



*О. М. Тищенко<sup>1</sup>, І. Г. Маладика<sup>1</sup>, Є. О. Тищенко<sup>2</sup>, Д. О. Котляр<sup>2</sup>, М. П. Сорочич<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна,

<sup>2</sup>Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, Україна,

<sup>3</sup>Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7303-6360> – О. М. Тищенко

<https://orcid.org/0000-0001-8784-2814> – І. Г. Маладика

<https://orcid.org/0000-0003-3911-3291> – Є. О. Тищенко

<https://orcid.org/0000-0003-3851-2899> – Д. О. Котляр

<https://orcid.org/0009-0008-9490-6124> – М. П. Сорочич



[tyshchenkooleksandr56@gmail.com](mailto:tyshchenkooleksandr56@gmail.com)

## КОМБІНОВАНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ВОГНЕГАСНИХ ПОРОШКІВ ТА АЕРОЗОЛІВ ПЕРЕНОСНИМИ, СТАЦІОНАРНИМИ ТА АВТОМАТИЧНИМИ ЗАСОБАМИ ПОЖЕЖОГАСІННЯ

**Проблема.** Вирішення проблем протипожежного захисту та боротьби з пожежами в сучасних умовах набуває все більшої актуальності у зв'язку з технічним переозброєнням, модернізацією підприємств та виробництв, впровадженням технологій з використанням нових вибухо- та пожежонебезпечних речовин і матеріалів, що потребує більш ефективного і селективного застосування вогнегасних речовин для пожежогасіння.

**Мета.** Обґрунтування, вибір та застосування вогнегасних речовин на об'єктах критичної інфраструктури потребує врахування їх вогнегасної ефективності, нетоксичності та сумісності з основними елементами засобів життєзабезпечення. Забезпечення пожежної безпеки в таких умовах носить проблемний характер і потребує нових наукових досліджень.

**Методи дослідження.** З позицій сучасного трактування механізму гасіння полум'я порошками та аерозолями, а також теорії процесів горіння та ланцюгових реакцій найбільш перспективним способом підвищення їх вогнегасної спроможності є посилення їхніх інгібувальних властивостей. Для досягнення мети і вирішення поставлених проблем використовувались аналітичні та експериментальні методи досліджень. Підготовка і проведення досліджень здійснювалися на основі їх математичного планування та моделювання, а достовірність отриманих результатів підтверджувалася їх аналітичним статистичним обґрунтуванням із комп'ютерним програмним забезпеченням.

**Основні результати.** Розглянуто особливості виникнення та розвитку пожеж на об'єктах критичної інфраструктури. На основі аналізу результатів проведених досліджень обґрунтовано порядок вибору та застосування вогнегасних речовин для запобігання та ліквідації пожеж в результаті аварій технологічних процесів, апаратів, приміщень, будівель та споруд. Встановлені закономірності підвищення вогнегасної ефективності порошків в умовах зниження концентрації кисню дозволяють розширити можливості їх застосування в комбінованому пожежогасінні з інертними газами та генераторами вогнегасного аерозолію. Враховуючи наявність синергізму вогнегасної спільної дії порошків та аерозольних сполук пропонується їх послідовне комбіноване застосування для флегматизації та пожежогасіння в середовищах з високою концентрацією кисню.

**Висновки та конкретні пропозиції.** Отримані результати досліджень спрямовані на забезпечення більш високого рівня протипожежного захисту, як переносними, так і стаціонарними та автоматичними засобами пожежогасіння, що особливо важливо для розширення та покращення тактико-технічних дій підрозділів ДСНС України та добровольчих формувань в сучасних умовах. Для локалізації пожеж за максимально короткий проміжок часу при обмеженій кількості сил і засобів рекомендується застосовувати стаціонарні або переносні генератори вогнегасних аерозолів, а після зниження концентрації кисню в зоні горіння для ліквідації полум'яного горіння і тліючих осередків застосовувати порошки на основі бікарбонату натрію або їх бінарні суміші (50% на 50%) з порошками на основі хлориду калію. Лабораторні та полігонні дослідження показали, що бінарні суміші з порошків

на основі бікарбонату натрію і на основі хлориду калію при співвідношенні 1:1 (50% на 50%) мають значно кращу ефективність, ніж індивідуальні їх компоненти, для пожежогасіння в середовищах з підвищеним вмістом кисню.

**Ключові слова:** вогнегасні речовини (вода, інертні гази, порошки, аерозолі), концентрація кисню, об'єкти критичної інфраструктури, синергізм дії, флегматизатори та інгібітори процесу горіння.

*O. M. Tyshchenko<sup>1</sup>, I. H. Maladyka<sup>1</sup>, I. O. Tyshchenko<sup>2</sup>, D. O. Kotliar<sup>2</sup>, M. P. Sorochych<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine*

<sup>2</sup>*National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

<sup>3</sup>*Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

## COMBINED USE OF FIRE-EXTINGUISHING POWDERS AND AEROSOLS BY PORTABLE, STATIONARY, AND AUTOMATIC FIRE SUPPRESSION SYSTEMS

**Problem.** Solving the issues of fire protection and firefighting in modern conditions is becoming increasingly relevant due to technical re-equipment, modernization of enterprises and industries, and the introduction of technologies using new explosive and flammable substances and materials, which requires more efficient and selective application of fire-extinguishing agents for firefighting.

**Purpose.** The substantiation, selection, and application of fire-extinguishing agents at critical infrastructure facilities require consideration of their extinguishing efficiency, non-toxicity, and compatibility with the main elements of life-support systems. Ensuring fire safety under such conditions is problematic and requires new scientific research.

**Research methods.** From the perspective of the modern interpretation of flame extinguishment mechanisms by powders and aerosols, as well as the theory of combustion processes and chain reactions, the most promising way to enhance their fire-extinguishing capability is to strengthen their inhibiting properties. To achieve the objective and solve the stated problems, analytical and experimental research methods were used. The preparation and conduct of the research were carried out based on mathematical planning and modeling, and the reliability of the obtained results was confirmed through their analytical statistical substantiation using computer software.

**Results.** The features of fire occurrence and development at critical infrastructure facilities were considered. Based on the analysis of the research results, the procedure for selecting and applying fire-extinguishing agents for the prevention and suppression of fires resulting from accidents in technological processes, equipment, premises, buildings, and structures was substantiated. The identified patterns of increased fire-extinguishing efficiency of powders under conditions of reduced oxygen concentration make it possible to expand their application in combined firefighting with inert gases and aerosol fire extinguishing generators. Considering the presence of synergy in the combined fire-extinguishing action of powders and aerosol compounds, their sequential combined application is proposed for inerting and fire suppression in environments with high oxygen concentration.

**Conclusions and specific proposals.** The obtained research results are aimed at ensuring a higher level of fire protection using portable, stationary, and automatic firefighting systems, which is particularly important for expanding and improving the tactical and technical operations of units of the State Emergency Service of Ukraine (SES of Ukraine) and volunteer formations under modern conditions. For the rapid localization of fires within the shortest possible time and with limited forces and resources, it is recommended to use stationary or portable aerosol fire extinguishing generators, and after reducing the oxygen concentration in the combustion zone, to use sodium bicarbonate-based powders or their binary mixtures (50% to 50%) with potassium chloride-based powders to extinguish flaming combustion and smoldering sources. Laboratory and field studies have shown that binary mixtures of sodium bicarbonate-based powders and potassium chloride-based powders in a 1:1 ratio (50% to 50%) demonstrate significantly higher efficiency than their individual components for firefighting in environments with elevated oxygen content.

**Keywords:** fire-extinguishing agents (water, inert gases, powders, aerosols), oxygen concentration, critical infrastructure facilities, synergistic effect, combustion phlegmatizers and inhibitors.

### Вступ

Під час пожеж та аварій на підприємствах критичної інфраструктури при пошкодженні апаратів і трубопроводів, а також в результаті протікання самоплинних хімічних реакцій, в зоні пожежі може утворюватися збагачене киснем середовище. Останнім часом у світовій практиці широко використовуються різного роду технологічні процеси з приміщеннями або окремими відсіками чи камерами з атмосферою з високою концентрацією кисню: медичні та декопресійні барокамери, тренажери для цивільної та військової авіації, стенди для випробувань

авіаційних та ракетних двигунів, водолазні комплекси для підводних пошукових робіт та розмінувань, зарядні кисневі станції. Концентрація кисню в таких пристроях може бути в широких межах від 21% до 60%, а в окремих технологіях застосовується і чистий кисень.

Процес горіння в таких середовищах протікає швидкоплинно з високими температурами. В гомогенних газових сумішах дефлаграційне горіння переходить в детонацію, а негорючі речовини і матеріали в атмосферному повітрі стають горючими в середовищах, збагачених киснем.

Вирішення проблем протипожежного захисту та боротьби з пожежами в сучасних умовах набуває все більшої актуальності у зв'язку з технічним переозброєнням, модернізацією підприємств та виробництв, впровадженням технологій з використанням нових вибухо- та пожежонебезпечних речовин і матеріалів, що потребує більш ефективного і селективного застосування вогнегасних речовин для пожежогасіння. Висока спроможність швидко припиняти горіння та універсальний механізм вогнегасної дії порошків дозволяє використовувати їх як один із найбільш прийнятних і екологічно безпечних вогнегасних засобів, але більш ефективному і економічному їх застосуванню перешкоджає недостатнє вивчення особливостей їх вогнегасної дії в конкретних умовах пожеж, коли змінюється концентрація кисню в зоні горіння.

З позицій сучасного трактування механізму гасіння полум'я порошками, а також теорії процесів горіння та ланцюгових реакцій найбільш перспективним способом підвищення їх вогнегасної спроможності є посилення їхніх інгібувальних властивостей. Досягнути цього шляхом пошуку нових, більш ефективних інгібіторів проблематично у зв'язку з вичерпністю можливих сировинних компонентів та комплексом вимог до показників, яким повинні відповідати вогнегасні порошки. Тому новим і більш перспективним вбачається напрямок з одночасного використання двох і більше порошкових інгібіторів, неадитивність спільної дії яких повинна мати синергичний ефект у реальних умовах гасіння пожеж, коли змінюється концентрація кисню в газоповітряному середовищі зони горіння.

На особливу увагу заслуговує результат спільної участі різних за природою інгібіторів в умовах змінної концентрації кисню в реакційній суміші, якою є полум'я вуглеводнів. У таких умовах вогнегасна ефективність порошкової суміші може не змінюватися (це свідчить про наявність адитивного характеру спільної дії інгібіторів), а також посилюватися або знижуватися, що є проявом неадитивності їх спільної дії.

#### Мета та методи дослідження

Обґрунтування, вибір та застосування вогнегасних речовин на об'єктах критичної інфраструктури потребує врахування їх вогнегасної ефективності, нетоксичності та сумісності з основними елементами засобів життєзабезпечення. Забезпечення пожежної безпеки в таких умовах має проблемний характер і потребує нових наукових досліджень.

Для досягнення мети і вирішення поставлених проблем використовувались аналітичні та експериментальні методи

досліджень. Підготовка і проведення досліджень здійснювалися на основі їх математичного планування та моделювання, а достовірність отриманих результатів підтверджувалася їх аналітичним статистичним обґрунтуванням із комп'ютерним програмним забезпеченням.

#### Результати дослідження

Вітчизняні та зарубіжні дослідження [1, 2, 3, 7, 8] показують, що вода і водні розчини в середовищах з високою концентрацією кисню малоефективні, а об'ємне пожежогасіння інертними газами потребує хорошої герметизації апаратів, чого важко досягти для приміщень (особливо при аваріях).

Автори цієї статті в ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України та Черкаському державному технологічному університеті провели ряд лабораторних досліджень [3, 5] з визначення вогнегасної ефективності порошків та полігонні випробування на вогневому модулі [5, 6] з комбінованого застосування вогнегасних порошків та аерозольних генераторів для пожежогасіння в приміщеннях.

Результати проведених експериментів з дослідження вогнегасної ефективності порошків, що серійно випускались і мали відповідну назву (ПСБ-3, П-2АП і ПХ), а зараз мають назви типу **ВС** на основі бікарбонату натрію, типу **ABC** на основі фосфатів амонію та спеціальні порошки на основі калію хлориду, при гасінні газоповітряного полум'я зі змінним вмістом кисню показують, що їх ефективність значною мірою залежить від концентрації кисню в зоні горіння [3, 5, 6].

Результати лабораторних досліджень на установці з пальником Бунзена при фіксованій концентрації кисню в зоні горіння є максимально реальними з визначення механізму інгібувальної дії порошків на полум'я. Оскільки в зону горіння надходить і кисень з повітря навколишнього середовища, то його концентрацію наближено приймаємо однаковою в усіх дослідженнях, а залежності вогнегасної ефективності порошків визначаємо від співвідношення азоту ( $N_2$ ) до кисню ( $O_2$ ). В навколишньому природному середовищі це становить:

$$\frac{N_2}{O_2} = \frac{79\%}{21\%} \approx 3,76.$$

З об'єднаних графіків, наведених на рис. 1, чітко видно синхронність зміни вогнегасної ефективності усіх досліджених вогнегасних порошків при зміні концентрації кисню в горючому газоповітряному середовищі в діапазоні проведених досліджень при об'ємному співвідношенні азоту до кисню від 12 до 2,2 чисельних значень. З графіків (рис. 1) чітко видно і підтверджуються припущення, що усі

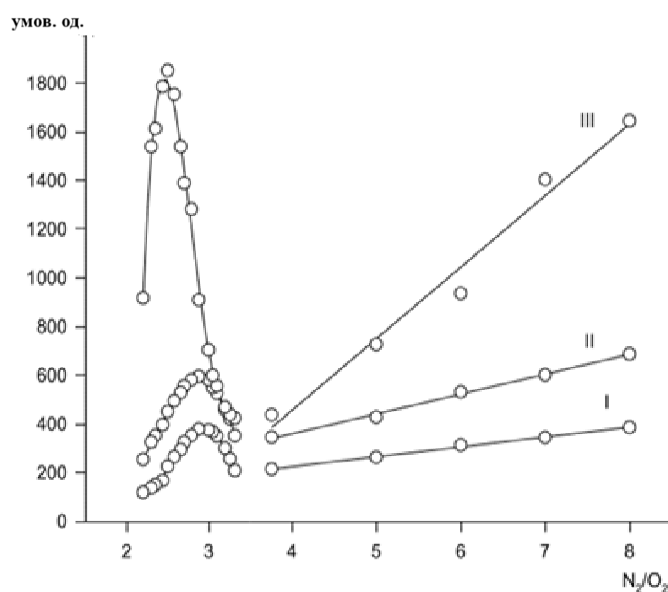
досліджені вогнегасні порошки стають ефективнішими в горючих середовищах при зниженні концентрації кисню (діапазон зміни співвідношення азоту до кисню від 3,76 до 12).

Заслужує на особливу увагу синхронність зміни вогнегасної ефективності порошків в газоповітряних середовищах з підвищенням вмістом кисню. Як видно з графіків, порошки ПСБ-3 і П-2АП можуть ефективно використовуватися для пожежогасіння в збагачених киснем середовищах у вузькому діапазоні концентрацій (при співвідношенні азоту до кисню від 3,76 до 2,44 чисельних значень, а порошок на основі калій хлориду ПХ – в більш ширшому діапазоні концентрацій).

Максимальна вогнегасна ефективність в кисневмісних середовищах порошків ПСБ-3 і П-2АП знаходиться при співвідношенні азоту до кисню в області 2,88 чисельних значень, тобто при концентрації кисню в газоповітряному середовищі в межах до 25,5-26%. Для порошку на основі калій хлориду ПХ максимальна вогнегасна ефективність в аналогічних умовах досягається при співвідношенні азоту до кисню в області 2,44

чисельних значень, тобто при концентрації кисню в газоповітряному середовищі в межах 25,5-29%.

Необхідно також відмітити, що вогнегасна ефективність порошків ПСБ-3 і П-2АП в діапазоні співвідношень азоту до кисню в газоповітряному середовищі від 3,76 до 2,88 збільшується в 1,5-1,8 раза, а для порошку ПХ в діапазоні співвідношень азоту до кисню від 3,76 до 2,44, відповідно, зростає в 4,5-4,7 раза. Не можна не виділити той факт, що після досягнення максимальної вогнегасної ефективності усіх досліджених порошків відбувається різке її зниження при подальшому збільшенні концентрації кисню. Так, порошки ПСБ-3 і П-2АП втрачають свою первинну вогнегасну ефективність після досягнення співвідношення азоту до кисню в області чисельних значень рівних 2,44, а порошок на основі калій хлориду за цих умов досягає своєї максимальної ефективності і при подальшому збільшенні концентрації кисню і газоповітряної суміші вогнегасна ефективність порошку ПХ різко знижується і ймовірно може досягти мінімальних величин в області значень співвідношення азоту до кисню, чисельно рівною 2-2,2.



**Рисунок 1** – Залежність вогнегасної ефективності вогнегасних порошків від об'ємного співвідношення азоту до кисню в горючому газоповітряному середовищі: I – ПСБ-3(BC); II – П-2АП(ABC-40); III – ПХ (спеціальні порошки на основі калій хлориду)

На основі вищенаведеного аналізу результатів досліджень динаміки зміни вогнегасної ефективності вогнегасних порошків: ПСБ-3, П-2АП і ПХ залежно від зміни концентрації кисню в повітряному середовищі і враховуючи досвід авторів [4, 5, 9], які досліджували бінарні порошкові суміші, але за нормальних умов, прийнято рішення досліджувати бінарні порошкові суміші в

діапазоні зміни співвідношення азоту до кисню в області значень від 12 до 2,44 з метою виявлення неадитивних ефектів (антагонізм або синергізм) при їх спільному введенні на гасіння полум'я. Відомо, що як хімічна структура, так і концентрація вільних радикалів в полум'ї залежать від вмісту кисню в горючій суміші. Рівнозначна концентрація водень- і кисневмісних радикалів, як найбільш відповідальних за

розвиток процесів горіння у збіднених і збагачених киснем газоповітряних сумішах, різна. У збіднених вуглеводнями газоповітряних сумішах концентрація атомів кисню і радикалів  $\text{OH} \cdot$  і  $\text{HO}_2 \cdot$  більша ніж у збагачених і перевищує концентрацію водню, тобто в порівнянні з «багатими» на вуглеводні сумішами, їх концентрація зростає приблизно в 100 разів, що призводить до збільшення вогнегасної ефективності таких вогнегасних порошків, як ПСБ-3, П-2АП і ПХ на основі КСІ. Найбільш ефективним виявився порошок на основі КСІ.

Із багаточисленних досліджень [3, 5, 6] добре відомо, що величина інгібувального впливу вогнегасних порошків на процеси, що протікають в полум'ї, значною мірою визначається хімічною природою основи порошку. Відомо, що вогнегасні порошки інгібують полум'я як за гомогенним, так і за гетерогенним механізмом. Гомогенний механізм інгібування полум'я КСІ передбачає його термічну дисоціацію з виділенням радикалів хлору і калію. Радикали хлору, що утворюються, можуть не лише взаємодіяти з радикалами, найбільш відповідальними за розвиток радикального ланцюга при горінні, але і каталізувати процес подрібнення вуглеводневого палива, що приводить до збільшення швидкості процесу горіння.

Тому найбільш ефективними інгібіторами для полум'я при горінні вуглеводнів слід визнати бінарні змішані інгібітори з синергетичним ефектом, і другий компонент або продукти його розкладу повинні реагувати в першу чергу з молекулярним галогеном, щоб елімінувати каталітичну дію останнього на процеси крекінгу вуглеводневого палива.

Зміни вогнегасних властивостей змішаних, бінарних вогнегасних порошків залежать від вмісту складових їх компонентів і вмісту кисню в горючій газоповітряній суміші.

При виборі вогнегасних речовин для конкретних умов пожежогасіння та протипожежного захисту враховують їх вогнегасну ефективність, їх токсичність і токсичність продуктів їх піролізу, сумісність з основними елементами засобів життєзабезпечення і ряд інших властивостей. У вітчизняній і зарубіжній практиці пожежогасіння найчастіше при локальному (поверхневому) гасінні використовується вода і водні розчини піноутворювачів в різних композиціях, а при об'ємному гасінні використовують інертні гази ( $\text{N}_2$ ,  $\text{He}$ ,  $\text{CO}_2$ ) і галоїдовуглеводні, як найбільш ефективні інгібітори горіння, особливо коли в їхніх молекулах є атоми бромів або йоду ( $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$ ;  $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$ ;  $\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$ ). Проте вода і водні розчини піноутворювачів малоефективні у пожежогасінні в збагачених киснем середовищах,

а галоїдні вуглеводні мають ряд недоліків. Окрім озоноруйнівної дії, галогенопохідні вуглеводні викликають інтенсивну корозію конструктивних матеріалів.

При їх дії на полум'я утворюються токсичні з'єднання, такі, наприклад, як газоподібні галоїдовуглеводні ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HBr}$ ,  $\text{HI}$ ), а також фосген ( $\text{COCl}_2$ ), фторфосген ( $\text{COF}_2$ ) та інші. Застосування порошкових сумішей для пожежогасіння в збагачених киснем середовищах обмежується недостатнім вивченням і дослідженням їх вогнегасного механізму в цих умовах.

Порошки на основі бікарбонату натрію (ПСБ; ПСБ-3; ПСБ-3М), а також на основі амофосу (П-1А; П-2АП; П-4АП; П-2АПМ; П2-АШ) можуть ефективно використовуватися для гасіння пожеж в збагачених киснем середовищах при співвідношенні азоту до кисню не менше 2,35-2,45 чисельних значень, тобто при концентрації кисню в газоповітряному середовищі в межах 28-30% (об). Найефективніше вищезазначені порошки для пожежогасіння в збагачених киснем середовищах можна застосовувати при співвідношенні азоту до кисню в області чисельних значень, рівних 2,88, тобто при концентрації кисню в газоповітряному середовищі в межах 25,5-26% (об).

Порошки на основі калій хлориду (ПХ; ПХК; ПГС) можна ефективно застосовувати для гасіння пожеж в збагачених киснем середовищах при співвідношенні азоту до кисню не менше 2,05-2,15 чисельних значень тобто. при концентрації кисню в газоповітряному середовищі в межах 31-33% (об). Найефективніше вищезазначені порошки для пожежогасіння в збагачених киснем середовищах можна застосовувати при співвідношенні азоту до кисню в області чисельних значень, рівних 2,44, тобто при концентрації кисню в газоповітряному середовищі в межах 28,5- 29% (об).

Аналіз результатів експериментальних досліджень показує, що бінарна суміш з порошків на основі бікарбонату натрію (ПСБ, ПСБ-3, ПСБ-3М) і на основі калій хлориду (ПХ; ПХК; ПГС) при співвідношенні 1:1 (50% на 50%) мають значно кращу ефективність для пожежогасіння в збагачених киснем середовищах, ніж індивідуальне їх застосування для цих же цілей.

Слід особливо виділити те, що усі вищезазначені порошки можуть використовуватися з певною ефективністю тільки для інгібування процесу горіння в збагачених киснем середовищах і є малоефективними для флегматизації вибухонебезпечних збагачених киснем середовищ.

Такий висновок пояснюється тим, що при термічному розкладанні порошків у

високотемпературній зоні полум'я газоподібні і пароподібні продукти термічного їх розпаду активно дезактивують вільні радикали, що виникають в полум'ї і інгібують процес горіння. Таким чином, в збагачених киснем середовищах значно зростає процес інгібування полум'я порошками за гомогенним механізмом.

Як вже відзначалося вище, розвиток і створення нових технологій пожежогасіння, як і інші сфери людської діяльності, нерозривно пов'язані з науково-технічним прогресом усього суспільства. Поява перших аерозолеутворювальних сумішей збіглася за часом із забороною виробництва і застосування озоноруйнівних хладонів, у тому числі і як вогнегасних речовин.

Аналогом для створення аерозолеутворювальних складів стали відомі на сьогодні достатньо вивчені вогнегасні порошки, механізм дії яких на полум'я, згідно з обґрунтованими твердженнями багатьох дослідників [3, 5, 9, 10], багато в чому аналогічний. Оскільки основа хімічного складу вогнегасних аерозольних сумішей (ВАС) і вогнегасних порошків, особливо порошків на основі калій хлориду, аналогічна, а розмір часток порошку приблизно в 10 разів більший за середній розмір

часток аерозолі, то стає зрозуміло чому більш високою є вогнегасна ефективність останнього.

В дослідях встановлено, що вогнегасна ефективність ВАС зі збільшенням вмісту кисню в закритих об'ємах різко знижується, а при вмісті кисню 70% (об.) ефект не досягався навіть при питомій витраті ВАС 2000 г/м<sup>3</sup>. Подальше збільшення питомої витрати ВАС в умовах експериментів, ставало неможливим, оскільки, починаючи з цієї величини, спостерігалось швидке осідання твердих часток аерозолі, а при спалюванні відповідних мас ВАС через високе тепловиділення відбувалося займання елементів лабораторних установок (ущільнень, оглядового вікна з оргскла і інших деталей).

Особливо значним виявилось зниження ефективності ВАС при гасінні вуглеводневих горючих речовин і матеріалів. Так, при збільшенні концентрації кисню з 20% до 30% (об.) питомі вогнегасні витрати, наприклад, складу СБК-2, збільшувались при гасінні гасу і оргскла в 6,3- 6,6 раза, а водню – в 3,3 раза. При вмісті кисню 60% (об) питомі вогнегасні витрати ВАС для гасіння вуглеводнів і водню відрізняються не більше ніж на 20%.

**Таблиця 1**

Результати експериментів з визначення питомих вогнегасних витрат ВАС СБК-2 для дифузійного полум'я гасу, оргскла, водню при різному початковому вмісті кисню в закритому об'ємі

Вміст кисню, % (об.)	Питомі витрати ВАС, г/м <sup>3</sup>		
	гас	оргскло	Водень
21/20,4/20,2 /19,4*	32	38	150
30/25,5/25,0/23,1	210	240	500
40/30,9/29,7/25,2	390	450	700
60/38,0/36,8/34,7	840	900	1020

Примітка:\*1 значення – початковий вміст кисню в об'ємі; 2,3,4 – після спалювання відповідних мас АВС при гасінні відповідно гасу, оргскла і водню.

Динаміка припинення горіння та зменшення концентрації кисню в лабораторній камері після спалювання мінімальної вогнегасної маси ВАС є обґрунтуванням про необхідність спільного комбінованого застосування ВАС та вогнегасних порошків для пожежогасіння в закритих об'ємах з підвищеним вмістом кисню.

Після спалювання відповідної маси ВАС значний флегматизувальний ефект в об'ємі лабораторної камери спостерігається при вихідних концентраціях кисню 30% (об.) і більше.

Так, після спалювання ВАС концентрація кисню в об'ємі лабораторної камери, залежно від виду горючої речовини зменшується:

- від 30% (об.) до 23-25,5% (об.);
- від 40% (об.) до 25-31% (об.);
- від 60% (об.) до 35-38% (об.).

Результати досліджень обґрунтовують, що при таких кінцевих концентраціях кисню в газоповітряних середовищах ефективно інгібують полум'я вогнегасні порошки на основі калій хлориду, або їх бінарні синергетичні суміші з порошками на основі бікарбонату натрію. Таким чином для гасіння пожеж та ліквідації аварій в приміщеннях та обладнанні з концентрацією кисню в газоповітряному середовищі від 30 до 60% на першому етапі можна ефективно застосовувати ВАС для зменшення концентрації кисню до 23-35% (об.), а для остаточного припинення горіння на другому етапі застосовувати вогнегасні порошки. Для такого комбінованого пожежогасіння доцільно і найбільш ефективно застосовувати вогнегасні порошки на основі калій хлориду (ПХ; ПХК;

ПГС), або на основі бікарбонату натрію (ПСБ; ПСБ-3; ПСБ-3М), тому що такі порошки синергетично сумісні з ВАС.

#### **Висновки**

– Для підвищення ефективності пожежогасіння інгібуванням полум'я порошками пропонується здійснювати одночасну флегматизацію горючого середовища інертними газами [3, 5, 9, 10, 11] або аерозолеутворювальними складами.

– Для досягнення локалізації пожеж в максимально короткий проміжок часу при обмеженій кількості сил і засобів рекомендується застосовувати стаціонарні або переносні ГВА, а після зниження концентрації кисню в зоні горіння для ліквідації полум'яного горіння і тліючих осередків застосовувати порошки на основі бікарбонату натрію або їх бінарні суміші (50% на 50%) з порошками на основі калій хлориду.

– Порошки на основі бікарбонату натрію, а також на основі амофосу (діаммоній фосфату) можуть ефективно використовуватися для гасіння пожеж в збагачених киснем середовищах з концентрацією кисню до 28-30% (об.), а порошки на основі калій хлориду в аналогічних умовах ефективні при концентрації кисню до 31-33% (об.).

– Бінарні суміші з порошків на основі бікарбонату натрію і на основі калій хлориду при співвідношенні 1:1 (50% на 50%) мають значно кращу ефективність, ніж індивідуальні їх компоненти, для пожежогасіння в середовищах з підвищеним вмістом кисню.

#### **Список літератури:**

1. Dolan I. E., Dempster P. B. The Suppression of Methane - Air Ignitons by Fine Powers. Journal of Applied Chemistry. 1995. Vol. 5, № 9. P. 510 - 517.
2. Hirano., Nakaya I. Need of studies to explore fire retardation mechanisms. Bull. Tap. Assoc. Fire Sci. And Eng. 1987. Vol. 36, No 1 - 2. P. 19 - 33.
3. Тищенко О. М., Жартовський С. В., Тищенко Є. О. Вогнегасні порошки та умови їх застосування: навч. посібн. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ, 2014. 250 с.
4. Апанович В. М., Антонов А. В., Іванов В. С. До питань оцінки вогнегасної здатності порошків. Тези доповіді науково-технічного семінару. Севастополь, СПІ, 1988. С. 104 - 105.
5. Tyshchenko Oleksandr, Kyrychenko Oksana, Kutsenko Mariia, Tyshchenko Ievhen. Fire extinguishing efficiency of the powders in environments with variable oxygen concentration. Riešenie Krízových Situácií V Špecifickom Prostredí (Žilina, 15. - 16. október 2025). S. 84 - 86.
6. Покалюк В. М., Григорян М. Б., Маладика І. Г., Федоренко Д. С. Тактична підготовка особового складу структурних підрозділів

оперативно-рятувальної служби цивільного захисту України: навч. посібник. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ, 2023. 158 с.

7. Ацусі Накакукі. Пожежі і протипожежні заходи в камерах високого тиску і високої концентрації кисню. Адзен Когаку, 1972. Т. 2. №5. 27 с.

8. Ацусі Накакукі. Гасіння пожеж в гіпербаричних камерах. Пожежна охорона, 1972. №41. С. 1 - 14.

9. Апанович В. М., Жартовський В. М., Тропінов А. Г. Вогнегасний порошок для гасіння пожеж на об'єктах цивільної авіації. Тези доповіді науково-технічного семінару. Севастополь, СПІ, 1988. С. 100 - 101.

10. Радченко С. О. Розробка методів і пристроїв підвищення ефективності систем аерозольного гасіння пожеж: Автореферат дисертація канд.техн.наук: 05.26.02. Харків: ХДТУБіА, 1997. 24 с.

11. Откідач М. Я. Використання нетрадиційних джерел азоту для флегматизування пожежонебезпечних об'єктів. Сб. наук. праць. Вип. 4. Харків, ХПБ, 1998. С. 154-157.

#### **References:**

1. Dolan I. E., Dempster P. B. (1995). The Suppression of Methane – Air Ignitons by Fine Powers. Journal of Applied Chemistry. Vol. 5, № 9. P. 510–517.
2. Hirano., Nakaya I. (1987). Need of studies to explore fire retardation mechanisms. Bull. Tap. Assoc. Fire Sci. And Eng. Vol. 36, No 1 - 2. P. 19–33.
3. Tyshcheko O. M., Zhartovskyi S. V., Tyshcheko I. O. (2014). Vohnehasni poroshky ta umovy iih zastosuvannia [Fire extinguishing powders and conditions of their use]. Cherkasy: ChIPB, 250 p. [in Ukrainian].
4. Apanovych V. M., Antonov A. V., Ivanov V. S. (1988) Do pytan otsinky vohnehasnoii zdatnosti poroshkiv [On the issues of assessing the fire extinguishing ability of powders] Sevastopol, SPI, P. 104–105 [in Ukrainian].
5. Tyshchenko Oleksandr, Kyrychenko Oksana, Kutsenko Mariia, Tyshchenko Ievhen (2025). Fire extinguishing efficiency of the powders in environments with variable oxygen concentration. Riešenie Krízových Situácií V Špecifickom Prostredí (Žilina, 15. – 16. október 2025). S. 84–86.
6. Pokaliuk V. M., Hryhorian M. B., Maladyka I. H., Fedorenko D. S. (2023) Taktychna pidhotovka osobovoho skladu strukturykh pidrozdiliv operatyvno-riativalnoii sluzhby tsyvilnoho zakhystu Ukrainy (Tactical training of personnel of structural units of the operational and rescue service of the civil protection of Ukraine) Cherkasy: ChIPB, 2023, 158 p. [in Ukrainian].

7. Atsusi Nakakuki. (1972). Pozhezhi i protypozhezhni zakhody v kamerakh vysokoho tysku i vysokoi kontsentratsii kysniu (Fires and fire prevention measures in high-pressure and high-oxygen concentration chambers) Adzen Kohaku, 1972, Vol. 2 №5, 27 p. [in Ukrainian].
8. Atsusi Nakakuki. (1972). Hasinnia pozhezh v hiperbarychnykh kamerakh (Firefighting in hyperbaric chambers) Pozhezhna okhorona, 1972, №41, P. 1–14. [in Ukrainian].
9. Apanovych V. M., Zhartovskyi V. M., Tropinov A. H. (1988). Vohnehasnyi poroshok dlia hasinnia pozhezh na obiektakh tsyvilnoi aviatsii [Fire extinguishing powder for extinguishing fires at civil aviation facilities] Sevastopol, SPI, P. 100–101. [in Ukrainian].
10. Radchenko S. O. (1997). Rozrobka metodiv i prystroiv pidvyshchennia efektyvnosti system aerzolnoho hasinnia pozhezh [Development of methods and devices to increase the efficiency of aerosol fire extinguishing systems]. Kharkiv: KhDTUBiA, 24 p. [in Ukrainian].
11. Otkidach M. Ya. (1998). Vykorystannia netradytsiinykh dzherel azotu dlia flehmatyzuvannia pozhezhonebezpechnykh ob'ektiv [Using non-traditional nitrogen sources to phlegmatize fire-hazardous objects] Kharkiv, KhIPB, P. 154–157 [in Ukrainian].

© О. М. Тищенко, І. Г. Маладика,  
Є. О. Тищенко, Д. О. Котляр, М. П. Сорочич, 2026.

**Науково-методична стаття.**

Надійшла до редакції 15.01.2026.

Прийнята до друку 29.04.2026.

Опублікована 25.05.2026.