



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.10>

*В.-П. О. Пархоменко, Б. М. Михалічко, О. І. Лавренюк, Р. В. Пархоменко,
І. П. Кравець*

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7431-4801> – В.-П. О. Пархоменко

<https://orcid.org/0000-0002-5583-9992> – Б. М. Михалічко

<https://orcid.org/0000-0003-4509-2896> – О. І. Лавренюк

<https://orcid.org/0000-0002-3146-7952> – І. П. Кравець

✉ vp2018@gmail.com

ІННОВАЦІЙНІ РОЗРОБКИ ТА СУЧАСНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РОЗЧИНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНГІБІТОРІВ

Проблема. Сучасний технологічний прогрес супроводжується появою нових матеріалів з підвищеною пожежною небезпекою, як-от літій-іонні батареї, біопаливо та вибухонебезпечні суміші, що ускладнює їх гасіння традиційними водними засобами через низьку в'язкість, слабку змочуваність і швидке випаровування води, створюючи труднощі для оперативно-рятувальних служб у боротьбі з пожежами класів А, В, С, D, F.

Мета. Метою роботи є аналіз сучасного стану використання водних вогнегасних розчинів (ВВР) з інгібіторами, висвітлення методів підвищення їхньої ефективності та оцінювання перспектив застосування для гасіння сучасних пожеж, а також розроблення рекомендацій для вдосконалення вогнегасних речовин.

Методи дослідження. Дослідження проведено аналітичним методом з обробкою наукових публікацій, експериментальних даних і патентної документації щодо ефективності ВВР з інгібіторами, включно з порівняльним аналізом їхніх фізичних і хімічних властивостей.

Основні результати дослідження. На підставі проведеного огляду наукових праць встановлено, що додавання інгібіторів, як-от хлорид калію (KCl, 3–5 %), полігексаметиленгуанідин (ПГМГ, 5 %), хлорид натрію (NaCl, 5–10 %), фосфати амонію (5–10 %), бікарбонати (5–35 %) та наночастинки (SiO₂, Al₂O₃, 2–5 %), підвищує ефективність ВВР: час гасіння скорочується на 20–60 %, витрата речовини зменшується на 10–40 %, а повторне займання запобігається протягом 5–24 годин завдяки охолодженню, ізоляції кисню та хімічному пригніченню горіння; інноваційним підходом є розроблення нових складів (наприклад, «суха вода» з бікарбонатами, ВВР з наночастинками) та технологій їх приготування (ультразвук, змішування).

Висновки. ВВР з інгібіторами є перспективним рішенням для гасіння сучасних пожеж, забезпечуючи екологічність, економічність і адаптивність, однак потребують подальших досліджень для оптимізації складів і технологій впровадження для гасіння пожеж різних класів.

Ключові слова: водні вогнегасні речовини, інгібітори, гасіння пожеж, ізоляція кисню, хімічне пригнічення.

INNOVATIVE DEVELOPMENTS AND MODERN METHODS FOR ENHANCING THE EFFICIENCY OF WATER-BASED FIRE EXTINGUISHING SOLUTIONS USING INHIBITORS

Problem. The advancement of modern technology has led to the emergence of new materials with heightened fire hazards, such as lithium-ion batteries, biofuels, and explosive mixtures, which pose challenges for extinguishment using traditional water-based agents due to water's low viscosity, poor wettability, and rapid evaporation, complicating firefighting efforts for classes A, B, C, D, and F by emergency response services.

Purpose. The purpose of the study is to analyze the current state of water-based fire extinguishing agents (WFEA) with inhibitors, elucidate methods to enhance their efficiency, evaluate their potential for suppressing modern fires, and provide recommendations for improving fire suppressants.

Research methods. The study employs an analytical method involving the processing of scientific publications, experimental data, and patent documentation on the effectiveness of WFEA with inhibitors, including a comparative analysis of their physical and chemical properties.

Research results. Based on the review of scientific papers, it was found that the addition of inhibitors such as potassium chloride (KCl, 3–5 %), oligohexamethylene guanidine (OMMG, 5 %), sodium chloride (NaCl, 5–10 %), ammonium phosphates (5–10 %), bicarbonates (5–35 %) and nanoparticles (SiO_2 , Al_2O_3 , 2–5 %) increases the efficiency of the ERS: extinguishing time is reduced by 20–60 %, substance consumption is reduced by 10–40 %, and re-ignition is prevented within 5–24 hours due to cooling, oxygen isolation and chemical combustion suppression; an innovative approach is the development of new formulations (e.g., “dry water” with bicarbonates, WWA with nanoparticles) and technologies for their preparation (ultrasound, mixing).

Conclusions. WFEA with inhibitors is a promising solution for extinguishing modern fires, providing environmental friendliness, economy and adaptability, but further research is needed to optimize the compositions and implementation technologies for extinguishing fires of different classes.

Key words: water-based fire extinguishing agents, inhibitors, fire suppression, oxygen isolation, chemical suppression.

Вступ. Технологічний прогрес людства супроводжується розробленням нових технологій, які будуть корисні суспільству щодо практичного використання та у фінансовому аспекті. Це супроводжується модифікацією наявних та створенням нових матеріалів, що мають певний рівень пожежної безпеки. Це створює низку проблем для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів через те, що потрібно змінювати підходи до навчання особового складу та дій під час ліквідації пожеж. Також необхідно удосконалити параметри наявних вогнегасних речовин.

Найбільш поширеними вогнегасними речовинами, що використовують працівники оперативно-рятувальної служби цивільного захисту, є вода, водні розчини піноутворювачів та вогнегасні порошки. Кожна речовина має свої фізичні властивості, що ефективно використовується для гасіння пожеж різних класів. Найбільше використання мають вода та водні розчини піноутворювачів та солей. Завдяки введенню до складу води певних хімічних речовин можна суттєво підвищити вогнегасні властивості води, зменшити випаровування та підвищити ефективність тепловідведення [1–4].

Незважаючи на значний прогрес у створенні водних вогнегасних розчинів, питання пошуку нових водних вогнегасних речовин (ВВР) залишається актуальним. Це зумовлено насамперед появою нових речовин та матеріалів, які характеризуються підвищеними температурами займання та самозаймання за умов дії на них полум'я, а також характеристиками різних класів пожеж.

Таким чином, необхідність пошуку нових ВВР та підвищення їхньої ефективності є актуальною науковою та практичною проблемою. Розроблення нових ВВР дасть змогу збільшити ефективність придушення полум'я, знизити витрати на ліквідацію пожеж та мінімізувати екологічні ризики, пов'язані з використанням вогнегасних засобів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження свідчать про значну перспективність використання ВВР з інгібіторами для гасіння пожеж завдяки їхній здатності поєднувати охолодження, ізоляцію кисню та хімічне пригнічення горіння. Для підвищення ефективності цих ВВР додатково у їхній склад можуть додавати в оптимальних концентраціях поверхнево-активні речовини, згущувачі, антифризи та інші компоненти, які завдяки своїм хімічним і фізичним

параметрам будуть в комплексі з інгібітором та водою ефективно ліквідовувати займання матеріалів та унеможлилювати частково чи повністю їх повторне займання. Однією з інноваційних розробок є використання гелеутворювальних систем для гасіння горючих рідин [5], що підкреслюють їхню адаптивність до складних умов горіння. Серед інгібіторів, який найчастіше використовується на практиці пожежогасіння, слід назвати хлорид калію (KCl) у поєднанні зі стабілізаторами.

Також одним з поширених інгібіторів для ВВР є полігексаметиленгуанідин (ПГМГ) [6] через свою стабільність складу і екологічність під час гасіння пожеж класу А. Широкого використання набули фосфати $((\text{NH}_4)_3\text{PO}_4)$ та сульфати амонію $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$, що під час гасіння ВВР переривають ланцюгові реакції горіння, нейтралізуючи вільні радикали та виділяючи негорючі гази (N_2 , CO_2), а в комплексі з борною (H_3BO_3) та бурою кислотами ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) підсилюють інгібування, утворюючи захисний шар на поверхні, який перешкоджає доступу кисню та унеможливорює повторне займання горючих матеріалів [7].

Ще одним перспективним напрямом використання ВВР з інгібіторами є гасіння займань дизельного біопалива та його сумішей з нафтовим дизельним паливом. У цьому напрямі перспективним себе проявив хлорид натрію (NaCl), яких впливає на пригнічення хімічних реакцій горіння шляхом розбавлення кисню в зоні полум'я та часткового утворення захисного шару на поверхні палива [8].

Представлені результати є ефективними, а ВВР потребують подальшого дослідження. Доцільно провести аналіз сучасних розробок та методів підвищення ефективності ВВР з інгібіторами для гасіння пожеж класів А, В, С, D та F. Подальші дослідження мають зосередитися на оптимізації концентрацій та адаптації цих розчинів до реальних умов пожежогасіння.

Метою роботи є висвітлення сучасного стану використання у пожежогасінні водних вогнегасних розчинів з інгібіторами та способів підвищення їхньої ефективності.

Методи дослідження. Аналітичний метод досліджень, що супроводжується обробкою інформації щодо ефективності використання в пожежогасінні водних вогнегасних розчинів з інгібіторами.

Результати дослідження. Недолік води як вогнегасного засобу пояснюється її фізико-хімічними властивостями, насамперед низькою в'язкістю, яка характеризується здатністю чинити опір перетіканню, мінімізувати свою площу поверхні, що забезпечується великим значенням поверхневого

натягу, а також відзначається невеликою змочуваністю твердих поверхонь, що зумовлено малою адгезією «прилипанню» води до горючих поверхонь і, як наслідок, розтікання на них [9–14]. Послаблення цих ефектів можна досягти через введення невеликих кількостей додаткових речовин, що підвищують ефективність ВВР.

До основних шляхів придушення процесу горіння належать способи перешкоджання надходженню кисню (окисник) до осередку горіння, зниження концентрації кисню в повітрі шляхом розведення його негорючими газоподібними речовинами, зниження температури горіння до рівня, нижчого за температуру спалаху, зменшення концентрації горючих речовин шляхом розведення їх негорючими речовинами, інтенсивне зниження швидкості хімічної реакції (інгібування), механічний зрив полум'я потужним струменем води, порошку, газу.

Реалізація цих рішень з використанням вогнегасних речовин, що подаються з технічних засобів пожежогасіння, забезпечує можливість припинення процесу горіння. Вибір тих чи інших способів гасіння пожеж, а також вогнегасних речовин, способів і засобів їх доставки в осередок горіння визначають у кожному конкретному випадку залежно від масштабу пожежі, особливостей горючих речовин і матеріалів, а також стадії розвитку пожежі [15].

Для нашого дослідження практичного інтересу набуває проведення аналізу сучасних способів та розкриття інноваційних методів підвищення ефективності ВВР за допомогою додавання до них інгібіторів для пожеж різного характеру, а також висвітлення їхньої ефективності гасити пожежі різних класів.

Так, у роботі [16] автори досліджують гасіння вибухів вугільного пилу за допомогою композитного пригнічувача горіння на основі гідрокарбонату натрію (NaHCO_3). Цей ВВР отримують шляхом розчинення у воді NaHCO_3 до концентрації 5–10 % за 25 °C з перемішуванням. Під час нагрівання NaHCO_3 розкладається ($2\text{NaHCO}_3 = \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2$), виділяючи CO_2 і водяну пару, які знижують концентрацію кисню в зоні горіння та охолоджують її. Інгібуюча дія іонів Na^+ зводиться до захоплення хімічних радикалів (H і OH) в полум'ї, перериваючи ланцюгові реакції вибуху. Результати досліджень свідчать про те, що максимальний тиск вибуху вугільного пилу знижується на 30–35 % під час додавання гідрокарбонату натрію. Швидкість поширення полум'я зменшується на 35–45 % (з 250 м/с до 140–160 м/с) завдяки інгібуванню. Час гасіння вибуху скорочується на 30–40 %, створюються умови для

запобігання повторному займанню завдяки ізоляції та хімічному ефекту.

Також тематиці розроблення та підвищення ефективності ВВР присвячено дисертаційне дослідження [17], де розглядається можливість використання ВВР з додаванням інгібіторів для підвищення ефективності гасіння низових лісових пожеж. Основна увага зосереджена на оптимізації складу ВВР з додаванням хлориду калію (KCl) як інгібітора і гліцерину як стабілізатора, щоб скоротити час гасіння, зменшити витрату речовини та запобігти повторному займанню. Розчин заливають у ручні ранцеві вогнегасники або розпилювачі з тиском 0,2–0,3 МПа, що створює дрібнодисперсний струмінь (краплі 100–200 мкм), при цьому хлорид калію в оптимальній концентрації 3–5 % під час нагрівання його водного розчину дисоціює, виділяючи іони K^+ , які нейтралізують вільні радикали $H \cdot$ і $OH \cdot$ у газовій фазі полум'я, перериваючи ланцюгові реакції горіння, вода поглинає тепло, знижуючи температуру осередку горіння нижче точки займання, а гліцерин підвищує в'язкість розчину, утворюючи тонку плівку на поверхні рослин. Це частково блокує доступ кисню до тліючих осередків. Експериментальні дослідження проводились на модельних осередках із сухої трави, хвої та деревини сосни, а результати порівнювалися з використанням чистої води.

Автори робіт [18; 19] запропонували ефективний ВВР інгібітора для гасіння пожеж і запобігання повторному загорянню модулів літій-залізофосфатних ($LiFePO_4$) акумуляторів. В цьому разі ВВР отримали шляхом розчинення інгібітора (Na_3PO_4 або $NaHCO_3$) як хімічної добавки у воді до концентрації 5–10 % за температури 20–25 °C з перемішуванням до однорідної маси. Інгібітор сповільнює розігрівання, нейтралізуючи радикали та зменшуючи виділення горючих газів (H_2 , CO). Водна основа забезпечує охолодження, а інгібітор утворює захисний шар, що ізолює електроліт від кисню.

Ефективність отриманих результатів полягає у скороченні часу гасіння полум'я на 30–40 % порівняно з чистою водою, швидшому зниженні температури осередку горіння на 25–35 % (з 600–800 °C до 400–500 °C за 10–12 секунд) завдяки охолодженню та сповільненню розігрівання, а також зменшенню витрати вогнегасної речовини на 20–30 %.

Ще однією ефективною розробкою для гасіння загорянь літій-іонних елементів живлення (ЛПЕЖ) є запропоновані авторами роботи [20; 21] ВВР, що містять інгібітор і поверхнево-активну речовину (ПАР). Для отримання ВВР до води додають 10 % хлориду натрію та 0,5 % неіоногенної ПАР. Для

гасіння загорянь ЛПЕЖ цей розчин подають через форсунку під тиском 0,8 МПа для отримання дрібнодисперсного водяного туману, що дає змогу ефективно збивати факел полум'я. Тому внаслідок проведення експериментальних досліджень автори стверджують, що запропонований ВВР скорочує час факельного горіння ЛПЕЖ на 40–50 % порівняно з дрібнодисперсним водним струменем без добавок, знижує температуру поверхні елементу живлення на 50–60 %, зменшує швидкість тепловиділення на 35–45 %, що свідчить про ефективне пригнічення реакцій горіння.

Дієвий ВВР з використанням наночастинок оксиду алюмінію (Al_2O_3) як інгібітора полум'я для гасіння пожеж, зокрема газових сумішей, представлений у статті [22]. Наночастинок Al_2O_3 діють як теплові поглиначі, абсорбуючи тепло та знижуючи температуру зони горіння. Завдяки великій площі поверхні вони створюють фізичний бар'єр, ускладнюючи доступ кисню. Можуть каталізувати утворення негорючих газів або осідати на поверхні, перериваючи ланцюгові реакції горіння. Під час додавання 5 % наночастинок оксиду алюмінію час гасіння полум'я метану скорочується на 25–35 %, температура зони горіння знижується швидше на 20–30 % (з 1500–1700 °C до 1000–1200 °C за 5–7 секунд) завдяки поглинанню тепла наночастинками та їхній інгібуючій дії. Швидкість поширення полум'я зменшується на 15–25 %. Витрата вогнегасної речовини зменшується на 10–20 % через ефективніше пригнічення горіння. Повторне займання запобігається протягом 5–10 хвилин.

Ефективність ВВР під час гасіння пожеж різних класів (класи А, В, F) з додаванням модифікованих агентів із застосуванням нанотехнологій, зокрема вогнегасних наночастинок, досліджувалась у роботі [23]. Як інгібітори використовували SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 в оптимальному співвідношенні 2–5 %, диспергованих у воді за допомогою ультразвукової обробки протягом 20–60 хвилин для забезпечення однорідності. Дисперговані оксиди металів або карбонові нанотрубки мають більшу площу поверхні з активними центрами, що сприяє кращому поглинанню тепла та перериванню ланцюгових реакцій горіння, підвищуючи ефективність охолодження та пригнічення полум'я.

Ефективність отриманих результатів полягає у скороченні часу гасіння горіння на 20–40 %, зниженні температури в зоні горіння на 15–30 % завдяки високій теплоємності та теплопровідності, зменшенні витрати вогнегасної речовини на 10–25 %.

В роботах [24; 25] описаний ВВР, який використовують в авіаційних вогнегасних боєприпасх

для гасіння низових і верхових лісових пожеж. Як інгібітор у цьому ВВР використовують $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ як хімічну добавку до води, у співвідношенні 5–10 %. Готовий ВВР заливають у боєприпас, який після детонації розприскується у вигляді туману.

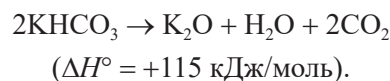
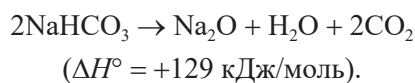
Цей водний розчин може скидатися пожежними літаками та гелікоптерами на лісові пожежі. Після вибуху такого боєприпасу ВВР розбризкується, формуючи туман, який охолоджує палаючу поверхню та блокує доступ кисню в зону горіння. Висока дисперсія за розміру крапель 50–100 мкм забезпечує проникнення ВВР в густі лісові масиви. Ефективність цього ВВР проявляється у скороченні часу гасіння лісових пожеж на 50–60 % з 20–30 до 8–12 хвилин (експеримент проводили в польових умовах на площі 10 м²), швидшому зниженні температури зони горіння на 40–50 % та зменшенні витрати вогнегасної речовини на 30–40 %. Після завершення гасіння лісових пожеж повторного загоряння не спостерігалось протягом 10 хвилин, що свідчить про ефективну ліквідацію залишкових осередків горіння.

Перспективність використання амоній фосфатів як ефективних інгібіторів ВВР для боротьби з лісовими пожежами (клас А) згадується у статті [26]. В цьому огляді як інгібітори використовують водні розчини амоній гідрофосфату ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) і амоній дигідрофосфату ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) у співвідношенні 8–12 %, які завантажують у авіаційний транспорт пожежно-рятувальних служб, де він зберігає стабільність під час транспортування та розприскування. Амоній фосфати спроможні ефективно переривати ланцюгові реакції горіння, нейтралізуючи вільні радикали полум'я. Водна ж основа ВВР охолоджує поверхню, а додані до неї згущувачі у кількості 1–2 % утворюють бар'єр, що уповільнює поширення вогню та ізолює зону горіння від кисню.

Однією з новітніх розробок для гасіння пожеж класів А, В, D та електроустановок є винахід [27–29], де ВВР, що містить інгібітор у комбінації з газами, інгібітор ($\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CHF}_2$), за оптимальної концентрації 10–15 %, перериває ланцюгові реакції горіння, нейтралізуючи вільні радикали Н і ОН а газ N_2 або Ar у концентрації 5–10 %, подається під тиском 2–5 атм, сприяє підвищенню дисперсності ВВР та підвищує його проникнення в осередок горіння. Клас токсичності цього ВВР становить III – помірно небезпечні, час гасіння скорочується на 40–60 %, витрата ВВР знижується на 25 % порівняно з аналогами.

Ефективний вогнегасний засіб запропонували автори роботи [30], де інгібіторами виступають гідрокарбонати (NaHCO_3 та KHCO_3) в кількості 25–35 % для гасіння пожеж класів А і В. Втім, ВВР

використовували у порошкоподібній формі («суха вода»), де вода інкапсулюється в гідрофобний кремнезем (SiO_2). Під час нагрівання «суха вода» розпадається, вивільняючи воду для охолодження осередку горіння і CO_2 для розбавлення окисника:



Кремнезем (SiO_2) діє як фізичний бар'єр, ізолюючи горючу речовину від кисню повітря. При цьому вода (у кількості 55–65 %) випаровується, поглинаючи тепло, а CO_2 діє як флегматизатор.

Ці ВВР отримуються шляхом змішування води з NaHCO_3 або KHCO_3 і гідрофобним SiO_2 (в кількості 5–10 %) у високошвидкісному змішувачі (10,000 об/хв) протягом 30–60 секунд. Отриманий порошок зберігає текучість і розпилюється через стандартні системи подачі порошку. ВВР з KHCO_3 мають на 10–15 % вищу ефективність, ніж ВВР із NaHCO_3 .

Серед перспективних напрямів використання ВВР з інгібіторними добавками слід назвати гасіння пожеж за участю поліуретанової піни. Робота [31] присвячена оцінці ефективності гасіння пожеж класу А дрібнодисперсним струменем водного розчину інгібітора із застосуванням сопел типу Вентурі. Експериментальні дослідження проводились на платформі з поліуретановими ізоляційними плитами розміром 40 × 40 × 5 см, де тестувалися такі добавки, як NaCl , $\text{CH}_3\text{SO}_4\text{Na}$, KHCO_3 , $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, а також їхня комбінація за оптимальної їх концентрації у ВВР 1 % (тобто по 0,25 % кожного компонента). Для оцінювання вогнегасних властивостей добавок у ВВР використовували методи термічного аналізу і вимірювали поверхневий натяг. Результати порівнювалися з чистою водою, щоб визначити найкращий склад для швидкого гасіння горіння поліуретанової піни та зменшення температури зони горіння.

Дрібнодисперсна вода з композитною добавкою (1 % NaCl + $\text{CH}_3\text{SO}_4\text{Na}$ + KHCO_3 + $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) значно підвищує ефективність гасіння пожеж з участю поліуретанових пін, скорочуючи час гасіння (на 30–40 %), зменшуючи витрату ВВР на гасіння (на 25–30 %) і пришвидшуючи зниження температури горіння (на 25–30 %) порівняно з водою. Синергічний ефект охолоджувальної, інгібувальної та ізоляційної дії робить цей склад оптимальним для гасіння пожеж класу А. Ця розробка є екологічною та проявляє більшу вогнегасну ефективність в охолодженому вигляді, втім,

потребує проведення вогневих випробувань на більших осередках горіння.

Висновки. Використання водних вогнегасних розчинів (ВВР) з добавками інгібіторів є перспективним напрямом у підвищенні ефективності гасіння пожеж різних класів завдяки поєднанню охолоджувальної, ізоляційної та інгібувальної дії. Застосування таких інгібіторів, як солі, полімери чи наночастинки, дає змогу скоротити час гасіння пожеж на 20–60 % і зменшити витрату ВВР на гасіння вогню на 10–40 %, що забезпечує економічність і практичність. Низка ВВР демонструє здатність запобігати повторному загорянню протягом 5–24 годин. Ефективність таких розчинів особливо помітна під час гасіння сучасних матеріалів з високими температурами горіння, що робить їх актуальними для оперативно-рятувальних служб. Низька токсичність і адаптивність до різних умов гасіння пожеж підкреслюють екологічну та технічну перевагу цих розробок. Подальший розвиток технологій приготування та оптимізація складу ВВР сприятимуть їх ширшому впровадженню у практику пожежогасіння.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Карвацька М., Пастухов П., Петровський В., Лавренюк О., Михалічко Б. Вогнегасні випробування концентрованого водного розчину ферум(III) сульфату. *Пожежна безпека*. 2022. № 40. С. 55–60. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.06>
2. Mykhalichko B., Lavrenyuk H., Mykhalichko O. New water-based fire extinguishant: Elaboration, bench-scale tests, and flame extinguishment efficiency determination by cupric chloride aqueous solutions. *Fire Safety Journal*. 2019. № 105. P. 188–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.005>
3. Карвацька М., Лавренюк О., Михалічко Б. Сучасний стан і напрями вдосконалення водних вогнегасних речовин. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. № 1(15) С. 92–100. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1\(15\).92-100](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1(15).92-100)
4. Kodrik A., Titenko O., Zhartovskyi S., Borisov A., Shvydenko A. Theoretical Prerequisites for Creating a Fire-Extinguishing Solution Based on Water-Absorbing Polymer Ecoflocf-07 for Extinguishing Fires in Ecosystems. *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 927. P. 87–104. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-647flv>
5. Дадашов Ільгар Фірдосі огли Розвиток наукових основ гасіння горючих рідин твердими пористими матеріалами та гелеутворюючими системами: дис. ... докт. техн. наук: спец. 21.06.02. Харків, 2019. 391 с.
6. Магльована Т. Фізико-хімічні властивості водних вогнегасних речовин на основі полігексаметиленгуанідину. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2014. № 17. С. 67–72.
7. Vuozzo M. Fire inhibitor formulation. Patent US9920250B. USA, 2018.
8. Скоробагатько Т., Антонов А., Боровиков В. Особливості процесів горіння дизельного біопалива, його сумішей з нафтовим дизельним паливом та процесів взаємодії вогнегасних речовин з полум'ям під час їх гасіння. *Інтернаука: міжнародний науковий журнал. Розділ: Технічні науки*. 2019. № 11(73). С. 52–63. DOI: [10.25313/2520-2057-2019-11-5112](https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-11-5112)
9. Кодрик А., Коваленко В., Тітенко О., Борисов А., Стилик І., Борисова, А. Шляхи підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі рідкого скла. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1(13). С. 24–34. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1\(13\).24-34](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1(13).24-34)
10. Anatolii Kodrik, Oleksandr Titenko, Sergiy Zhartovskyi, Andriy Borisov, Andriy Shvydenko Theoretical Prerequisites for Creating a Fire-Extinguishing Solution Based on Water-Absorbing Polymer Ecoflocf-07 for Extinguishing Fires in Ecosystems. *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 927. P. 87–104. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-647flv>
11. Fanbao Chen, Bin Yao, Wanhai Guo, Guoqing Zhu, Tingting Xu, Tao Deng, Zhenhua Jiang, Ziyang Wang, Min Peng, Xinyu Wang Experiment study on fire extinguishing effects of airflow-water synergistic jet. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023. Vol. 49. 103367. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103367>
12. Yang Liu, Zhixi Fu, Guanghui Zheng, Peng Chen Study on the effect of mist flux on water mist fire extinguishing. *Fire Safety Journal*. 2022. Vol. 130. 103601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103601>
13. Hüsniğül Yılmaz-Atay, Jacek Lukasz, Wilk-Jakubowski A Review of Environmentally Friendly Approaches in Fire Extinguishing: From Chemical Sciences to Innovations in Electrical Engineering. *Polymers*. 2022. № 14(6). 1224. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14061224>
14. Fanbao Chen, Bin Yao, Guoqing Zhu, Wanhai Guo, Tingting Xu, Tao Deng, Zhenhua Jiang, Ziyang Wang, Min Peng, Xinyu Wang Improving the fire-extinguishing effect of pneumatic extinguishers with airflow-spray synergistic jet: Investigation of nozzle position and number of nozzles. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023. Vol. 47. 103124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103124>
15. Коротинський П. та ін. Довідник керівника гасіння пожежі. Київ: ЛітераДрук, 2016. 320 с.
16. Zhai, X. W., Pan, W. J., Xiao, Y. Wang S., Ouyang L. Inhibition of coal spontaneous combustion by an environment-friendly, water-based fire extinguishing agent. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021. Vol. 144. P. 325–334. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10101-6>
17. Савельєв Д. Підвищення ефективності гасіння низових лісових пожеж шляхом використання бінарних вогнегасних систем з роздільним

подаванням: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02. Харків, 2020. 170 с.

18. Zhang, M. Jialiang Liu, Yilin Lai, Hao Liu, Hao Chen, Maosong Fan, Mengmeng Geng. Fire Extinguishing Effect of Reignition Inhibitor on Lithium Iron Phosphate Storage Battery Module. *The proceedings of the 10th Frontier Academic Forum of Electrical Engineering (FAFEE2022)*. FAFEE 2022. Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer, Singapore, 2023. Vol 1054. P. 703–711. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-3408-9_60

19. Zhang, L., Jin, K., Sun, J. Wang, Q. A Review of Fire-Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-Ion Batteries Fire. *Fire Technology*. 2024. Vol. 60. P. 817–858. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01278-3>

20. Zhou, Y., Wang, Z., Gao, H., Wan X., Qiu H., Zhang J., Di J. Inhibitory effect of water mist containing composite additives on thermally induced jet fire in lithium-ion batteries. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022. Vol. 147. P. 2171–2185. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10673-x>

21. Wang, H., Zhang, Y., Zhang, G. et al. Study on the Fire Suppression Efficiency of Common Extinguishing Agents for Lithium Iron Phosphate Battery Fires. *Fire Technology*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-024-01687-6>

22. Mohammad Hamdan, Suleiman Enjadat, Ahmad Sakhrieh Flame inhibition using nanotechnology. *International Journal of Thermofluids*. 2024. Vol. 21. 100583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100583>

23. Anna Rabajczyk, Maria Zielecka, Justyna Gniazdowska Application of Nanotechnology in Extinguishing Agents. *Materials (Basel)*. 2022. Vol. 15(24). 8876. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15248876>

24. Li Haoyang, Zhiming Du Study on the development of aerial fire extinguishing munition for forest fires and fire extinguishing tests. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024. Vol. 55. 104138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104138>

25. Haoyang Li, Jinyuan Hao, Zhiming Du Study on the Minimum Fire-Extinguishing Concentration of Several Commonly Used Extinguishing Agents to Suppress Pyrolysis Gas of Red Pine Wood. *ACS Omega*. 2023. Vol. 8(8). P. 7757–7766. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07424>

26. Edward Goldberg. Industry Standard: Understanding the Science of Chemical Retardants. *International Association of Wildland Fire*. 2022. URL: <https://www.iawfonline.org/article/industry-standard-understanding-the-science-of-chemical-retardants>

27. Stephen Conboy Methods of suppressing wild fires raging across regions of land in the direction of prevailing winds by forming anti-fire (AF) chemical fire-breaking systems using environmentally clean anti-fire (AF) liquid spray applied using GPS-tracking techniques. Patent US10653904B2. USA, 2021.

28. Xiyu Wang, Yuanbo Xue, Yongliang Tian, Hu Liu, Zhiyong Cai Planning and Evaluation of Water-Dropping Strategy for Fixed-Wing Fire Extinguisher Based on Multi-Resolution Modeling. *Aerospace*. 2024. Vol. 11. P. 929. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace11110929>

29. D. Dubinin, A. Lisniak, K. Ostapov, S. Shevchenko, Y. Kirvoruchko, I. Hrytsyna, Y. Senchykhin Studying fire extinguishers with the combined supply of the foam-water extinguishing agents in an aerosol state. *SIGURNOST*. 2024. Vol. 66(4). P. 319–332. DOI: <https://doi.org/10.31306/s.66.4.2>

30. Xiang Wang, Jun-Cheng Jiang, Yong-Qi Wang, Sheng-Li Chu, Fei-Hao Zhu, An-Chi Huang Efficacy evaluation of bicarbonate formulations dry water fire extinguishing agents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2024. Vol. 92. 105444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105444>

31. Du, C. Y., Yang, Y., Zhai, J., Zhai J., Yang X.-Z., Tang Y., Dong X.-L. Effectiveness evaluation of fine water mist venturi nozzle systems with composite additives in improving fire suppression in polyurethane fires. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024. Vol. 149. P. 13495–13510. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13666-8>

REFERENCES

1. Karvatska, M., Pastukhov, P. & Mykhalichko B. (2022). Vohnehasni vyprobuвання kontsentrovanoho vodnoho rozchynu ferum(III) sulfatu [Fire-fighting tests of concentrated aqueous solution of ferric sulfate]. *Pozhezhna bezpeka: zb. nauk. prats*, 40, 55–60. doi: <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.06>

2. Mykhalichko B., Lavrenyuk H., Mykhalichko O. (2019). New water-based fire extinguishant: Elaboration, bench-scale tests, and flame extinguishment efficiency determination by cupric chloride aqueous solutions. *Fire Safety Journal*, 105, 188–195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.005>

3. Karvatska M., Lavreniuk O., Mykhalichko B. (2023). Suchasnyi stan i napriamy vdoskonalennia vodnykh vohnehasnykh rehovyn [Current status and directions for improving water-based fire extinguishing agents.]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(15), 92–100. doi: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1\(15\).92-100](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1(15).92-100)

4. Anatolii Kodrik, Oleksandr Titenko & Andriy Shvydenko (2022). Theoretical Prerequisites for Creating a Fire-Extinguishing Solution Based on Water-Absorbing Polymer Ecoflocf-07 for Extinguishing Fires in Ecosystems. *Key Engineering Materials*, 927, 87–104. doi: <https://doi.org/10.4028/p-647flv>

5. Dadashov I. (2019). *Rozvytok naukovykh osnov hasinnia horiuchykh ridyn tverdymy porystymy materialamy ta heleutvoriuyuchy systemamy [Development of scientific foundations for extinguishing flammable liquids with solid porous materials and gel-forming systems]*: Doktor Dissertation. Kharkiv.

6. Mahlovana T. (2014). *Fyzyko-khimichni vlastyvoli vodnykh vohnehasnykh rehovyn na osnovi*

poliheksametylenhuanidynu. *Pozhezhna bezpeka: teoriia i praktyka: zb. nauk. prats*, 17, 67–72.

7. Mark Voozoo (2018). *Fire inhibitor formulation*. (Patent USA US9920250B).

8. Skorobahatko T., Antonov A., Borovykov V. Osoblyvosti protsesiv horinnia dyzelnoho biopalyva, yoho sumishei z naftovym dyzelnym palyvom ta protsesiv vzaiemodii vohnahasnykh rehovyn z polumiam pid chas yikh hasinnia [Features of the combustion processes of diesel biofuel, its mixtures with petroleum diesel fuel and the processes of interaction of fire extinguishing agents with flames during their extinguishing]. *Internauka: Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal*, 2 t. Rozdil Tekhnichni nauky, 2019, 11(73), 52–63. doi: 10.25313/2520-2057-2019-11-5112

9. Kodryk A., Kovalenko V. & Borysova, A. (2022). Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti vodnykh vohnahasnykh rehovyn na osnovi ridkoho skla [Ways to increase the efficiency of aqueous fire extinguishing agents based on liquid glass.]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(13), 24–34. doi: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1\(13\).24-34](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1(13).24-34)

10. Anatolii Kodrik, Oleksandr Titenko & Andriy Shvydenko (2022). Theoretical Prerequisites for Creating a Fire-Extinguishing Solution Based on Water-Absorbing Polymer Ecoflocf-07 for Extinguishing Fires in Ecosystems. *Key Engineering Materials*, 927, 87–104. doi: <https://doi.org/10.4028/p-647flv>

11. Fanbao Chen, Bin Yao & Xinyu Wang (2023). Experiment study on fire extinguishing effects of airflow-water synergistic jet. *Case Studies in Thermal Engineering*, 49, 103367. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103367>.

12. Yang Liu, Zhixi Fu & Peng Chen (2022). Study on the effect of mist flux on water mist fire extinguishing. *Fire Safety Journal*, 130, 103601. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103601>

13. Hüsniğül Yılmaz-Atay, Jacek Lukasz, Wilk-Jakubowski (2022). A Review of Environmentally Friendly Approaches in Fire Extinguishing: From Chemical Sciences to Innovations in Electrical Engineering. *Polymers*, 14(6), 1224. doi: <https://doi.org/10.3390/polym14061224>

14. Fanbao Chen, Bin Yao & Xinyu Wang (2023). Improving the fire-extinguishing effect of pneumatic extinguishers with airflow-spray synergistic jet: Investigation of nozzle position and number of nozzles. *Case Studies in Thermal Engineering*, 47, 103124. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103124>

15. Korotynskyi P. and others (2016). *Dovidnyk kerivnyka hasinnia pozhezhi [Firefighting manager's handbook]*. Kyiv : TOV LiteraDruk.

16. Zhai, XW., Pan, WJ. & Ouyang L. (2021). Inhibition of coal spontaneous combustion by an environment-friendly, water-based fire extinguishing agent. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 144, 325–334. doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10101-6>

17. Saveliev D. (2020). *Pidvyshchennia efektyvnosti hasinnia nyzovykh lisovykh pozhezh shliakhom vykorystannia binarnykh vohnahasnykh system z rozdilnym podavanniam [Increasing the efficiency of extinguishing grassroots forest fires by using binary fire extinguishing systems with separate supply]*: PhD Dissertation. Kharkiv.

18. Zhang, M., Liu, J. & Geng, M. (2023). Fire Extinguishing Effect of Reignition Inhibitor on Lithium Iron Phosphate Storage Battery Module. *The proceedings of the 10th Frontier Academic Forum of Electrical Engineering (FAFEE2022)*. FAFEE 2022. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer, Singapore, 1054, 703–711. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-99-3408-9_60

19. Zhang, L., Jin, K. & Wang, Q. (2024). A Review of Fire-Extinguishing Agents and Fire Suppression Strategies for Lithium-Ion Batteries Fire. *Fire Technology*, 60, 817–858. doi: <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01278-3>

20. Zhou, Y., Wang, Z. & Di, J. (2022). Inhibitory effect of water mist containing composite additives on thermally induced jet fire in lithium-ion batteries. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147, 2171–2185. doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10673-x>

21. Wang, H., Zhang, Y., Zhao, Z. (2025). Study on the Fire Suppression Efficiency of Common Extinguishing Agents for Lithium Iron Phosphate Battery Fires. *Fire Technology*. doi: <https://doi.org/10.1007/s10694-024-01687-6>

22. Mohammad Hamdan, Suleiman Enjadat, Ahmad Sakhrieh (2024). Flame inhibition using nanotechnology. *International Journal of Thermofluids*, 21, 100583. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100583>

23. Anna Rabajczyk, Maria Zielecka, Justyna Gniazdowska (2022). Application of Nanotechnology in Extinguishing Agents. *Materials (Basel)*, 15(24), 8876. doi: <https://doi.org/10.3390/ma15248876>

24. Li Haoyang, Zhiming Du (2024). Study on the development of aerial fire extinguishing munition for forest fires and fire extinguishing tests. *Case Studies in Thermal Engineering*, 55, 104138. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104138>

25. Haoyang Li, Jinyuan Hao, Zhiming Du (2023). Study on the Minimum Fire-Extinguishing Concentration of Several Commonly Used Extinguishing Agents to Suppress Pyrolysis Gas of Red Pine Wood. *ACS Omega*, 8(8), 7757–7766. doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07424>

26. Edward Goldberg (2022). Industry Standard: Understanding the Science of Chemical Retardants. *International Association of Wildland Fire*. Retrieved from: <https://www.iawfonline.org/article/industry-standard-understanding-the-science-of-chemical-retardants>

27. Stephen Conboy (2021). *Methods of suppressing wild fires raging across regions of land in the direction of prevailing winds by forming anti-fire (AF) chemical fire-breaking systems using environmentally clean*

anti-fire (AF) liquid spray applied using GPS-tracking techniques. (Patent US10653904B2).

28. Xiyu Wang, Yuanbo Xue & Zhiyong Cai (2024). Planning and Evaluation of Water-Dropping Strategy for Fixed-Wing Fire Extinguisher Based on Multi-Resolution Modeling. *Aerospace*, 11(11), 929. doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace11110929>

29. D. Dubinin, A. Lisniak & Y. Senchykhin (2024). Studying fire extinguishers with the combined supply of the foam-water extinguishing agents in an aerosol state. *SIGURNOST*, 66(4), 319–332. doi: <https://doi.org/10.31306/s.66.4.2>

30. Xiang Wang, Jun-Cheng Jiang & An-Chi Huang (2024). Efficacy evaluation of bicarbonate formulations dry water fire extinguishing agents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 92, 105444. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105444>

31. Du, C. Y., Yang, Y. & Dong X.-L. (2024). Effectiveness evaluation of fine water mist venturi nozzle systems with composite additives in improving fire suppression in polyurethane fires. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149, 13495–13510. doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13666-8>

© В.-П. О. Пархоменко, Б. М. Михалічко, О. І. Лавренюк, Р. В. Пархоменко, І. П. Кравець

Оглядова стаття

Надійшла до редакції 20.04.20205

Прийнято до публікації 04.06.2025