

УДК 614.841

## СУЧАСНИЙ СТАН І НАПРЯМИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1.92-100>

Карвацька М. Я. \* ORCID iD 0000-0002-2659-2724

Лавренюк О. І. ORCID iD 0000-0003-4509-2896

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

\*E-mail: mkarvatska91@gmail.com

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна*

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції: 09.04.2023*

*Пройшла рецензування: 14.05.2023*

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

водні вогнегасні речовини, інгібітори горіння, неорганічні солі, аерозольне вогнегасіння.

### АНОТАЦІЯ

Одним із актуальних завдань у справі пожежогасіння є пошук і дослідження нових вогнегасних засобів та удосконалення тих, які вже існують, оскільки ефективність боротьби з пожежами значною мірою залежить від якості вогнегасних речовин та технологій з їх застосування. З метою окреслення шляхів вдосконалення вогнегасних засобів та пошуку нових необхідно провести детальний аналіз сучасних досягнень в області застосування цих засобів, що використовуються для гасіння осередків пожеж класу В, виявити їхні переваги та недоліки. У світовій практиці для запобігання виникненню пожеж класу В та для їх гасіння широко застосовують аерозольне подавання водних вогнегасних речовин (далі – ВВР) у полум'я. З огляду на це зосереджено увагу на порівняльному аналізі вогнегасної ефективності відомих на сьогодні ВВР, проведено узагальнення способів приготування їх водних розчинів та розглянуто взаємозв'язок між вогнегасною ефективністю та концентрацією ВВР. Відповідно до аналізу сучасного стану для гасіння пожеж класу В та підвищення надійності протипожежного захисту різних промислових об'єктів традиційно використовують здебільшого аерозольне подавання ВВР на основі різних солей s-металів та амонію. Основним складником, інгібітором горіння, в усіх цих засобах пожежогасіння є хлориди, карбонати, фосфати лужних та лужноземельних металів та амонію, які здатні припиняти процес горіння винятково в полум'ї за нез'ясованим досі механізмом інгібування горіння. Окрім традиційних солей-інгібіторів горіння, високу вогнегасну ефективність здатні виявляти солі d-металів, які спроможні гальмувати утворення активних радикалів безпосередньо в полум'ї. В цьому плані дуже перспективними ВВР, які варто розробляти, є концентровані водні розчини неорганічних солей d-металів.

### Постановка проблеми.

Ефективність боротьби з пожежами значною мірою залежить від якості вогнегасних речовин та технологій їх застосування. Зважаючи на це, у справі пожежогасіння залишається актуальним завдання пошуку і дослідження вогнегасних речовин. Вибір тих чи інших засобів та способів гасіння пожеж, а також вогнегасних речовин здійснюють окремо для кожного конкретного випадку,

і правильність цього вибору залежить від масштабів горіння, фізико-хімічних особливостей речовин і матеріалів, що горять, а також від стадій розвитку пожежі. Універсальних ефективних вогнегасних засобів не існує. З огляду на це під час вибору засобів пожежогасіння слід керуватися простим правилом – досягнути якомога кращого вогнегасного ефекту за мінімальних витрат вогнегасної речовини. Також важливо мати інформацію про

фізико-хімічні параметри процесів, що відбуваються під час горіння різних речовин. Зрозуміти й адекватно пояснити ці процеси можна тільки ґрунтуючись на основних законах хімії [1], хімічної термодинаміки [2] та хімічної кінетики [3]. З іншого боку, для припинення процесу горіння однієї і тієї ж речовини можна використовувати різні вогнегасні засоби, однак ефективність гасіння пожежі у цьому разі буде різною. З огляду на зазначене проведення детальний аналіз сучасних досягнень в області застосування відомих вогнегасних засобів, що використовуються для гасіння осередків пожеж класу В, є актуальним, зокрема з погляду окреслення шляхів пошуку нових та вдосконалення вогнегасних речовин, що вже існують.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що всі нині відомі вогнегасні засоби за своїм вогнегасним ефектом поділяються на ті, що ізолюють осередок пожежі, знижують концентрацію окисника через розбавлення горючої суміші негорючими газами, охолоджують зону горіння та інтенсивно гальмують (інгібують) швидкість хімічних реакцій в полум'ї. Однак багато відомих із них є інертними щодо дії на полум'я, тобто здебільшого виявляють флегматизувальну дію. Окрім цих вогнегасних речовин, є вогнегасні засоби, які активно діють на полум'я, тобто виявляють інгібувальний (хімічний) ефект. Загалом здебільшого дія вогнегасних засобів на процес горіння часто є комбінованою з якимось одним домінуючим вогнегасним ефектом.

До сучасних вогнегасних засобів належать водні вогнегасні речовини, піноутворювачі загального та спеціального призначення, вогнегасні порошки загального та спеціального призначення, а також газові вогнегасні речовини. Останнім часом для запобігання виникненню пожеж класу В та для їх гасіння широко застосовують аерозольне подавання ВВР у полум'я [4]. Серед перелічених вогнегасних засобів значного поширення набули ВВР, які добре розчинні у воді солі лужних, лужноземельних та

перехідних металів, фосфатні солі амонію, комплексні солі калію та купруму чи калію і феруму тощо.

**Формулювання цілей дослідження.** Проведення детальний аналізу сучасних досягнень в області застосування водних вогнегасних речовин для гасіння осередків пожеж класу В, виявлення їх переваг чи недоліків та окреслення шляхів пошуку нових, удосконалення ВВР, що існують.

**Методи дослідження.** Для цілеспрямованого пошуку нових та вдосконалення ВВР, що існують, здійснено порівняльний аналіз вогнегасної ефективності відомих на сьогодні ВВР, проведено узагальнення способів приготування їх водних розчинів та розглянуто взаємозв'язок між вогнегасною ефективністю та концентрацією ВВР.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** На сьогодні вода, завдяки своїй дешевизні та доступності, вважається найпоширенішим засобом гасіння пожеж. Здатність ефективно поглинати теплове випромінювання, термічна стійкість, можливість тривалого зберігання без зміни фізико-хімічних властивостей, а також легкість транспортування, екологічна чистота, відсутність шкідливого впливу на людину, доступність, дешевизна тощо – це переваги застосування води в пожежогаєнні. Разом із цим вогнегасну ефективність води можна суттєво посилити (тобто зменшити витрати води на одиницю площі пожежі), якщо використовувати дрібно розприскану воду [5–6]. Водночас підвищений охолоджувальний ефект дрібно розприсканої води досягається зазвичай збільшенням сумарного коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  і зменшенням часу нагрівання краплі  $\tau_k$  внаслідок збільшення загальної площі поверхні водяних крапель. Функціональна залежність параметрів  $\alpha$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$ ) і  $\tau_k$  (с) від дисперсності крапель  $d$  (мм) наведені на рис. 1. Отже, теплообмін між полум'ям і водою суттєво зростає зі зменшенням розмірів водяних крапель та збільшенням швидкості їх руху у факелі полум'я.

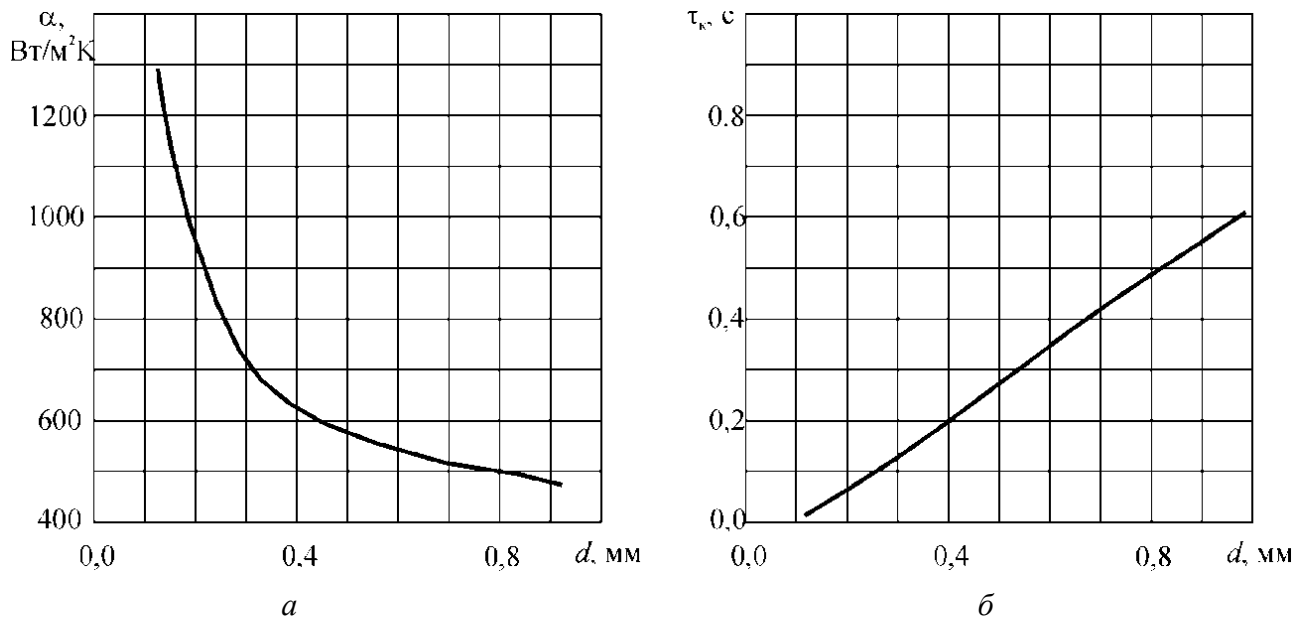


Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі (а) і часу нагрівання (б) води від дисперсності водяних крапель

Окрім охолоджувального, ізолювального вогнегасного ефекту води можна також посилювати за допомогою додавання поверхнево-активних речовин (далі – ПАР) задля отримання піни [7].

Проте вода зовсім не здатна виявляти інгібувальну дію на полум'я, тобто вона залишається хімічно інертною до більшості горючих речовин та матеріалів. Однак вчені у всьому світі не залишають спроб проводити пошукові дослідження, спрямовані на отримання альтернативних водних вогнегасних засобів, які б не поступалися їй в економічності, зручності у використанні і транспортуванні та були б екологічно прийнятними і водночас здатними хімічно діяти на полум'я. У світовій практиці протипожежного захисту об'єктів різного призначення великого поширення набувають технології розприскування водних вогнегасних речовин, які спроможні найповніше

забезпечувати реалізацію унікальних фізико-хімічних властивостей води та інгібувальної функції розчинених у воді солей [8–9].

Як розчинені у воді вогнегасні речовини, інгібітори горіння, найчастіше використовують солі лужних, лужноземельних металів та амонію [4]. Більшість цих речовин є добре розчинними у воді і тому в процесі гасіння пожеж їх можна використовувати як концентровані водні розчини [10]. Зокрема, в роботі [11] була досліджена вогнегасна здатність деяких неорганічних солей калію. Кореляційну залежність між інгібувальною та вогнегасною здатністю розчинених у воді солей калію і їх концентрацією показано на рис. 2а. Ці дослідження лягли в основу розроблення водних вогнегасних речовин на основі  $\text{K}_2\text{CO}_3$  [12] та  $\text{KNO}_3$  [13] для гасіння пожеж класу А і В.

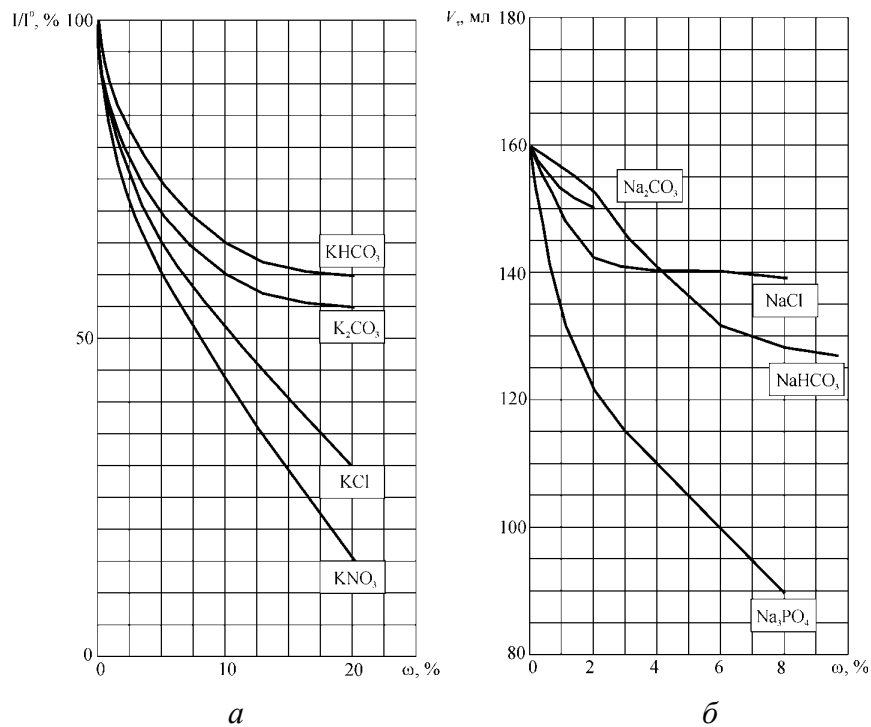


Рисунок 2 – Залежність інгібувальної здатності водних розчинів солей калію на горіння (а) та витрат водних розчинів солей натрію на гасіння займань (б) від їх концентрації

З метою підвищення ефективності гасіння осередків займань пропонується для використання водна вогнегасна композиція, виготовлення якої базується на взаємодії органічних кислот (ацетатної та лимонної) з неорганічним лугом (KOH) з додаванням таких речовин, як  $K_2CO_3$ ,  $KHCO_3$ ,  $K_4P_2O_7$ ,  $NaHCO_3$  тощо для стабілізації цих реакцій [14].

Привертають увагу науковців дослідження [15], які дали змогу виявити взаємозв'язок між вогнегасною здатністю виготовлених аерозолів водних розчинів солей лужних та лужноземельних металів (Li, Na, K, Mg, Ca тощо) від природи цих солей. Зокрема, на рис. 2б показана вогнегасна ефективність водних розчинів солей натрію як функція витрат розчинів цих солей від їх концентрації. Відомі також водні вогнегасні речовини, виготовлені з відходів титанового виробництва – розплавів хлоридів *s*-металів (KCl, NaCl,  $MgCl_2$ ) з незначними домішками хлоридів *d*-металів ( $MnCl_2$ ,  $CrCl_3$ ,  $FeCl_3$ ). Підвищення вогнегасної ефективності води досягається також у разі додавання до неї магній хлориду (2,5–20%), ортофосфатної кислоти та солей, які утворюються під час їхнього гідролізу. Тривалість гасіння полум'я можна також суттєво зменшити додаванням до води 2%

бури ( $Na_2B_4O_7$ ) і 0,32% боратної кислоти ( $H_3BO_3$ ). Також було показано, що у разі внесення в полум'я водного розчину, що містить 20–25% натрій хлориду, висота полум'я стрімко (за 3–5 с) зменшується. Цей інгібувальний ефект пояснюється безпосереднім потраплянням у зону горіння твердих частинок кухонної солі – NaCl, яка виділяється з розчину під час проходження краплин крізь полум'я. Аналогічна поведінка в полум'ї властива також водним розчинам деяких солей амонію –  $NH_4H_2PO_4$ ,  $(NH_4)_2HPO_4$ ,  $(NH_4PO_2)_n$ ,  $(NH_4)_2SO_4$ ,  $NH_4Cl$ ,  $(NH_4)_2C_2O_4$ , натрію – NaCl, NaF,  $NaHCO_3$ , калію – KBr, літію – LiF, барію –  $BaCl_2$  тощо. Перелічені солі характеризуються великими значеннями стандартних ентальпій утворення, через що під час термічного розкладання вони здатні поглинати значну кількість теплової енергії, що виділяється під час горіння.

Недоліком більшості вказаних водних вогнегасних речовин є те, що як розчинені солі використовують солі *s*-металів та амонію, які здатні призупиняти процеси горіння в основному за рахунок поглинання теплової енергії полум'я, а процедура приготування таких розчинів подекуди є вкрай складною. Крім того, ряд приготованих водних розчинів солей

мають значення  $pH \geq 12$ , що характеризує їх як хімічно небезпечні, корозійні та шкідливі для довкілля.

Що ж до солей калію, то автори роботи [16] показали, що калій карбонат ( $K_2CO_3$ ) виявився доволі ефективною домішкою для підвищення вогнегасної дії води. Так, за вмісту солі 1%, 2% і 5% ефективність пожежогасіння водними розчинами  $K_2CO_3$  порівняно з чистою водою зростає відповідно на 37,6%, 47,2% і 64,8%. Якщо розглядати інші солі калію, то можна спостерігати зменшення ефективності в ряді  $K_2C_2O_4 > CH_3COOK > KNO_3 > KCl > KH_2PO_4$ , що пояснюється утворенням різних активних частинок під час термічного розкладання цих солей.

Результати досліджень, наведені у роботі [17], показали, що використання 10% розчину  $KHCO_3$  скорочує середній час гасіння горіння гептану до 96% порівняно з чистою водою (від 154,6 с для води до 5,5 с для ВВР). Автори також стверджують, що водні розчини хлоридів перехідних металів ( $MnCl_2$ ,  $CuCl_2$ ,  $ZnCl_2$ ) є менш ефективними вогнегасними засобами, ніж розчини солей лужних металів. А 3% водні розчини  $(NH_4)_2HPO_4$ ,  $(NH_2)_2CO$  і  $FeSO_4$  навпаки збільшували час, необхідний для гасіння полум'я.

У роботі [18] зазначено, що ВВР на основі органічних солей лужних металів ( $K_2C_2O_4$ ,  $CH_3COOK$ ) є більш ефективними вогнегасними засобами, аніж їхні неорганічні аналоги ( $KCl$ ,  $KHCO_3$ ) чи сполуки фосфатної кислоти ( $K_3PO_4$ ,  $NH_4H_2PO_4$ ,  $H_3PO_4$ ). Автори також вважають, що вогнегасна ефективність хімічної домішки залежить від її хімічної природи, тривалості перебування в зоні горіння і складу продуктів розкладання.

Привертають увагу публікації, які стосуються розроблення нових вогнегасних речовин на основі солей перехідних металів [19–20]. Зокрема, як ВВР часто використовують такі солі *d*-металів, як  $CoCl_2$ ,  $NiCl_2$ ,  $MnCl_2$ ,  $FeCl_2$  тощо. Виявилось, що деякі з цих солей є більш ефективними інгібіторами горіння, аніж добре відомі всім хладони –  $CF_3Br$ . Ефективність придушення полум'я аерозолями водних розчинів солей перехідних металів забезпечується особливими хімічними властивостями цих металів як акцепторів електронів чи акцепторів хімічних радикалів, що утворюються в полум'ї. Саме ця особливість надає цим водним вогнегасним композиціям здатність ефективно призупиняти поширення полум'я [21].

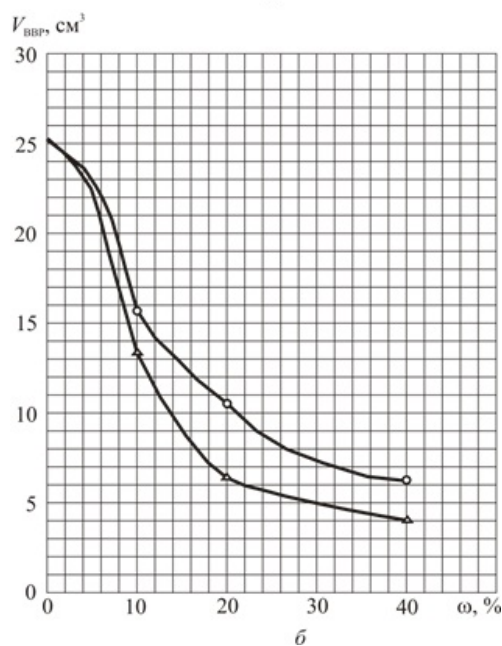
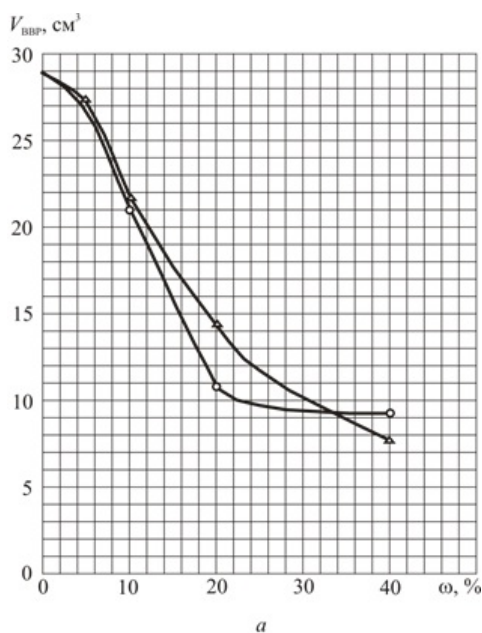


Рисунок 3. – Об'єм витраченої водної вогнегасної речовини від її масової концентрації на гасіння горіння гексану (а) та моноетаноламіну (б) (Δ – розчини  $CuCl_2$ ; ○ – розчини  $K_2[CuCl_4]$ )

Відповідно до нещодавно проведених експериментальних досліджень доволі перспективними речовинами, які можна використовувати для створення ВВР, є неорганічні солі купруму(II). Серед цього класу ВВР особливої уваги заслуговує концентрований водний розчин купрум(II) хлориду, а саме – 40% водний розчин  $\text{CuCl}_2$ , який під час гасіння осередків займає класу В (дизельне пальне) показав неабияку ефективність [22]. Так, зважаючи на вогнегасні випробування концентрованого водного розчину  $\text{CuCl}_2$ , гасіння горіння дизельного пального цією ВВР виявилось у 26 разів більш ефективним, ніж водою. Вогнегасна ефективність 40% водного розчину  $\text{CuCl}_2$  є наслідком особливої поведінки хлориду купруму(II) в полум'ї [23], адже після потрапляння аерозолу водного розчину  $\text{CuCl}_2$  в зону горіння розпочинаються складні фізико-хімічні перетворення, які призводять до переривання ланцюгових реакцій в полум'ї.

Ще однією відомою ВВР є комплексна сіль калію і купруму –  $\text{K}_2[\text{CuCl}_4]$ . Експериментальні дослідження довели, що у разі гасіння горіння моноетаноламіну вогнегасна здатність 40% водного розчину калій тетрахлокоупрату(II) у 4,2 раза вища, ніж у води, а якщо зіставляти результати випробувань з гасіння горіння n-гексану, то вогнегасна здатність буде у 3,2 раза вищою, ніж у води [24].

На рис. 3 наведена кореляційна залежність вогнегасної ефективності ВВР на основі  $\text{CuCl}_2$  (а) та  $\text{K}_2[\text{CuCl}_4]$  (б) як функція об'єму витраченої ВВР на гасіння полум'я від їхньої концентрації. Як бачимо, в обох випадках вогнегасна ефективність ВВР значно залежить від концентрації розчиненої у воді солі, і за концентрацій солі купруму(II) менших за 5% їх вогнегасна ефективність практично нівелюється. Ось чому в роботі [17] повідомлялося, що водний розчин  $\text{CuCl}_2$  з невисокою концентрацією солі виявився малоефективним вогнегасним засобом.

Доволі ефективними щодо придушення полум'я виявились водні розчини калій гексаціаноферату(II) –  $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  та калій гексаціаноферату(III) –  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$

[25–26]. Зокрема, 30% водний розчин калій гексаціаноферату(III) доволі дієво придушує полум'я лісових пожеж. На жаль, використання  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  як інгібітора горіння має один істотний недолік: вже за температури 350–400°C калій гексаціаноферат(III) розкладається з виділенням токсичних сполук  $\text{KCN}$  і газоподібного диціану  $(\text{CN})_2$ . На відміну від калій гексаціаноферату(III), купрум(II) хлорид термічно більш стійкий і може переходити у газоподібний стан за високих температур.

Як показали нещодавно проведені випробування [27], ВВР на основі неорганічної солі феруму(III), а саме – 40% водний розчин ферум(III) сульфату здатний ефективно придушувати поширення полум'я. Слід зазначити, що водний розчин цієї солі не містить токсичних продуктів розкладання. Автори встановили, що тривалість гасіння полум'я, зумовленого горінням неполярних вуглеводнів, аерозолем концентрованого водного розчину цієї солі становить 5 с, що у 4,9 раза ефективніше за водогінну воду. Водночас мінімальний об'єм витраченого 40% водного розчину  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  на повне припинення горіння становив 0,2 л/м<sup>2</sup>. Як бачимо, атоми перехідних металів і в цьому разі є акцепторами електронів, що й забезпечує цим вогнегасним композиціям високу здатність призупиняти поширення полум'я.

### **Висновки та напрями подальших досліджень.**

1. На сьогодні для гасіння пожеж та підвищення надійності протипожежного захисту різних промислових об'єктів використовують традиційні засоби пожежогасіння: дрібнодисперсну воду та водні вогнегасні речовини (в тому числі й піни), порошкові засоби пожежогасіння та вогнегасні аерозолі.

2. Основним складником, інгібітором горіння, в усіх цих засобах пожежогасіння є солі s-металів (хлориди, карбонати, фосфати лужних та лужноземельних металів та амонію), які здатні припиняти процес горіння винятково в полум'ї, механізм інгібування горіння яких і досі є дискусійним.

3. Однак, окрім традиційних солей-інгібіторів горіння, високу вогнегасну

ефективність здатні виявляти солі *d*-металів, які, крім спроможності гальмувати утворення активних радикалів безпосередньо в полум'ї, здатні також хімічно зв'язуватись з донорними гетероатомами (N, O, S тощо) органічних речовин, внаслідок чого ряд параметрів пожежонебезпеки таких вуглеводнів суттєво знижуються, що у підсумку і

забезпечує високу вогнегасну здатність розчинів таких солей.

4. У цьому плані дуже перспективними вогнегасними речовинами, які варто розробляти, є сполуки феруму, атоми металу яких виявляють неабияку електроноакцепторну спроможність стосовно електронодонорних гетероатомів різних горючих органічних речовин.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Михалічко Б. М. Курс загальної хімії. Теоретичні основи : монографія. Львів : Знання, 2009. 548 с.
2. Рябов І. Б., Сайчук І. В., Шаршанов А. Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі : навч. посіб. Харків : АПБУ, 2002. 355 с.
3. Ashmore P. G. Catalysis and Inhibition of Chemical Reactions. Butterworth, Washington : D.C., 1963. 375 p.
4. Вогнегасні речовини : посіб. / А. В. Антонов та ін. Київ : Пожінформтехніка. 2004. 176 с.
5. Дударев В. В., Горовых О. Г., Бардушко С. Н., Шмулевцов И. А., Бобрышева С. Н. Влияние дисперсности распыленной воды на интенсивность ее подачи при тушении пожара в закрытом объеме. *Науковий вісник УкрНДППБ*. 2009. Т. 19. № 1. С. 149–157.
6. Абрамов Ю. А., Бесараб С. Н., Садковой В. П. Условия и временные характеристики тушения пожара класса В распыленной водой. *Проблемы пожарной безопасности*. 2011. Вып. 30. С. 3–7.
7. Ковалишин В. В., Васильева О. Е., Козяр Н. М. Пінне гасіння. Львів : Сполом, 2007. 168 с.
8. Турчин А. І., Антонов А. В. Теоретичні і практичні питання застосування технологій тонкого розпилювання водних вогнегасних речовин. *Науковий вісник УкрНДППБ*. 2008. Т. 17. № 1. С. 138–145.
9. Коврегін В. В., Калугін В. Д., Кустов М. В., Сидоренко О. В. Повышение эффективности пожаротушащих составов на основе воды за счет добавок различных реагентов. *Вісник ЛДУБЖД*. 2010. № 4. Ч. 1. С. 136–142.
10. Турчин А. І., Боровиков В. О., Антонов А. В., Козяр Н. М. Дослідження з визначення показників якості деяких водних вогнегасних речовин. *Науковий вісник УкрНДППБ*. 2008. Т. 18. № 2. С. 110–115.
11. Водопінна вогнегасна речовина на основі фторсинтетичного плівкоутворювального піноутворювача : пат. 4340 Україна : МПК А62D1/02. № у 2009 03835 ; заявл. 21.04.2009; опубл. 10.08.2009. Бюл. № 15.
12. Водна вогнегасна речовина для гасіння тонкорозпиленими струменями пожеж класів «А» та «В» за ГОСТом 27331-87 з використанням від –30 до +50°C : пат. 52969 Україна : МПК А62D 1/02. № у 2009 11293; заявл. 06.11.2009 ; опубл. 27.09.2009. Бюл. № 18.
13. Водна вогнегасна речовина для гасіння тонкорозпиленими струменями пожеж класів «А» та «В» за ГОСТом 27331-87 : пат. 96797 Україна : МПК А62D 1/02. № а 2009 11271 ; заявл. 06.11.2009 ; опубл. 12.12.2011. Бюл. № 23.
14. Антипіренова композиція та спосіб її одержання : пат. 84683 Україна : МПК С09К 21/00, А62D 1/00, А62D 1/06. № а 2005 01765 ; заявл. 05.08.2003; опубл. 25.11.2008; Бюл. № 22.
15. Дяченко О. І., Биченко А. О. Залежність вогнегасної ефективності води від її хімічного складу. *Пожежна безпека : теорія і практика*, 2008. № 1. С. 36–39
16. Zhang Tianwei, Liu Hao, Han Zhiyue, Du Zhiming, Wang Yong. Active substances study in fire extinguishing by water mist with potassium salt additives based on thermoanalysis and thermodynamics. *Applied Thermal Engineering*, 2017. Vol. 122. P. 429–438.
17. Joseph P., Nichols E., Novozhilov V. A comparative study of the effects of chemical additives on the suppression efficiency of water mist. *Fire Safety Journal*. 2013. Vol. 58. P. 221–225.
18. Ming-Hui Feng, Jun-Jun Tao, Jun Qin and Qin Fei. Extinguishment of counter-flow diffusion flame by water mist derived from aqueous solutions containing chemical additive. *Journal of Fire Sciences*. 2016. Vol. 34(1). P. 51–68.
19. Linteris G. T., Knyavez V. D., Babushok V. I. Inhibition of premixed methane flames by manganese and tin compounds. *Combustion and Flame*. 2002. Vol. 129(3). P. 221–238.
20. Linteris G. T., Rummingier M. D., Babushok V. I. Catalytic inhibition of laminar flames by transition metal compounds. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008. Vol. 34(3). P. 288–329.
21. Linteris G. T., Katta V. R., Takahashi F. Experimental and numerical evaluation of metallic compounds for suppressing cup-burner flames. *Combustion and Flame*. 2004. Vol. 138 (1–2). P. 78–96.
22. Mykhalitchko B., Lavrenyuk H., Mykhalitchko O. New water-based fire extinguishant: elaboration, bench-scale tests, and flame extinguishment efficiency determination by cupric chloride aqueous solutions. *Fire Safety Journal*. 2019. Vol. 105. P. 188–195.
23. Карвацька М. Я., Лавренюк О. І., Пархоменко В.-П. О., Михалічко Б. М. Квантово-хімічне моделювання інгібувального впливу водних розчинів неорганічних солей купруму(II) на горіння вуглеводнів. *Вісник ЛДУБЖД*. 2021. № 23. С. 33–38.
24. Korobeinichev O. P., Shmakov A. G., Chernov A. A., Bol'shova T. A., Shvartsberg V. M., Kutsenogii K. P., Makarov V. I. Fire suppression by aqueous solutions salts aerosols. *Combustion Explosion and Shock Waves*. 2010. Vol. 46. № 1. P. 16–20.
25. Korobeinichev O., Shmakov A., Chernov A., Bolshova T., Terenteva Ya., Borisov G. The influence of K<sub>4</sub>[Fe(CN)<sub>6</sub>] aerosol on the flame speed of methane-air flame. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 62. P. 331–336.
26. Водна вогнегасна речовина K<sub>2</sub>[CuCl<sub>4</sub>] : пат. 108792 Україна : МПК А62D 1/00. № а 2013 12708 ; заявл. 31.10.2013 ; опубл. 10.06.2015. Бюл. № 11.
27. 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*. 2022. № 40. С. 55–60.

REFERENCES

1. Mykhalichko, B. (2009). *Kurs zahalnoi khimii. Teoretychni osnovy* [Course of general chemistry. Theoretical foundations]. Lviv: Znannia [in Ukrainian].
2. Ryabov, I. B., Saychuk, I. V., & Sharshanov, A. Ya. (2002). *Termodinamika i teploperedacha u pozhezhnii spravi* [Thermodynamics and heat transfer in firefighting]. Kharkiv: APBU [in Ukrainian].
3. Ashmore, P. (1963). *Catalysis and Inhibition of Chemical Reactions*. Butterworth, Washington: D.C. [in English].
4. Antonov, A. V., Borovykov, O. V., Orel, V. P., Zhartovskiy, V. M., Kovalyshyn, V. V. (2004). *Vohnehasni rechovyny* [Fire extinguishing agents]. Kyiv: *Pozhinformtekhnik* [in Ukrainian].
5. Dudarev, V. V., Horovykh, O. H., Bardushko, S. N., Shmulevtsov, Y. A., Bobrysheva, S. N. (2009). Vlyaniye dyspersnosti raspylennoi vody na yntensyvnost ee podachy pry tushenyy pozhara v zakrytom obeme [Effect of dispersion of sprayed water on the intensity of its delivery when extinguishing a fire in a closed volume]. *Naukovyi visnyk UkrNDIPB*, 19, (1), 149–157. [in Ukrainian].
6. Abramov, Yu. A., Besarab, S. N., Sadkovoy, V.P. (2011). Usloviya i vremennyye kharakteristiki tusheniya pozhara klassa B raspylennoy vody [Conditions and temporal characteristics of extinguishing a class B fire with sprayed water]. *Problemy pozharnoy bezopasnosti*, 30, 3–7. [in Ukrainian].
7. Kovalyshyn, V. V., Vasylieva, O. E., & Kozyar, N. M. (2007). *Pinne hasynnya* [Foam extinguishing]. Lviv: Spolom [in Ukrainian].
8. Turchyn, A. I., Antonov, A. V. (2008). Teoretychni i praktychni pytannya zastosuvannya tekhnolohiy tonkoho rozpylyuvannya vodnykh vohnehasnykh rechovyn [Theoretical and practical issues of application of technologies of fine spraying of water-based fire extinguishing agents]. *Naukovyi visnyk UkrNDIPB*, 17 (1), 138–145. [in Ukrainian].
9. Kovregin, V. V., Kalugin, V. D., Kustov, M. V., Sidorenko, O. V. (2010). Povysheniye effektivnosti pozharotushashchikh sostavov na osnove vody za set dobavok razlichnykh reagentov [Increasing the effectiveness of fire-extinguishing compositions based on water by adding various reagents]. *Visnyk LDUBZHD*, 4 (1), 136–142. [in Ukrainian].
10. Turchyn, A. I., Borovykov, V. O., Antonov, A. V., Koziar, N. M. (2008). Doslidzhennia z vyznachennia pokaznykiv yakosti deiakykh vodnykh vohnehasnykh rechovyn [Research on determination of quality indicators of some aqueous extinguishing agents]. *Naukovyi visnyk UkrNDIPB*, 2, 110–115. [in Ukrainian].
11. Kovalyshyn, V. V., Turchyn, A. I., Antonov, A. V., Kozyar, N. M. (2009). *Vodopinna vohnehasna rechovyna na osnovi fiorsyntetychnoho plivkoutvoryvalnoho pinoutvoryuvacha* [Water-foaming extinguishing agent based on fluorosynthetic film-forming foaming agent]. Patent Ukr, no. 43403.
12. Antonov, A. V., Kovalyshyn, V. V., Turchyn, A. I., Kozyar, N. M. (2009). *Vodna vohnehasna rechovyna dlya hasynnya tonkorozpylenymy strumenyamy pozhezh klasiv «A» ta «V» za HOSTom 27331-87 z vykorystanniam vid –30 do +50 °C* [Water-based extinguishing agent for extinguishing fires of classes «A» and «B» according to GOST 27331-87 with fine spray jets at temperatures from -30 to +50 °C]. Patent Ukr, no. 52969.
13. Antonov, A. V., Kovalyshyn, V. V., Turchyn, A. I., Vaysman, M. N., Kozyar, N. M. (2011). *Vodna vohnehasna rechovyna dlya hasynnya tonkorozpylenymy strumenyamy pozhezh klasiv «A» ta «B» za HOSTom 27331-87* [Aqueous extinguishing agent for extinguishing fires of classes «A» and «B» according to GOST 27331-87 with fine spray jets]. Patent Ukr, no. 96797.
14. Nilsson, Yens Birger. (2008). *Antypirenova kompozytsiya ta sposib yiyi oderzhannya* [Fire retardant composition and method of its preparation]. Patent Ukr, no. 84683.
15. Diachenko, O. I., Bychenko, A. O. (2008). Zalezhnist vohnehasnoi efektyvnosti vody vid yii khimichnoho skladu [Dependence of fire extinguishing efficiency of water on its chemical composition]. *Pozhezhna bezpeka: teoriia i praktyka*, 1, 36–39. [in Ukrainian].
16. Zhang, T., Liu H., Han Z., Du Z., Wang Y. (2017) Active substances study in fire extinguishing by water mist with potassium salt additives based on thermoanalysis and thermodynamics. *Applied Thermal Engineering*, 122, 429–438. [in English].
17. Joseph, P., Nichols, E., Novozhilov, V. (2013). A comparative study of the effects of chemical additives on the suppression efficiency of water mist. *Fire Safety Journal*, 58, 221–225. [in English].
18. Ming-Hui, Feng, Jun-Jun, Tao, Jun, Qin and Qin Fei. (2016). Extinguishment of counter-flow diffusion flame by water mist derived from aqueous solutions containing chemical additive. *Journal of Fire Sciences*, 34 (1), 51–68. [in English].
19. Linteris, G. T., Rumminger, M. D., Babushok, V. I. (2008). Catalytic inhibition of laminar flames by transition metal compounds. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34 (3), 288–329. [in English].
20. Linteris, G.T., Rumminger, M.D., Babushok, V.I. (2008). Catalytic inhibition of laminar flames by transition metal compounds. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34 (3), 288–329. [in English].
21. Linteris, G.T., Katta, V.R., Takahashi, F. (2004). Experimental and numerical evaluation of metallic compounds for suppressing cup-burner flames. *Combustion and Flame*, 138 (1-2), 78–96. [in English].
22. Mykhalichko, B., Lavreniuk, 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. [in English].
23. Karvatska, M. Ia., Lavreniuk, O. I., Parkhomenko, V.-P. O., Mykhalichko, B. M. (2021). Kvantovo-khimichne modeliuвання inhibovalnoho vplyvu vodnykh rozchyniv neorhanichnykh solei kuprumu(II) na horinnia vulevodniv [Quantum-chemical modeling of the inhibitory effect of aqueous solutions of inorganic copper(II) salts on the combustion of hydrocarbons]. *Visnyk LDUBZHD*, 23, 33–38. [in Ukrainian].
24. Korobeinichev, O. P., Shmakov, A. G., Chernov, A. A., Bol'shova, T. A., Shvartsberg, V. M., Kutsenogii, K. P., Makarov, V. I. (2010). Fire suppression by aqueous solutions salts aerosols. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 46 (1), 16–20. [in English].
25. Korobeinichev, O., Shmakov, A., Chernov, A., Bolshova, T., Terenteva, Ya., Borisov, G. (2013). The influence of  $K_4[Fe(CN)_6]$  aerosol on the flame speed of methane-air flame. *Procedia Engineering*, 62, 331 – 336. [in English].
26. Mykhalichko B. M., Hodovanets' N. M., Mykhalichko O. B. *Vodna vohnehasna rechovyna K2[CuCl4]*. Patent na vynakhid № 108792. Ukrayina. MPK A62D 1/00. № a 2013 12708, zayavl. 31.10.2013, opubl. 10.06.2015, Byul. № 11.
27. Karvatska, M. Ia., Pastukhov, P. V., Petrovskiy, V. L., Lavreniuk, O. I., Mykhalichko, B. M. (2022). Vohnehasni vyprobuvannya kontsentrovanoho vodnoho rozchynu ferum(III) sulfate [Fire extinguishing tests of a concentrated aqueous solution of ferric(III) sulfate]. *Pozhezhna bezpeka*, 40, 55–60. [in Ukrainian].



## CURRENT STATUS AND DIRECTIONS FOR THE IMPROVEMENT OF AQUEOUS FIRE-EXTINGUISHING AGENTS

*M. Karvatska, O. Lavreniuk, B. Mykhalichko*

*Lviv State University of Life Safety, Ukraine*

---

### KEYWORDS:

aqueous  
fire-extinguishing  
agents, combustion  
inhibitors, inorganic  
salts, aerosol  
fire-extinguishment

### ANNOTATION

One of the urgent problems in the field of fire extinguishing is the search and research of new and improvement of existing fire extinguishing agents, since the effectiveness of fighting fires largely depends on the quality of fire extinguishing substances and their application technologies. In order to design ways to find new and improve existing fire extinguishing agents, it is necessary to carry out a detailed analysis of modern achievements in the field of application of known fire extinguishing agents used to extinguish class B fires, to identify their advantages and disadvantages. In world practice, to prevent the occurrence of class B fires and to extinguish them, aerosol supply of aqueous fire-extinguishing agents (AFEAs) to the flame is widely used. Therefore, the work focused on a comparative analysis of the fire-extinguishing efficiency of currently known AFEA, summarized the methods of preparing their aqueous solutions, and considered the relationship between fire-extinguishing efficiency and concentration of AFEA. The analysis of the current state has shown that, for extinguishing class B fires and increasing the reliability of fire protection of various industrial facilities, aerosol supply of AFEAs based on various salts of *s*-metals and ammonium is traditionally used. The main component (the combustion inhibitor) in all these AFEAs are chlorides, carbonates, phosphates of alkaline and alkaline earth metals and ammonium, which are able to stop the burning process exclusively in the flame according to the mechanism of combustion inhibition that has not yet been clarified. In addition to traditional salts-inhibitors of combustion, salts of *d*-metals, which are able to inhibit the formation of active radicals directly in the flame, can show high fire-extinguishing efficiency. In this regard, concentrated aqueous solutions of inorganic salts of *d*-metals are very promising AFEAs that are worth developing.