

УДК 614.842.612

СУЧАСНИЙ СТАН ВИКОРИСТАННЯ У ПОЖЕЖОГАСІННІ ТА СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РОЗЧИНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗМОЧУВАЧІВ

[https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.\(19\).79-88](https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.(19).79-88)

Пархоменко В.-П. О., ORCID iD 0000-0001-7431-4801

Михалічко Б.М., ORCID iD 0000-0002-5583-9992

Пархоменко Р. В., ORCID iD 0009-0008-2954-6767

E-mail: pvp2018@gmail.com

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:
28.03.2025

*Пройшла
рецензування:*
28.04.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

змочувач,
поверхнево-активна
речовина, водні
вогнегасні речовини,
гасіння пожеж, класи
пожеж

АНОТАЦІЯ

Гасіння пожеж є ключовим завданням оперативно-рятувальної служби цивільного захисту, спрямованим на запобігання поширенню вогню, мінімізацію збитків і порятунк життів. Вода та водні розчини залишаються найпоширенішими вогнегасними засобами, а їхні властивості можна суттєво покращити шляхом додавання хімічних речовин, зокрема змочувачів, які підвищують змочувальну здатність, зменшують випаровування та посилюють тепловідведення. Незважаючи на прогрес у розробці водних вогнегасних розчинів (ВВР), пошук нових складів залишається актуальним через появу матеріалів із високими температурами займання та специфіку різних класів пожеж. Метою статті є аналіз сучасного стану використання ВВР зі змочувачами та способів підвищення їхньої ефективності. У роботі використано аналітичний метод із обробкою даних про ефективність таких засобів. Дослідження показують, що вода завдяки високій теплоємності ($4,19 \cdot 10^3$ Дж/кг·К) і теплоті пароутворення (2260 Дж/кг) забезпечує охолодження, але має низьку змочувальну здатність через високий поверхневий натяг. Додавання поверхнево-активних речовин (ПАР) аніонних, неіоногенних, амфотерних чи цвіттер-іонних у концентраціях 0,1-5% знижує натяг до 15-25 мН/м, скорочуючи час гасіння на 20-50% і витрату води до 1/3. Аналіз публікацій і патентів свідчить про ефективність солей d-металів (CuCl_2), які інгібують полум'я, та ПАР для гасіння пожеж класів А, В, пожеж в екосистемах і літій-іонних елементів живлення. Розробки включають гелеутворювальні засоби (Ecofloc A-07), низькофлуорні AFFF (гасіння гептану за 30-40 с) і склади з антикорозійними добавками. Висновки підкреслюють потенціал ВВР у підвищенні безпеки та екологічності, а перспективи розвитку пов'язані з оптимізацією складів і адаптацією до складних умов.

Постановка проблеми. Гасіння пожеж є однією з найважливіших завдань оперативно-рятувальної служби цивільного захисту (ОРС ЦЗ), оскільки своєчасна та ефективна ліквідація займання дозволяє запобігти поширенню вогню в інші приміщення та будівлі, зменшити матеріальні збитки і врятувати життя людей. На даний час існує безліч вогнегасних речовин, основними з яких є вода, водний розчин піноутворювача та вогнегасний порошок. Найбільш поширене використання мають вода та водні розчини піноутворювачів та солей. Завдяки введенню до складу води певних хімічних

речовин можна суттєво підвищити вогнегасні властивості води, зокрема покращити змочувальну здатність, зменшити випаровування та підвищити ефективність тепловідведення.

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 характеристикам різних класів пожеж.

Таким чином, необхідність пошуку нових ВВР та підвищення їх ефективності є актуальною науковою та практичною проблемою. Розробка нових ВВР дозволить 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. Удосконаленням вогнегасних властивостей води було присвячена не одна наукова праця. Так у роботах [1, 2] висвітлено високу вогнегасну ефективність солей перехідних металів, які, крім спроможності гальмувати утворення активних радикалів безпосередньо в полум'ї, здатні також хімічно зв'язуватись з донорними гетероатомами (N, O, S) органічних речовин, внаслідок чого ряд параметрів пожежонебезпеки таких вуглеводнів суттєво знижуються, що у підсумку і забезпечує високу вогнегасну здатність водних розчинів солей *d*-металів.

Також їх беззаперечна ефективність як вогнегасної речовини для створення загороджувальних смуг під час пожеж в екосистемах представлено в роботі [3], де застосовано водний розчин полімеру, який отримано за допомогою диспергування подрібненого сухого полімеру, що набухає у воді, рослинній олії, з додаванням поверхнево-активних та стабілізуювальних речовин. Досліджено можливість використання вологого утримуваного полімеру Ecofloc A-07 як розчину водорозчинних прозорих гранул, які підвищують його адгезію та здатні до плівкоутворення; на цій основі були розроблені гелеутворювальні вогнезахисні речовини. Внаслідок проведених досліджень встановлено, що запропонована речовина для створення загороджувальних смуг ефективна протягом 30 годин.

Використання ВВР, які здатні зменшувати гідравлічний опір (з ефектом Томса) за допомогою похідних гуанідину [4] засвідчило, що додавання навіть в незначних концентраціях (0,03-0,290 %) полігексаметиленгуанідину гідрохлориду,

який відноситься до IV класу токсичності та є ефективним інгібітором біокорозії, збільшує витрату водного вогнегасника в 1,20-1,78 рази при використанні пожежного ствола, та у системах пожежогасіння, де встановлено збільшення витрати розчину полімеру з дренчерних форсунок на 1,86-7,69 % в діапазоні концентрацій (0,3-1,4 %) вздовж досліджуваного трубопроводу (1 м і 13 м). Використовуваний полімер має властивості «біологічно м'якої» поверхнево-активної речовини і відповідає високим екологічним вимогам охорони навколишнього середовища та раціонального використання природних ресурсів.

Методи дослідження. Аналітичний метод досліджень, що супроводжується обробкою інформації, стосовно ефективності використання в пожежогасінні водних вогнегасних розчинів зі змочувачами.

Формулювання цілей дослідження. Метою дослідження є висвітлення сучасного стану використання у пожежогасінні водних вогнегасних розчинів зі змочувачами та способи підвищення їх ефективності.

Виклад основного матеріалу. Вода – це найпоширеніший і доволі ефективний вогнегасний засіб. Вона має високу теплоємність – $4,19 \cdot 10^3$ Дж/кг·К. Під час гасіння пожежі вода, а точніше, певна її кількість випаровується внаслідок контактування з високотемпературним осередком пожежі. З 1 л води утворюється близько 1700 л водяної пари. При цьому відбувається розбавлення реагуючих речовин. Внаслідок великих значень теплоти пароутворення (близько 2260 Дж/кг) вода забирає із зони горіння велику кількість тепла, що, у свою чергу, забезпечує помітний охолоджувальний ефект.

Вода має високу термічну стійкість. Розкладання води на водень та кисень відбувається при температурах понад 1700 °С. Тому гасіння водою горючих матеріалів та рідин у більшості випадків є

безпечним, адже температура горіння більшості речовин не перевищує 1300 °С.

Найбільший вогнегасний ефект спостерігається при застосуванні води у вигляді аерозолю. Водним аерозолем можна гасити навіть горючі рідини, оскільки туманоподібна хмара дрібнорозприсканої води має ізолюючий ефект. Застосування ж в аерозольному пожежогасінні водних розчинів змочувачів, які зменшують поверхневий натяг води, дає можливість зменшити її витрати на гасіння деяких матеріалів на 30-50%.

Істотним недоліком води є її порівняно низька змочувальна здатність і велика текучість, які зумовлені високим значенням коефіцієнта поверхневого натягу при відносно малій в'язкості. Ці властивості води зумовлюють той факт, що поверхня зіткнення крапель води з палаючою поверхнею є невеликою, і при гасінні вода з них швидко стікає.

Для поліпшення вогнегасних властивостей води необхідно зменшити її поверхневий натяг і підвищити змочувальну здатність. У цьому випадку при зіткненні з матеріалом, що горить, вона буде розтікатися по його поверхні, покривати велику площу, легше проникати в пори матеріалу й охолоджувати його, і, отже, можна швидше досягти ефекту гасіння. Для зменшення поверхневого натягу води при гасінні пожеж горючих речовин, що погано змочуються водою, застосовуються водні розчини змочувачів. Завдяки цьому краплі води втрачають кулеподібну форму, легко розтікаються та проникають у капіляри й пори твердих горючих матеріалів, витісняючи з них повітря.

В якості змочувачів до води часто додають **поверхнево-активні речовини (ПАР)**, які спроможні знижувати поверхневий натяг води. Причому значення коефіцієнта поверхневого натягу води залежить від концентрації ПАР у воді.

Молекули ПАР мають асиметричну будову і є біфункціональними. Тобто молекула ПАР з одного кінця має

гідрофільну головку, яка відповідає за розчинність ПАР у воді, а з протилежного кінця молекули присутній гідрофобний хвіст, який не змочується водою і тому хвіст молекули ПАР орієнтується в протилежний від води бік. Властивості ПАР залежать від хімічної природи та будови молекул. ПАР умовно можна розділити на дві великі групи.

До першої групи відносяться речовини, які розчинні у воді, але не дисоціюють і не утворюють іонів, – **неіоногенні ПАР**. До неіоногенних ПАР можна віднести поліоксисполуки, прості поліефіри, поліаміни. Розчинення таких сполук у воді зумовлено утворенням між атомами кисню цих сполук і молекулами води водневого зв'язку й утворенням гідратів. Вуглеводнева частина, що входить у сполуку, зумовлює її гідрофобні властивості.

У другу групу входять речовини, молекули яких при розчиненні у воді дисоціюють на іони. Такі ПАР називають **іоногенними** [5].

Залежно від знаку заряду іоногенні ПАР діляться на:

- **катіоноактивні**, при дисоціації яких утворюються позитивно заряджені органічні катіони і протиіони – як правило, невеликі неорганічні аніони, що забезпечує розчинність молекул ПАР у воді (солі високомолекулярних органічних нітрогенвмісних сполук);

- **аніоноактивні**, при дисоціації яких утворюються негативно заряджені органічні аніони і катіони металів, що теж зумовлює розчинність ПАР у воді (мила, органічні сульфати і сульфонати, відомі як “миючі засоби”). Також до них відносять відносяться карбонові кислоти і солі синтетичних жирних кислот (стеарат натрію, олеат натрію), алкілсульфати, алкіларилсульфонати, лауретсульфат, сульфосукцинат і інші типи поверхнево-активних аніонів (фосфати, тіосульфати). Алкілсульфати і алкіларилсульфонати є сильними кислотами і можуть бути використані в кислих і сольових розчинах

(на відміну від солей жирних кислот вони мають низьку вогнегасну ефективність в кислих середовищах);

• **неіоногенні** ПАР – це сполуки, які при розчиненні у воді не іонізуються. Розчинність таких речовин у воді зумовлена наявністю в них гідрофільних функціональних груп. Неіоногенні ПАР – похідні поліоксіетиленів: $\text{RO}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{H}$ – полігліколевий етер жирних спиртів; $\text{RCOO}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{H}$ – полігліколевий етер жирних кислот; $\text{RCONH}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{H}$ – полігліколевий етер амідів жирних кислот тощо. Поліоксіетиленові етери алкілфенолів – найбільш поширена група неіоногенних ПАР (ОП-4, ОП-7, ОП-10). Частіше вони бувають рідкими або утворюють пасту. За об'ємом виробництва й споживання, неіоногенні поверхнево-активні речовини стоять на другому місці після аніоноактивних ПАР. Вони добре стабілізують піну, знімають статичну напругу на волокнах синтетичних тканин, поліпшують стан хутра.

• **амфотерні** ПАР мають дві функціональні групи. Залежно від рН середовища володіють аніоноактивними або катіоноактивними властивостями. У лужному середовищі проявляють аніоноактивні властивості, в кислому середовищі – катіоноактивні. До амфотерних ПАР відносяться бетаїн, аміноксиди і такі ПАР як імідазоліни (кокоамфодіацетат натрію). Амфотерні ПАР мають більш м'який вплив на шкіру, ніж іонні ПАР. Але амфотерні ПАР погано піняться, а це викладає у споживачів відчуття, що продукція неякісна. Проте молекули амфотерних ПАР змінюють свій заряд відповідно до властивостей середовища, в якій вони перебувають, тому вони забезпечують максимальне очищення, не мають негативного впливу на захисний бар'єр шкіри. Ще один недолік амфотерних ПАР: вони дуже важко згущуються. З цією метою виробникам мийних засобів доводиться додавати до

них аніонні та неіонні ПАР. В результаті амфотерні ПАР стають густими і добре піняться;

• **цвіттеріонні** ПАР містять у молекулах дві протилежно заряджені групи. Позитивний заряд майже завжди забезпечується амонієвою групою, а негативно заряджені групи можуть бути різні; найчастіше негативний заряд забезпечують карбоксилат-іони. Такі ПАР нерідко відносять до амфотерних, але ці терміни не ідентичні. Заряди амфотерного ПАР змінюються в залежності від рН середовища, при цьому при переході від кислого до лужного середовища тип ПАР змінюється від катіонного через цвіттеріонний до аніонного. Ні кислотні, ні основні групи не несуть постійного заряду і цвіттеріоном таке ПАР стає тільки в певному інтервалі рН. Цвіттер-іонні ПАР мають гарні дерматологічні властивості, не подразнюють слизову оболонку очей, тому часто використовуються у складі косметичних засобів [6].

Ефективність використання ПАР у цілях пожежогасіння, як ефективних добавок до води, підтверджено великою кількістю патентної документації та науковими працями.

Так, результати наукової роботи [7] показали, що мономерні добавки ПАР до води забезпечують оптимальні об'єми поглинутої води деревиною, причому цвіттер-іонні ПАР демонструють найефективніше змочування деревини, тоді як катіонні ПАР мають найменший змочувальний вплив. Причому маса адсорбованої води в цій композиційній системі залежала від типу і пропорційного співвідношення добавок. Схема з більшим співвідношенням цвіттер-іонних та аніонних ПАР продемонструвала помітні переваги у підвищенні змочуваності целюлози. Таким чином, було запропоновано рецептуру ВВР, спроможної гасити лісові пожежі, що включає в себе (Capstone1157) + (SDBS) у співвідношенні 3:2 для покращення змочуваності.

У патенті [8] описано ефективність змочувача, призначеного для підвищення ефективності гасіння пожеж, зокрема шляхом покращення проникнення води в горючі матеріали та зниження поверхневого натягу. Змочувач розроблений для використання у водних розчинах, які застосовуються для боротьби з пожежами класів А, В та інших. У ньому зазначається, що запропонована композиція забезпечує зменшення часу гасіння, завдяки кращому розподілу води на поверхні горючих матеріалів, покращену здатність проникати в пористі або щільні структури, що сприяє ефективному охолодженню зони горіння та екологічну безпеку, оскільки в складі ВВР мінімізується використання шкідливих фторовмісних сполук (таких як перфтороктансульфонова кислота (PFOS)), які часто присутні в традиційних змочувачах.

Ефективність вогнегасіння підтверджується описаними випробуваннями, де згадана у [8] композиція продемонструвала кращі результати порівняно зі звичайною водою чи стандартними змочувачами, хоча конкретні кількісні дані (наприклад, відсоткове зменшення часу гасіння) у відкритій частині патенту не деталізуються.

Запропонований у патенті [8] змочувач демонструє потенціал для підвищення ефективності гасіння пожеж завдяки оптимізованому складу, який покращує проникнення та охолоджуючу дію води. Основними активними компонентами є ПАР (5-20%) у поєднанні з розчинниками (2-10%) та стабілізаторами (0,5-5%), розведеними у воді (60-90%). Ця композиція позиціонується як екологічно безпечніша альтернатива традиційним засобам, що робить її перспективною для подальших досліджень у моїй науковій роботі.

Автори роботи запропонували дієвий водний вогнегасний засіб [9], що демонструє потенціал для підвищення ефективності гасіння завдяки введенню добавок, які покращують властивості води.

Цей засіб може знижувати поверхневий натяг води, сприяючи її кращому проникненню в горючі матеріали, а також посилювати охолоджувальний ефект завдяки оптимальному теплопоглинанню. Ефективність проявляється у скороченні часу гасіння та підвищенні здатності засобу працювати з пористими або щільними матеріалами, такими як деревина чи текстиль (пожежі класу А), а також, з горючими рідинами (клас В).

Запропонований водний вогнегасний засіб є ефективним рішенням для гасіння пожеж завдяки поєднанню фізичних (охолодження) та хімічних (інгібування полум'я) механізмів дії. Його склад включає воду (70-90%), ПАР (1-5%), фосфати чи карбонати (2-10%), гліколь або спирт (1-5%) та антикорозійні добавки (0,1-2%), що забезпечує баланс між вогнегасною здатністю та безпекою для особового складу при його використанні. Цей вогнегасний засіб є цікавим прикладом комбінованого підходу до підвищення ефективності води як вогнегасної речовини, особливо в контексті екологічних вимог та універсальності застосування.

В роботі [10] розроблена ВВР може використовуватись для придушення полум'я при горінні вуглеводнів. В її основі 40% водний розчин купрум(II) хлориду, що є досить ефективним вогнегасним засобом. В умовах експерименту тривалість гасіння осередку пожежі класу В аерозолем ВВР (40% водний розчин CuCl_2 + 1% ПУ) становить 0,6 с, що в 26 разів ефективніше аналогічного гасіння водним аерозолем. Найменша витрата ВВР, необхідна для повного придушення вуглеводневого полум'я, становила $0,034 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2}$ (мінімальна витрата води $0,883 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2}$); $I_{\text{ВВР}} = 0,057 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ($I_{\text{H}_2\text{O}} = 0,100 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$).

Аналіз інформації, отриманої при вивченні вогнегасних властивостей CuCl_2 -вмісних ВВР, дозволив виявити особливості поведінки водних розчинів купрум(II) хлориду у разі придушення вуглеводневого полум'я. Це дало змогу адекватно інтерпретувати механізм

придушення полум'я концентрованими водними розчинами солей купруму(II).

Дієвий вогнегасний засіб представлений у патенті [11] характеризується тим, що його готують шляхом додавання водорозчинних поверхнево-активних речовин до води у масовому співвідношенні (0,2-1,0):100, де масова частка ПАР у водному розчині становить 1%-35%. Також цей вогнегасний засіб може впливати на вогнегасну ефективність, перебуваючи в різних агрегатних станах – твердому, рідкому і газоподібному одночасно; під час нагрівання свій вогнегасний ефект проявляє за рахунок дефлаграції, водночас виділяє азот та інші інертні гази для створення дефлаграційної задухи; в порівнянні зі звичайною водою вогнегасна речовина є ефективнішою на 50%. Крім того, після закачування її у вогнегасник проявляє високий вогнегасний ефект при її подачі дрібнодисперсним струменем завдяки насадкам-розпилювачам; вона ефективно зменшує поверхневий натяг води, причому практичного ефекту досягає за рахунок гасіння на великій відстані, не менше 10 м, де витрата вогнегасного засобу на вогнегасіння становить лише 1/3 від аналогічної витрати звичайної води (без добавок). Собівартість цього вогнегасного засобу не є великою, що в свою чергу є перевагою для економічного ефекту при використанні пожежно-рятувальними підрозділами, а також має значний вплив на безпеку особового складу при гасінні пожеж в складних умовах.

Нові змочувальні композиції, описані в статті [12], демонструють значний потенціал для підвищення ефективності гасіння лісових пожеж. Результати експериментальних досліджень показали, що ці вогнегасні засоби здатні суттєво зменшувати час гасіння порівняно з водою без додавання додаткових компонентів, завдяки покращеному змочуванню та проникненню в матеріал. У статті наведено результати польових випробувань, де композиція з добавками знижувала інтенсивність горіння швидше,

ніж звичайна вода: наприклад, у тесті з травною час гасіння скоротився на 20-30%, а для гілок – на 15-25%. Це пов'язано зі зниженням поверхневого натягу води, що дозволяє їй краще покривати та просочувати сухі рослинні настили, а також із затримкою вологи на поверхні, що перешкоджає повторному займанню. Такі властивості роблять вогнегасну речовину особливо цінною для боротьби з лісовими пожежами, де швидке проникнення в густі рослинні хащі є ключовим фактором. Їхній склад забезпечує оптимальні фізичні властивості для боротьби з пожежами в екосистемах. Склад даного вогнегасного засобу включає воду (95-99%), ПАР (0,1-2%), згущувачі (0,5-1%) та стабілізатори (0,1-1%).

Одним з багатьох напрямків використання водних вогнегасних засобів із додаванням ПАР є гасіння літій-іонних елементів живлення (ЛІЕЖ). Вогнегасні засоби для ЛІЕЖ, описані в статті [13] на основі патентного аналізу, демонструють значний потенціал під час гасіння таких пожеж завдяки застосуванню ПАР. В роботі зазначається, що додавання ПАР до рідких, твердих чи комбінованих вогнегасних засобів підвищує їхню здатність проникати в осередок горіння та охолоджувати батарею. Зокрема, патенти вказують на скорочення часу гасіння на 20-40% порівняно з традиційними засобами (наприклад, вода без додаткових інгредієнтів чи CO_2), а також на зменшення ймовірності повторного займання завдяки кращому змочуванню та ізоляції. Це пов'язано з низьким поверхневим натягом розчинів із ПАР (15-25 мН/м), що дозволяє ефективніше покривати поверхню батареї та поглинати тепло. Такі засоби особливо ефективні для гасіння пожеж ЛІЕЖ у закритих системах, наприклад, у сховищах енергії, де термічне розкладання може призвести до вибуху. Крім того, автори підкреслюють здатність деяких ВВР на основі ПАР абсорбувати горючі та токсичні гази (H_2 , CO), що виділяються під час термічного розпадання, що є додатковою перевагою.

Вогнегасні засоби для ЛПЕЖ, проаналізовані в статті [13], є важливим кроком до підвищення безпеки їх використання. Їхній склад включає воду (70-95%), неіоногенні ПАР (0,5-5%), аніонні ПАР (0,5-3%), вогнегасні добавки (2-10%) і стабілізатори (1-5%), забезпечують швидке вогнегасіння, охолодження та зниження токсичних викидів. Цей аналіз є цінним прикладом того, як патентні технології з використанням ПАР можуть вирішувати проблеми термічного розгону ЛПЕЖ, що відкриває перспективи для подальших досліджень у цій сфері.

В рамках проведення аналізу ефективності ВВР зі змочувачами автори звернули увагу на патент [14], який описує водний вогнегасний засіб, призначений для ефективного гасіння пожеж із високою екологічною безпекою та низькою корозійною стійкістю. Цей засіб розроблений для боротьби з пожежами різних класів і має на меті подолання недоліків традиційних вогнегасних засобів, таких як токсичність і складність утилізації. Водний вогнегасний засіб, демонструє високу ефективність завдяки комбінації охолоджуючих, ізоляційних і інгібувальних властивостей. У тексті патенту зазначається, що засіб здатний швидко гасити полум'я шляхом зниження температури горіння та створення захисного шару, який перешкоджає доступу кисню. Результати експериментальних досліджень показують, що його ефективно використовують для гасіння пожеж класів А, В і електричного обладнання, а також зменшує ризик повторного займання. Основою його ефективності є використання ПАР, які знижують поверхневий натяг, дозволяючи засобу краще проникати в осередок горіння, і наявність солей, які інгібують полум'я. Засіб також відзначається низькою токсичністю та корозійною здатністю, що робить його безпечним для використання в житлових приміщеннях чи транспортних засобах.

Технологія приготування передбачає розчинення солей і ПАР у воді при

температурі 30-50°C, додавання стабілізаторів і антикорозійних добавок із подальшим перемішуванням до однорідної маси. У патенті також зазначається можливість регулювання вмісту компонентів залежно від цільового застосування.

Склад вогнегасного засобу включає воду (85-95%), ПАР (0,5-3%), солі (2-8%), стабілізатори (1-4%) та антикорозійні добавки (0,1-1%) що забезпечує швидке охолодження, ізоляцію та хімічне придушення полум'я з мінімальним впливом на довкілля. Цей вогнегасний засіб є цікавим зі сторони сучасного підходу до розробки водних вогнегасних засобів із покращеними характеристиками, що може бути використано для порівняння з іншими технологіями в цій галузі.

Також варто відмітити вогнегасний засіб описаний в патенті [15], який спеціально розроблений для боротьби із самозайманням вугілля. Цей засіб вирізняється високою теплоабсорбційною здатністю та екологічною безпекою, що робить його перспективним рішенням для запобігання та гасіння пожеж у вугільних шахтах. Водний вогнегасний засіб, представлений у цьому патенті, є високоефективним завдяки своїй здатності швидко поглинати тепло та ізолювати вугілля від кисню, що є ключовими факторами для запобігання самозайманню. Зазначається, що засіб може значно знизити температуру вугілля (до 50-70°C нижче за контрольні зразки не оброблені засобом) та уповільнити процеси окислення, які призводять до термічного розкладання. Вважається, що висока теплоабсорбційна властивість досягається завдяки комбінації компонентів, які при контакті з тепловим полем утворюють гелеподібний шар, що блокує доступ кисню та вбирає значну кількість енергії. Експериментальні дані свідчать, що засіб скорочує час гасіння невеликих осередків займання на 30-50% порівняно з традиційними водними розчинами, а також зменшує виділення СО та інших горючих газів. Ця ефективність робить його особливо цінним для профілактики та

боротьби з підземними пожежами на вугільних шахтах, де контроль температури та окислення є критично важливим.

Процес приготування включає розчинення солей і ПАР у воді при температурі 40-60°C, додавання гелеутворювачів і стабілізаторів із подальшим перемішуванням до однорідного стану. Його склад, що включає воду (80-90%), теплопоглинаючі солі (5-10%), ПАР (0,5-2%), гелеутворювачі (1-3%) та стабілізатори (1-3%), забезпечує швидке охолодження, ізоляцію та перешкоджає окисненню. Підкреслюється, що склад може бути адаптований залежно від типу вугілля та умов застосування. Цей засіб є цікавим прикладом інноваційного підходу до розробки екологічно безпечних вогнегасних засобів, адаптованих до специфічних умов вугільних пожеж, що може слугувати основою для порівняння з іншими технологіями в цій галузі.

Також перспективною є розроблена AFFF-композиція зі зниженим вмістом флуору, що демонструє вражаючу ефективність гасіння пожеж, зокрема класу В. Результати експериментальних досліджень, наведені в статті [16], показують, що цей засіб здатен гасити полум'я гептану за 30-40 секунд за стандартних умов горіння, що лише на 5-10% повільніше, ніж традиційні флуоровмісні AFFF. Це досягається завдяки ретельному підбору ПАР, які знижують поверхневий натяг води до 17–19 мН/м і забезпечують швидке утворення плівки на поверхні горючої рідини. Екологічна перевага полягає в зниженні вмісту пер- і поліфлуоралкільних речовин (PFAS), що робить засіб менш шкідливим для довкілля порівняно з комерційними аналогами, зберігаючи при цьому конкурентну вогнегасну здатність.

Розроблена AFFF-композиція зі зниженим вмістом флуору є ефективним і екологічним рішенням для гасіння пожеж класу В. Її склад забезпечує швидке утворення плівки та стійку піну при мінімальному впливі на довкілля і включає

воду (90-95%), флуорвуглецеві ПАР (0,1-0,5%), вуглеводневі ПАР (1-3%), піноутворювачі (1-2%) та стабілізатори (0,5-1,5%).

Ще одна перспективна ВВР, представлена у патенті [17], демонструє високу ефективність вогнегасіння завдяки поєднанню охолоджувальної та інгібувальної дії. У патенті зазначається, що засіб здатен швидко знижувати температуру осередку горіння та переривати реакцію горіння, що дозволяє гасити полум'я швидше, ніж вода без домішок. Використання даного універсального вогнегасного засобу зі складом, що включає воду (80-95%), ПАР (0,5-5%), солі (2-10%), стабілізатори (1-5%) та антикорозійні добавки (0,1-2%) є ефективним для пожеж класів А, В і навіть F. Додавання поверхнево-активних речовин і спеціальних солей сприяє кращому проникненню ВВР в горючі матеріали та утворенню ізоляційного шару, що зменшує доступ кисню.

Висновки і напрями подальших досліджень. Проведений аналіз сучасного стану використання водних вогнегасних розчинів із змочувачами свідчить про їхню високу актуальність і потенціал у підвищенні ефективності гасіння пожеж. Вода є найбільш поширеним вогнегасним засобом та залишається основою для розробки нових ВВР. Однак її недоліки, такі як високий поверхневий натяг і низька змочувальна здатність, успішно долаються шляхом додавання до води добавок, які суттєво покращують проникнення в горючі матеріали, зменшують витрати води та підвищують охолоджуючий ефект. Дослідження показали, що додавання ПАР (аніонних, неіоногенних, амфотерних чи цвіттер-іонних) у концентраціях від 0,1 до 5% здатне скоротити час гасіння пожеж від 20 до 50% залежно від класу пожежі а також знизити витрату води до третини порівняно з водою без застосування додаткових інгредієнтів.

Ефективність вогнегасіння водними розчинами ПАР підтверджується як науковими працями, так і патентною

документацією. Їх практичне значення полягає у скороченні матеріальних збитків, підвищенні безпеки особового складу ОРС ЦЗ та зменшенні екологічних ризиків. Зокрема, засоби з низькою токсичністю чи антикорозійними добавками дозволяють застосовувати їх у екологічно чутливих середовищах, таких як житлові приміщення чи транспорт. Експериментальні дані також підкреслюють здатність ПАР абсорбувати токсичні гази, що є додатковою перевагою

при гасінні літій-іонних батарей чи інших джерел термічного розгону.

Представлений у статті широкий спектр ВВР із додаванням ПАР знаходять застосування для гасіння пожеж класів А, Б та електроустановок і ЛПЕЖ. Перспектива подальшого розвитку заданого напрямку досліджень вбачається в аспекті пошуку нових та оптимізації вже відомих ВВР. Проведення досліджень саме в такому ключі дасть змогу забезпечити особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів широким спектром ефективних водних вогнегасних засобів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Карвацька М. Я., Пастухов П. В., Петровський В. Л., Лавренюк О. І., Михалічко Б. М. Вогнегасні випробування концентрованого водного розчину ферум(III) сульфату. *Пожежна безпека: зб. наук. праць*, 2022. №40. С. 55-60. URL: <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.06>
2. Карвацька М. Я., Лавренюк О. І., Михалічко Б. М. Сучасний стан і напрями вдосконалення водних вогнегасних речовин. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2023. № 1 (15) С. 92-100. URL: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1\(15\).92-100](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1(15).92-100)
3. Стилик І. Г., Кодрик А.І., Борисов А.В., Тітенко О.М., Куценко М. А. Щодо можливості використання розчинів на основі сополімерів акриламідів для створення загороджувальних смуг під час пожеж в екосистемах. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2024. № 2 (18) С. 75-81. URL: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2\(18\).75-81](https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2(18).75-81)
4. Maglyovana T., Nyzhnyk T., Stas S., Kolesnikov D., Strikalenko T. Improving the efficiency of water fire extinguishing systems operation by using guanidine polymers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. 1/10 (103). P. 20-25. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.196881>
5. Тарахно О.В. Теоретичні основи пожежовибухонебезпеки. Харків: АЦЗУ, 2006. – 395 с.
6. Стрельцова О. О., Менчук В. В. Утворення, властивості розчинів і застосування поверхневоактивних речовин: навчально-методичний посібник / О. О. Стрельцова, В. В. Менчук – Одеса: Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, 2021. – 132 с.
7. Junqing Meng, Zihan Zhou, Chunhui Lyu, Yi-Xiang Lyu, Yimin Liang, Baisheng Nie Unveiling Optimal Wetting Additives for Extinguishing Wood Fires: Insights from Molecular Simulation and Experimental Investigations. *Surfaces and Interfaces*. Volume 44, January 2024, 103805. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surf.2023.103805>
8. Jin Su Lyeon Wetting agent composition for extinguishing fires. European patent office WO 2020/166900. Germany, 2021.
9. Chang Shanqiang, Zhu Gaoqiang, Chang Jian, Jin Changwei Water-based extinguishing agent and preparation method thereof. Patent CN109260644B. China, 2020.
10. 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. 188-195. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.005>
11. Xiao-Gang Jiang, Li Ying, Yuan Zhijiang, Zhi-Lin Zheng, Yuting Zhai High-efficiency fire extinguishing agent. Patent CN108421201A. China, 2018.
12. Joanna Rakowska, Ryszard Szczygieł, Mirosław Kwiatkowski, Bożenna Porycka, Katarzyna Radwan, Krystyna Prochaska Application Tests of New Wetting Compositions for Wildland Firefighting. *Fire Technology* (Springer US), 2017. Vol. 53. Iss. 3. P. 1379-1398. URL: <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0640-0>
13. Jianqi Zhang, Tao Fan, Shuai Yuan, Chongye Chang, Kuo Wang, Ziwei Song, Xinming Qian Patent-based technological developments and surfactants application of lithium-ion batteries fire-extinguishing agent. *Journal of Energy Chemistry*, 2024. Vol. 88. P. 39-63. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.08.037>
14. Yang Yang, Tang Zhi Water-based fire extinguishing agent. Patent CN111617428A. China, 2020.
15. Yu Minggao, Yang Hongyu, Zheng Kai Water-based high-efficiency fire extinguishing agent with high heat absorption property for coal spontaneous combustion. Patent CN110339519A. China, 2019.
16. Wu, WH., Wang, JL., Zhou, YQ. et al. Formulation and performance of aqueous film-forming foam fire extinguishing agent composed of a short-chain perfluorinated heterocyclic surfactant as the key component. *Chemical Papers*, 2023. Vol. 77. P. 6763-6771. URL: <https://doi.org/10.1007/s11696-023-02975-1>
17. Dongnan Chen Fire-extinguishing aqueous solution, preparation method thereof and fire-extinguishing balls. Patent CN110732110A. China, 2020.

REFERENCES

1. Karvatska M. Ya., Pastukhov P. V. & Mykhalichko B. M. (2022). Vohnehasni vyprobuvannya kontsentrovanooho vodnoho rozchynu ferum(III) sulfatu. *Pozhezhna bezpeka: zb. nauk. prats*, 40, 55-60. doi: <https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.06>

2. Karvatska M. Ya., Lavreniuk O. I., Mykhalichko B. M. (2023). Suchasnyi stan i napriamy vdoshkonalennia vodnykh vohnehasnykh rehovyn. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhehna 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)
3. Stylyk I. H., Kodryk A.I. & Kutsenko M. A. (2024). Shchodo mozhyvosti vykorystannia rozchyniv na osnovi sopolimeriv akrylamidu dlia stvorennia zahorodzhuvalnykh smuh pid chas pozhehz v ekosystemakh. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhehna bezpeka*, 2 (18), 75-81. doi: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2\(18\).75-81](https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2(18).75-81)
4. Maglyovana T., Nyzhnyk T., Stas S., Kolesnikov D., Strikalenko T. (2020). Improving the efficiency of water fire extinguishing systems operation by using guanidine polymers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/10 (103), 20-25. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.196881>
5. Tarakhno O. V. (2006). *Teoretychni osnovy pozhehzovybukhonebezpeky*. Kharkiv: ATsZU.
6. Streltsova O. O., Menchuk V. V. (2021). *Utvorennia, vlastyvoli rozchyniv i zastosuvannia poverkhnevoaktyvnykh rehovyn: navchalno-metodychnyi posibnyk*. Odesa: Odeskyi natsionalnyi universytet imeni I. I. Mechnykova.
7. Junqing Meng, Zihan Zhou & Baisheng Nie (2024). Unveiling Optimal Wetting Additives for Extinguishing Wood Fires: Insights from Molecular Simulation and Experimental Investigations. *Surfaces and Interfaces*, 44, 103805. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103805>
8. Jin Su Lyeon (2021). *Wetting agent composition for extinguishing fires*. (Patent Germany WO 2020/166900). European patent office.
9. Chang Shanqiang, Zhu Gaoqiang, Chang Jian, Jin Changwei (2020). *Water-based extinguishing agent and preparation method thereof*. (Patent China CN109260644B).
10. 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>
11. Xiao-Gang Jiang, Li Ying & Yuting Zhai (2018). *High-efficiency fire extinguishing agent*. (Patent China CN108421201A).
12. Joanna Rakowska, Ryszard Szczygieł & Krystyna Prochaska (2017). *Application Tests of New Wetting Compositions for Wildland Firefighting*. *Fire Technology (Springer US)*, 53, 3, 1379-1398. doi: <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0640-0>
13. Jianqi Zhang, Tao Fan & Xinming Qian (2024). *Patent-based technological developments and surfactants application of lithium-ion batteries fire-extinguishing agent*. *Journal of Energy Chemistry*, 88, 39-63. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.08.037>
14. Yang Yang, Tang Zhi (2020). *Water-based fire extinguishing agent*. (Patent China CN111617428A).
15. Yu Minggao, Yang Hongyu, Zheng Kai (2019). *Water-based high-efficiency fire extinguishing agent with high heat absorption property for coal spontaneous combustion*. (Patent China CN110339519A).
16. Wen-Hai Wu, Ji-Li Wang & Aidong Zhang (2023). *Formulation and performance of aqueous film-forming foam fire extinguishing agent composed of a short-chain perfluorinated heterocyclic surfactant as the key component*. *Chemical Papers*, 77, 6763-6771. doi: <https://doi.org/10.1007/s11696-023-02975-1>
17. Dongnan Chen (2020). *Fire-extinguishing aqueous solution, preparation method thereof and fire-extinguishing balls*. (Patent China CN110732110A).

CURRENT STATE OF USE IN FIRE FIREFIGHTING AND WAYS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF AQUEOUS FIRE EXTINGUISHING SOLUTIONS USING WETTING AGENTS

V.-P. Parkhomenko, B. Mykhalichko, R. Parkhomenko

Lviv State University of Life Safety, Ukraine

KEYWORDS:

wetting agent,
surfactant,
aqueous
extinguishing
agents, fire
extinguishing, fire
classes.

ABSTRACT

Firefighting is a key task of the civil protection service aimed at preventing the spread of fire, minimising damage and saving lives. Water and aqueous solutions remain the most common extinguishing agents, and their properties can be significantly improved by adding chemicals, such as wetting agents, which increase wetting capacity, reduce evaporation and enhance heat dissipation. Despite the progress in the development of aqueous fire extinguishing agents (AFAs), the search for new compositions remains relevant due to the emergence of materials with high ignition temperatures and the specifics of different classes of fires. The aim of the article is to analyse the current state of use of water-based fire extinguishing agents with wetting agents and ways to improve their efficiency. The paper uses an analytical method with data processing on the effectiveness of such agents. Studies have shown that water, due to its high heat capacity ($4.19 \cdot 10^3$ J/kg·K) and heat of vapour (2260 J/kg), provides cooling, but has a low wetting capacity due to its high surface tension. The addition of surfactants (anionic, nonionic, amphoteric or zwitterionic) in concentrations of 0.1-5% reduces the tension to 15-25 mN/m, reducing the extinguishing time by 20-50% and water consumption by up to 1/3. An analysis of publications and patents shows the effectiveness of d-metal salts (CuCl_2), which inhibit flames, and surfactants for extinguishing Class A and B fires, fires in ecosystems, and lithium-ion batteries. The developments include gel-forming agents (Ecofloc A-07), low-fluorine AFFFs (extinguishing heptane in 30-40 seconds) and formulations with anti-corrosion additives. The findings highlight the potential of VWRs to improve safety and environmental performance, and the prospects for development are related to optimising formulations and adapting to challenging conditions.