



М. Я. Карвацька, П. В. Пастухов, В. Л. Петровський, О. І. Лавренюк, Б. М. Михалічко

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2659-2724> – М. Я. Карвацька

<https://orcid.org/0000-0002-3140-1101> – П. В. Пастухов

<https://orcid.org/0000-0002-5323-7824> – В. Л. Петровський

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

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



mkarvatska91@gmail.com

ВОГНЕГАСНІ ВИПРОБУВАННЯ КОНЦЕНТРОВАНОГО ВОДНОГО РОЗЧИНУ ФЕРУМ(III) СУЛЬФАТУ

Вступ. Одним з пріоритетних завдань пожежної безпеки і, зокрема, пожежогасіння є пошук нових вогнегасних речовин, здатних проявляти чималу вогнегасну дію, тобто дуже ефективно призупиняючи поширення полум'я. З огляду на це, перспективними речовинами, які можна було б використати для розробки водних вогнегасних речовин нового покоління, є неорганічні солі феруму, атоми *d*-металу яких можуть проявляти неабияку схильність до хімічного зв'язування як з гетероатомами різних горючих речовин, так і з активними частинками полум'я.

Мета. Провести випробування вогнегасних властивостей концентрованого водного розчину ферум(III) сульфату та експериментальним шляхом встановити кількісні параметри аерозольного гасіння осередку займання класу «В».

Методи. Вогнегасні випробування концентрованого водного розчину ферум(III) сульфату на відкритому просторі, проводили за розробленою методикою на установці для гасіння полум'я, що складається з пневматичного розпилювача (Record 2200 ESO) з вбудованою ємністю (0,5 л) і насадкою розприскувача (\varnothing 1,2 мм), балона зі стисненим повітрям, оснащеного редуктором для створення тиску в системі випробувань (мінімум 6–8 атм) і манометрами з верхньою межею 1,6 МПа, а також круглим деком (\varnothing 40 см) з горючою рідиною (дизельне паливо з додаванням бензину, марки А-95 (ДСТУ 3675-98)).

Результати. В умовах проведення випробування тривалість гасіння осередку займання (вогнище класу «В», площею 0,126 м²) 40% водним розчином ферум(III) сульфату становить 5 с. Вогнегасна ефективність водної вогнегасної речовини стосовно води з урахуванням тривалості та витрат на гасіння вуглеводневого полум'я підвищується у 4,9 раза.

Висновки. Експериментальні дослідження показали, що нетривала дія аерозолем 40% водного розчину ферум(III) сульфату безпосередньо на полум'я зумовлює його доволі ефективне гасіння. Встановлено, що в умовах експерименту тривалість гасіння полум'я аерозолем водної вогнегасної речовини становить 5 с, що у 4,9 раза ефективніше за гасіння водою. Мінімальний об'єм витраченого 40% водного розчину ферум(III) сульфату на гасіння полум'я становить 0,2 л/м².

Ключові слова: вогнегасіння, водні вогнегасні речовини, неорганічні солі *d*-металів, інгібітори горіння.

М. Ya. Karvats'ka, P. V. Pastuhov, V. L. Petrovskii, O. I. Lavrenyuk, B. M. Mykhalitchko

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

FIRE EXTINGUISHING TESTS OF CONCENTRATED AQUEOUS SOLUTION OF FERRUM(III) SULPHATE

Introduction. One of the priority tasks of fire safety and, in particular, fire extinguishing is the search for new extinguishants that can have a significant fire extinguishing effect, i.e. very effectively stopping the spread of flames. Because of this, promising substances that could be used to develop a new generation of aqueous fire extinguishers are inorganic iron salts and *d*-metal atoms, which can show a great tendency to chemical bonding with heteroatoms of various combustible substances and with active flame particles.

Purpose. The work aims to test the fire extinguishing properties of a concentrated aqueous solution of ferrum(III) sulphate and experimentally establish the quantitative parameters of the aerosol extinguishing of a class "B" fire.

Methods. Fire-extinguishing tests of the concentrated aqueous solution of ferrum(III) sulphate in the open space, were carried out according to the developed method on a flame extinguishing system consisting of a pneumatic spray

(Record 2200 ESO) with a built-in tank (0.5 L) and spray nozzle (\varnothing 1.2 mm), a compressed air cylinder equipped with a pressure reducer in the test system (minimum 6-8 atm.) and manometers with an upper limit of 1.6 MPa, as well as the circular deck (\varnothing 40 cm) with combustible liquid (diesel fuel with addition of gasoline, the A-95 brand (DSTU 3675-98)).

Results. Under the conditions of the test, the duration of extinguishing the ignition centre (class "B", area – 0.126 m²) with 40% aqueous solution of ferrum(III) sulphate is 5 s. The fire-extinguishing efficiency of an aqueous fire-extinguishing agent concerning water, taking into account the duration and feed of extinguishing a hydrocarbon flame, increases 4.9 times.

Conclusion. Experimental studies have shown that the short-term aerosol action of 40% aqueous solution ferrum(III) sulphate directly on the hydrocarbon flame causes it to be quite effectively extinguished. It was found that under the conditions of the experiment, the duration of extinguishing the flame with an aerosol of a water-extinguishing agent is 5 s, which is 4.9 times more effective than water. The minimum volume of 40% aqueous solution of ferrum(III) sulphate used to extinguish the flame is 0.2 L/m².

Keywords: fire-extinguishment, aqueous fire-extinguishing agents, inorganic salts of *d*-metal, inhibitors of combustion.

Постановка проблеми. Широке застосування води як вогнегасного засобу зумовлене її унікальними властивостями. Це, насамперед, екологічна чистота, відсутність шкідливого впливу на людей, доступність та дешевизна, можливість тривалого зберігання без зміни властивостей, легкість транспортування та застосування, термічна стійкість, поглинання теплового випромінювання тощо. Вогнегасна дія води на осередок пожежі проявляється завдяки охолодженню, ізолюванню чи розбавленню. Цей ефект можна суттєво посилити, створивши над осередком пожежі водну аерозольну завісу. Завдяки такому аерозольному пожежогасінню, витрати води на одиницю площі пожежі, а отже, й тривалість гасіння пожеж, суттєво знижуються.

Однак вода – хімічно інертна відносно більшості горючих речовин і матеріалів, тому не здатна проявляти інгібуючу дію на полум'я. Одним із доволі перспективних методів покращення унікальних фізико-хімічних властивостей води є отримання водних розчинів з використанням різноманітних хімічно активних речовин. При потраплянні водного розчину в зону горіння відбувається випаровування води. Це призводить до вивільнення активних частинок, які дезактивують вільні радикали, відповідальні за перебіг реакції горіння. В результаті відбувається обрив ланцюгів та припинення горіння [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізуючи дослідження в галузі нових досягнень в пожежогасінні, найчастіше у ролі розчинених у воді вогнегасних речовин, інгібіторів горіння, використовують солі лужних металів [2] та фосфорвмісні сполуки [3]. Зокрема, авторами роботи [4] встановлено, що органічні солі лужних металів (K₂C₂O₄, CH₃COOK), є значно ефективнішими аніж неорганічні солі (KCl, KHCO₃, K₃PO₄). Ефективність придушення полум'я водними розчинами, що містять сполуки фосфору, знижується в ряду K₃PO₄ > NH₄H₂PO₄ > H₃PO₄. Передбачено, що вогнегасна ефективність хімічної добавки залежить не лише від її хімічної природи, тривалості перебування в зоні горіння, а й від складу продуктів розкладу.

Результати досліджень, наведені у роботі [5], показали, що найефективнішою добавкою для підвищення вогнегасної дії води є K₂CO₃. Порівняно із чистою водою ефективність пожежогасіння водним розчином при вмісті солі 1%, 2% і 5% зростає на 37,6%, 47,2% і 64,8% відповідно. Зменшення ефективності інших солей (K₂C₂O₄ > CH₃COOK > KNO₃ > KCl > KH₂PO₄) пояснюється утворенням при розкладі солей різних активних речовин.

Як свідчать літературні дані [6], використання 10% розчину KHCO₃ скорочує середній час згасання гептанового полум'я до 96% (з 154,6 с до 5,5 с) порівняно з чистою водою. Інші випробувані добавки (NaCl, KCl) мали менш помітний ефект, тоді як (NH₄)₂HPO₄, (NH₄)₂CO фактично збільшували час, необхідний для гасіння полум'я.

Привертають увагу публікації, які стосуються розробки нових вогнегасних речовин на основі солей перехідних металів [7, 8]. Ефективність придушення полум'я аерозолями водних розчинів перехідних металів зумовлена здебільшого особливими хімічними властивостями цих металів як акцепторів електронів чи акцепторів хімічних радикалів, що утворюються в полум'ї. Саме ця особливість забезпечує цим водним вогнегасним композиціям високу здатність призупиняти поширення полум'я [9].

Серед відомих водних вогнегасних речовин на основі солей *d*-металів, використовуються здебільшого хлориди кобальту(II), нікелю(II) мангану(II), феруму(II) тощо. Особливої уваги заслуговують комплексні сполуки калію і феруму [10]. Так, доволі ефективними щодо придушення полум'я виявились концентровані водні розчини калій гексаціаноферату(II) – K₄[Fe(CN)₆] та калій гексаціаноферату(III) – K₃[Fe(CN)₆] [11]. Зокрема, концентрований водний розчин калій гексаціаноферату(III) доволі дієво придушує полум'я лісових пожеж. На жаль, використання K₃[Fe(CN)₆] як інгібітора горіння має один істотний недолік. Насамперед йдеться про утворення в полум'ї високотоксичних продуктів термічного розкладання цієї солі.

З огляду на це, перспективними речовинами, які можна було б використати для розробки водних вогнегасних речовин нового покоління, є інші нетоксичні солі феруму, атоми *d*-металу яких теж спроможні будуть проявляти схильність до інгібування активних частинок полум'я [12].

Мета роботи. Провести випробування вогнегасних властивостей концентрованого водного розчину ферум(III) сульфату та експериментальним шляхом встановити кількісні параметри аерозольного гасіння осередку займання класу «В».

Методи дослідження. Вогнегасні випробування концентрованого водного розчину ферум(III) сульфату на відкритому просторі, проводили за розробленою методикою, описаною в [13], на установці для гасіння полум'я, що складається з пневматичного розпилювача (Record 2200 ESO) з вбудованою ємністю (0,5 л) і насадкою розприскувача (Ø 1,2 мм), балона зі стисненим повітрям, оснащеного редуктором для створення тиску в системі випробувань (мінімум 6–8 атм) і манометрами з верхньою межею 1,6 МПа, а також

круглим деком (Ø 40 см) з горючою рідиною (дизельне паливо з додаванням бензину, марки А-95 (ДСТУ 3675-98)). Коефіцієнт підвищення вогнегасної ефективності ВВР (K_1) обчислювали стосовно води за формулою:

$$K_1 = V_{\text{вода}}/V_{\text{ВВР}}$$

Виклад основного матеріалу. Для приготування водної вогнегасної речовини (ВВР) та дослідження її вогнегасних властивостей використовували такі хімічні речовини: неорганічна сіль *d*-металу (основа ВВР) – ферум(III) сульфат нонагідрат $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (жовто-коричневі кристали, $M_r = 562,04$, $\rho = 2,1 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$, розчинність у воді (г/100г H_2O) – 440 при 20°C); осередок займання (модельне вогнище класу «В»): дизельне паливо ($M_r = 204$, $\rho = 0,824(1) \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$, $T_{\text{кипіння}} = 246^\circ\text{C}$, $T_{\text{спалаху}} = 65^\circ\text{C}$, $T_{\text{самозаймання}} = 210^\circ\text{C}$, $T_{\text{полум'я}} = 1100^\circ\text{C}$). Усі реагенти були придбані через комерційні джерела та використані без подальшого очищення. Характеристики вимірювальних приладів, які використовувались для вогнегасних випробувань ВВР, подані в таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики вимірювальних приладів

№ з/п	Найменування приладу чи пристрою	Заводський номер	Границя вимірювання	Клас точності або похибка вимірювання
1	Установка для гасіння полум'я (Record 2200 ESO) з насадкою спринку (діаметр отвору 1,2 мм)	б/н	–	–
2	Секундомір СОП	8625	Від 0 до 3600 с	$\pm 0,2$ с
3	Ваги ТВЕ 150	049	Від 0,04 до 150,0 кг	Кл. точн. 4
4	Лінійка вимірювальна	б/н	Від 0 до 1000 мм	$\pm 0,5$ мм
5	Пружинний манометр	68808	Від 0 до 16 кгс/м ²	$\pm 0,4$ %
6	Анемометр АСО-3	1179	Від 0,1 до 5 м/с	$\pm 0,1$ %
7	Віскозиметр ВПЖ-2 (внутрішній діаметр капіляра 0,73 мм)	б/н	–	–
8	рН-метр 150МІ	б/н	–	–

Для створення осередку горіння, використовували модельне вогнище класу «В» (ДСТУ 3734-98). На рівну основу клали кругле деко (глибина 0,15 м; діаметр 0,40 м) з горючою рідиною (суміш аліфатичних вуглеводнів з такими показниками якості: початок температури кипіння – не нижче ніж 84°C , кінець – не вище 105°C ; різниця між температурою початку і кінця кипіння – не більша за 10°C ; вміст ароматичних вуглеводнів – не перевищував 1 об %; питома густина за температури 15°C – $0,80(2) \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$). Деко наповнили 8000(1) мл води і 4000(1) мл пального.

ВВР на основі $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ – 40% водний розчин ферум(III) сульфату – отримували шляхом розчинення солі феруму у воді. Кристалічний $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (1283 г, 2,3 моля) додавали до 1000 мл води, потім суміш нагрівали до температури

$70\text{--}80^\circ\text{C}$ до повного розчинення солі. Отриманий розчин необхідно обов'язково підкислити концентрованою H_2SO_4 (2 мл), щоб уникнути гідролізу $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ та подальшого осадження $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Утворений водний розчин $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ темно-коричневого кольору охолоджували до кімнатної температури.

Характеристики отриманого концентрованого водного розчину $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ визначали деякими фізико-хімічними методами. Кінематичну (ν) та динамічну в'язкість (η) вимірювали методом віскозиметрії (віскозиметр ВПЖ-2, внутрішній діаметр капіляра 0,73 мм). Питома густина (ρ) визначена пікнометричним методом; кислотність (рН) була виміряна за допомогою рН-метра 150МІ. Температуру замерзання розчину обчислювали за другим законом Рауля. Фізико-хімічні властивості розробленої ВВР, наведені в таблиці 2.

ВВР	ρ (г·см ⁻³)	ν (мПа·с)	η (мПа·с·г·см ⁻³)	pH	$T_{\text{замерзання}}$ (°C)
40% Fe ₂ (SO ₄) ₃	1,457(1)	8,602(1)	12,53(3)	1,07	-9,2

Установка, яка використовувалась для гасіння полум'я, показана на рис. 1. Деко наповнювали водопровідною водою і неполярним вуглеводнем з об'ємним співвідношенням води і палива 2:1. Підготовлене модельне вогнище класу «В» підпалювали. Після вільного горіння протягом 60 ± 1 с подавали з зону горіння аерозоль ВВР. Фіксували тривалість гасіння, що дорівнювала проміжку часу від початку подавання розчину до повного припинення горіння. Усі експерименти проводилися на відкритій місцевості, де швидкість

вітрового потоку поблизу вогню не перевищувала $0,5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, а температура атмосфери коливалася в межах від 15 до 20°C. Відповідно до розміру дека ($S = 0,126 \text{ м}^2$) необхідно було встановити сопло пневморозприскувача так, щоб струмінь аерозолю повністю покривав всю поверхню дека. Зазначені параметри установки, які здатні забезпечити отримання відтворюваних результатів, були такими: $L = 110 \text{ см}$, $\alpha = 30^\circ$, $\varnothing_{\text{отвору розприскування}} = 1,2 \text{ мм}$, $P_{\text{виходу аерозолю}} = 6 \text{ атм}$, $Q = 0,0050\text{--}0,0070(2) \text{ л}\cdot\text{с}^{-1}$ (див. рис. 1).

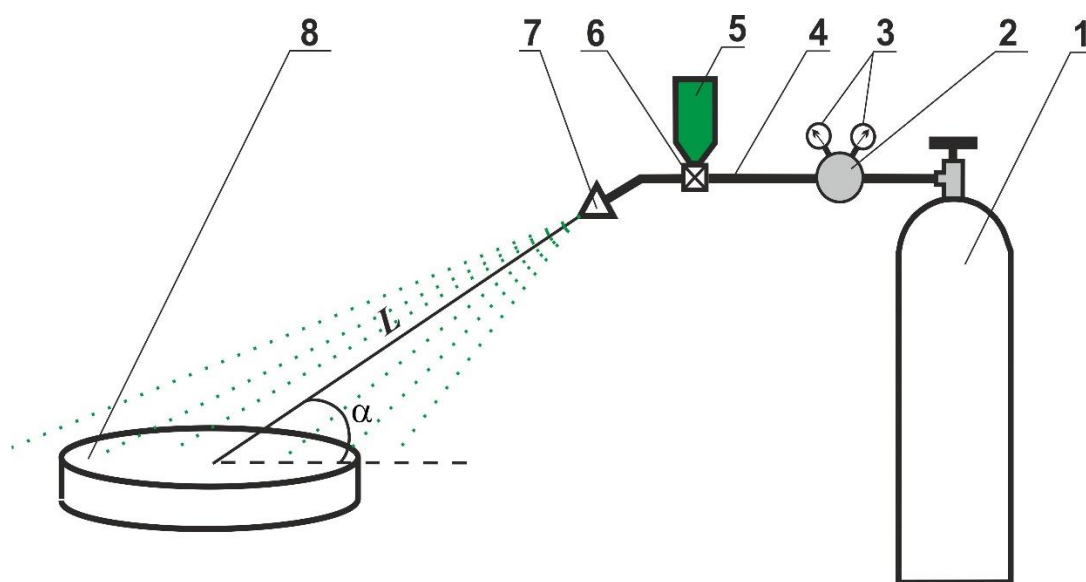


Рисунок 1 – Схема установки для проведення вогнегасних випробувань ВВР:

- 1 – балон зі стисненим повітрям; 2 – редуктор; 3 – манометри; 4 – з'єднувальні шланги;
5 – контейнер для подачі ВВР; 6 – механізм пучка пневморозприскувача;
7 – розприскувальна насадка; 8 – деко з горючою рідиною (вогнище класу «В»)

Вогнегасні випробування ВВР на відкритій місцевості проводили для 40% водного розчину Fe₂(SO₄)₃, а також для водопровідної води. Результати зіставляли з характеристиками гасіння модельного вогнища класу В 40% водним розчином CuCl₂ [14], перерахованим на площу

дека $0,126 \text{ м}^2$. Кожне випробування повторювали тричі. Результат вважався позитивним, якщо тривалість гасіння полум'я не перевищувала 30 с. Усереднені результати триразових вимірювань для кожного експерименту наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Усереднені результати вогнегасних випробувань ВВР на основі Fe₂(SO₄)₃

ВВР	$V_{\text{ВВР}}$ (л)	$\Delta t_{\text{гасіння}}$ (с)	K_1
Водогінна вода	0,1224(2)	17	1,0
40% Fe ₂ (SO ₄) ₃	0,0250(2)	5	4,9
40% CuCl ₂ [14]	0,0062(2)	2	19,6

В умовах проведення випробування тривалість гасіння осередку займання (вогнище класу «В») 40% водним розчином ферум(III) сульфату становить 5 с. Вогнегасна ефективність водної вогнегасної речовини стосовно води з урахуванням тривалості та витрат на гасіння вуглеводневого полум'я підвищується у 4,9 раза.

Результати вогнегасного випробування CuCl_2 -вмісного ВВР, які проводились раніше [14], засвідчили, що вогнегасна ефективність 40% водного розчину CuCl_2 є у 19,6 раза більшою, ніж водопровідної води і в 4 рази більш ефективною, ніж 40% водний розчин $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (див. табл. 3). Це можна пояснити збільшенням продуктивності подачі вогнегасного розчину ($Q_{\text{ВВР}}$). Так значення $Q_{\text{ВВР}}$ для CuCl_2 -вмісного розчину стосовно $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ -вмісного розчину збільшується завдяки меншій в'язкості ВВР на основі CuCl_2 . Так, експериментально встановлено, що за однакових умов час, необхідний для гасіння вогнища пожежі класу «В» за допомогою 40% водного розчину CuCl_2 , становить всього 2 с. Для порівняння, тривалість гасіння того ж полум'я 40% водним розчином $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ за тих самих умов становить 5 с.

Висновки. Експериментальні дослідження показали, що нетривала дія аерозолем 40% водного розчину ферум(III) сульфату безпосередньо на полум'я зумовлює його доволі ефективне придушення. Встановлено, що в умовах експерименту тривалість гасіння полум'я, зумовлена горінням неполярних вуглеводнів, аерозолем водної вогнегасної речовини становить 5 с, що у 4,9 раза ефективніше за воду. Мінімальний об'єм витраченого 40% водного розчину ферум(III) сульфату на повне припинення горіння становить $0,2 \text{ л/м}^2$.

Список літератури:

1. Жартовський С.В., Коваль О.Д., Маладика І.Г., Кришталь В.М. Дослідження реологічних властивостей водної вогнегасної речовини ФСГ-2. Пожежна безпека: теорія і практика. 2012. № 9. С. 53–60.
2. Kuang K., Chow W., Ni X. et al. Fire suppressing performance of superfine potassium bicarbonate powder. *Fire and Materials*. 2011. V. 35(6). P. 353–366.
3. Jayaweera T., Fisher E., Fleming J.W. Flame suppression by aerosols derived from aqueous solutions containing phosphorus. *Combustion and Flame*. 2005. V. 141(3). P. 308–321.
4. 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. V. 34(1). P. 51–68.

5. 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. V. 122. P. 429–438.

6. 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. V. 58. P. 221–225.

7. Linteris G.T., Knyavez V.D., Babushok V.I. Inhibition of premixed methane flames by manganese and tin compounds. *Combustion and Flame*. 2002. V. 129 (3). P. 221–238.

8. Linteris G.T., Rumminger M.D., Babushok V.I. Catalytic inhibition of laminar flames by transition metal compounds. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008. V. 34 (3). P. 288–329.

9. Linteris G.T., Katta V.R., Takahashi F. Experimental and numerical evaluation of metallic compounds for suppressing cup-burner flames. *Combustion and Flame*. 2004. V. 138 (1-2). P. 78–96.

10. Shmakov A.G., Korobeinichev O.P., Shvartsberg V.M., Yakimov S.A., Knyazkov D.A., Komarov V.F., Sakovich G.V. Testing organophosphorus, organofluorine, and metal-containing compounds and solid-propellant gas-generating compositions doped with phosphorus-containing additives as effective fire suppressants. *Combustion Explosion and Shock Waves*. 2006. V. 42, N 6. P. 678–687.

11. 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. V. 46, N 1. P. 16–20.

12. Korobeinichev O., Shmakov A., Chernov A., Bolshova T., Terenteva Ya., Borisov G. The influence of $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ aerosol on the flame speed of methane-air flame. *Procedia Engineering*. 2013. V. 62. P. 331 – 336.

13. Mykhalitchko B.M., Shcherbina O.N., Godovanets N.N., Petrovskii V.L. Experimental determination technique of extinguishing efficiency of aqueous solutions of mineral salts. *Fire Safety*. 2013. V. 22. P. 183–187.

14. 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. V. 105. P. 188–195.

References:

1. Zhartovs'kyi S.V., Koval' O.D., Maladyka I.H., Kryshthal' V.M. (2012) Doslidzhennya reolohichnykh vlastyvostey vodnoyi vohnehasnoyi rehovyny FSG-2 [Investigation of rheological

properties of aqueous fire extinguishing substance FSG-2] *Pozhezhna bezpeka: teoriya i praktyka*. N 9. P. 53–60.

2. Kuang K., Chow W., Ni X. et al. (2011) Fire suppressing performance of superfine potassium bicarbonate powder. *Fire and Materials*. V. 35(6). P. 353–366.

3. Jayaweera T., Fisher E., Fleming J.W. (2005) Flame suppression by aerosols derived from aqueous solutions containing phosphorus. *Combustion and Flame*. V. 141(3). P. 308–321.

4. 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*. V. 34(1). P. 51–68.

5. Zhang Tianwei, Liu Hao, Han Zhiyue, Du Zhiming, Wang Yong (2017) Active substances study in fire extinguishing by water mist with potassium salt additives based on thermoanalysis and thermodynamics. *Applied Thermal Engineering*. V. 122. P. 429–438.

6. 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*. V. 58. P. 221–225.

7. Linteris G.T., Knyavez V.D., Babushok V.I. (2002) Inhibition of premixed methane flames by manganese and tin compounds. *Combustion and Flame*. V. 129 (3). P. 221–238.

8. 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*. V. 34 (3). P. 288–329.

9. Linteris G.T., Katta V.R., Takahashi F. (2004) Experimental and numerical evaluation of metallic compounds for suppressing cup-burner flames. *Combustion and Flame*. Vol. 138, N 1-2. P. 78-96.

10. Shmakov A.G., Korobeinichev O.P., Shvartsberg V.M., Yakimov S.A., Knyazkov D.A., Komarov V.F., Sakovich G.V. (2006) Testing organophosphorus, organofluorine, and metal-containing compounds and solid-propellant gas-generating compositions doped with phosphorus-containing additives as effective fire suppressants. *Combustion Explosion and Shock Waves*. Vol. 42, N 6. P. 678–687.

11. 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*. Vol. 46, N 1. P. 16–20.

12. 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*. Vol. 62. P. 331 – 336.

13. Mykhalitchko B.M., Shcherbina O.N., Godovanets N.N., Petrovskii V.L. (2013) Experimental determination technique of extinguishing efficiency of aqueous solutions of mineral salts. *Fire Safety*. Vol. 22. P. 183–187.

14. Mykhalitchko B., Lavrenyuk H., Mykhalitchko O. (2019) New water-based fire extinguishant: elaboration, bench-scale tests, and flame extinguishment efficiency determination by cupric chloride aqueous solutions. *Fire Safety Journal*. Vol. 105. P. 188–195.

© М. Я. Карвацька, П. В. Пастухов,
В. Л. Петровський, О. І. Лавренюк,
Б. М. Михалічко, 2022.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 22.04.2022.

Прийнято до публікації 17.05.2022.