guang Z, Jun W, Wan-Xing X, Ting-Ting Z (2014). Improving strontium nitrate-based aerosol by magnesium powder. <https://doi.org/10.1007/s10694-013-0361-6> I Zhu, Cg., Wang, J., Xie, Wx. et al. Improving Strontium Nitrate-Based Extinguishing Aerosol by Magnesium Powder. *Fire Technol* 51, 97–107. <https://doi.org/10.1007/s10694-013-0361-6> [in English].

© В. М. Баланюк, В. С. Мирошкін, Н. І. Гузар, В. С. Пикус, О. І. Гірський, 2024.

### Оглядова стаття.

Надійшла до редакції 10.11.2024.

Прийнято до публікації 18.12.2024.