



*В.-П. О. Пархоменко, О. І. Лавренюк, К. Ф. Лиходід, Б. М. Михалічко*  
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

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

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

<https://orcid.org/0009-0007-0030-9613> – К. Ф. Лиходід

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



[pvpo2018@gmail.com](mailto:pvpo2018@gmail.com)

## ТЕХНОЛОГІЯ ПРИГОТУВАННЯ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НОВОЇ ВОДНОЇ ВОГНЕГАСНОЇ РЕЧОВИНИ

**Вступ.** Для ліквідації аварійних ситуацій природного та техногенного характеру, пов'язаних з горінням різноманітних органічних речовин, зокрема продукції нафтопереробної галузі чи полімерних матеріалів, постає нагальна потреба в розробці нових вогнегасних засобів, які здатні були б ефективно гасити полум'я, тобто проявляти високу вогнегасну дію. Серед різноманітних представників вогнегасних засобів найбільш широко застосування набули вогнегасні речовини на водній основі. До цієї групи водних вогнегасних речовин (ВВР) відносять водні розчини солей лужних та лужноземельних металів, а також неорганічних солей перехідних металів. Проте ці ВВР здатні ефективно придушувати полум'я пожежі лише за умови досягнення високої концентрації розчиненої солі у воді, приблизно 40% і більше. А це, зазвичай, негативно позначається на технологічних та деяких фізико-хімічних властивостях ВВР (текучості та в'язкості розчинів, здатності розчинених солей піддаватись гідролізу тощо). Тому для вибору найбільш ефективних засобів гасіння пожеж важливо мати інформацію про фізико-хімічні властивості ВВР та фізико-хімічні параметри процесів, що відбуваються під час горіння та гасіння.

**Мета.** Розробити особливу технологію приготування концентрованого водного розчину амоній карбонату, вивчити фізико-хімічні властивості отриманої ВВР, що дасть змогу спрогнозувати доцільність використання цієї ВВР як вогнегасного засобу, придатного для аерозольного гасіння осередків займань класу «В».

**Методи.** Препаративний метод отримання концентрованого водно-амоніачного розчину амоній карбонату, включаючи емпіричний підбір співвідношення компонентів ВВР та визначення фізико-хімічних властивостей отриманої ВВР аналітичними методами.

**Результати.** Водну вогнегасну речовину на основі амоній карбонату отримували з  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  та 25% водного розчину амоніаку. Така технологія приготування цієї ВВР унеможливило подальший гідроліз солі, утвореної слабкою карбонатною кислотою та слабкою основою (амоній гідроксидом). Вивчено фізико-хімічні властивості розробленої ВВР.

**Висновки.** Завдяки розробленій технології отримано нову ВВР у вигляді концентрованого водно-амоніачного розчину амоній карбонату. Результати проведених досліджень з вивчення фізико-хімічних властивостей отриманої ВВР дали змогу спрогнозувати доцільність використання розробленої ВВР як ефективного вогнегасного засобу, придатного для аерозольного гасіння осередків пожеж класу «В».

**Ключові слова:** водна вогнегасна речовина, амоній карбонат, технологія приготування ВВР, гасіння пожеж, пожежі класу «В».

## PREPARATION TECHNOLOGY AND PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF A NEW AQUEOUS FIRE EXTINGUISHING AGENT

**Introduction.** In order to eliminate natural and man-made emergencies involving the combustion of various organic substances, in particular petroleum products or polymer materials, there is an urgent need to develop new fire extinguishing agents that are capable of effectively extinguishing flames, i.e., exhibiting high fire extinguishing performance. Among the various types of fire extinguishing agents, water-based fire extinguishing substances have become the most widely used. This group of aqueous fire extinguishing agents (AFEAs) includes salts of alkali and alkaline earth metals, as well as inorganic salts of transition metals. However, these AFEAs can only effectively suppress flames if the concentration of dissolved salt in water is high, approximately 40% or more. This usually hurts the technological and some physicochemical properties of WFR (fluidity and viscosity of solutions, the ability of dissolved salts to undergo hydrolysis, etc.). Therefore, in order to select the most effective fire extinguishing agents, it is important to have information about the physicochemical properties of aqueous fire extinguishing agents and the physicochemical parameters of the processes that occur during combustion and extinguishing.

**Aim of research.** Develop a special technology for preparing a concentrated aqueous solution of ammonium carbonate, study the physicochemical properties of the resulting AFEA, which will make it possible to predict the feasibility of using this AFEA as a fire extinguisher suitable for aerosol extinguishing of class "B" fires.

**Methods.** A preparative method for obtaining a concentrated aqueous solution of ammonium carbonate was used, which includes empirical selection of the ratio of components in AFEA. The physicochemical properties of the obtained AFEA were determined using analytical methods.

**Results.** An aqueous fire extinguishing agent based on ammonium carbonate was obtained from  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  and a 25% aqueous solution of ammonia. This technology for preparing the AFEA prevents further hydrolysis of the salt formed by weak carbonic acid and a weak base (ammonium hydroxide). The physicochemical properties of the developed AFEA were studied.

**Conclusions.** Using the developed technology, a new AFEA was obtained in the form of a concentrated aqueous-ammonia solution of ammonium carbonate. The results of studies on the physicochemical properties of the obtained AFEA made it possible to predict the feasibility of using the developed AFEA as an effective fire extinguisher suitable for aerosol extinguishing of class "B" fires.

**Keywords:** aqueous fire extinguishing agent, ammonium carbonate, technology for preparing AFEA, fires extinguishing, class "B" fires.

**Постановка проблеми.** Швидкі темпи зростання світової економіки, в тому числі й економіки України, неможливі без розвитку промислового виробництва, включаючи хімічне виробництво. З іншого боку, зростання об'ємів хімічного виробництва, інтенсифікація функціонування хіміко-технологічних циклів, енергетичне забезпечення випуску хімічної продукції, в тому числі хімічної продукції для потреб військових, особливо в умовах воєнного стану, збільшує вірогідність виникнення пожеж. Для ліквідації аварійних ситуацій природного та техногенного характеру, пов'язаних з горінням різноманітних органічних речовин, зокрема продукції нафтопереробної галузі чи полімерних матеріалів, постає нагальна потреба в розробці нових вогнегасних засобів, які здатні були б ефективно гасити полум'я, тобто проявляти високу вогнегасну дію. Серед різноманітних представників вогнегасних засобів найбільш широко застосування набули вогнегасні речовини на водній основі. До цієї групи водних вогнегасних речовин (ВВР) відносять водні розчини солей лужних та лужноземельних металів, а також неорганічних солей перехідних металів. Перевагами їх застосування в

пожежогасінні є невисока вартість неорганічних солей та відносно низька токсичність виготовлених ВВР. Проте ці ВВР здатні ефективно придушувати полум'я пожежі лише за умови досягнення високої концентрації розчиненої солі у воді, приблизно 40% і більше. А це, зазвичай, негативно позначається на технологічних та деяких фізико-хімічних властивостях ВВР (текучості та в'язкості розчинів, здатності розчинених солей піддаватись гідролізу тощо). Тому для вибору найбільш ефективних засобів гасіння пожеж важливо мати інформацію про фізико-хімічні властивості ВВР та фізико-хімічні параметри процесів, що відбуваються під час горіння та гасіння. Зрозуміти і адекватно пояснити ці процеси можна тільки ґрунтуючись на основних законах хімії [1], хімічної термодинаміки [2] і хімічної кінетики [3].

Отже, розробка нових ВВР, вивчення їх фізико-хімічних властивостей та виявлення перспективи їх застосування як ефективних інгібіторів горіння є доволі актуальним напрямком наукових досліджень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У справі пожежогасіння великого поширення набувають технології аерозольного гасіння

пожеж водними вогнегасними речовинами. Така технологія вогнегасіння найповніше забезпечує реалізацію унікальних фізико-хімічних властивостей води та інгібувальної функції розчинених у воді солей [4].

Серед водних вогнегасних речовин найчастіше використовують солі лужних металів, лужноземельних металів та амонію [5]. Більшість цих солей добре розчиняються у воді і в пожежогасінні використовуються у вигляді концентрованих розчинів [6]. Вогнегасну ефективність деяких неорганічних солей калію було досліджено в роботі [7]. Це було покладено в основу розробки ВВР на основі  $K_2CO_3$  [8] та  $KNO_3$  [9] для гасіння пожеж класу «А» та «В».

В роботі [10] запропонована технологія приготування водної вогнегасної композиції, ґрунтуючись на хімічній взаємодії органічних кислот (ацетатної і цитратної) з лугом (KOH) з додаванням неорганічних солей ( $K_2CO_3$ ,  $KHCO_3$ ,  $K_4P_2O_7$ ,  $NaHCO_3$  тощо) для стабілізації реакції.

У світовій літературі [11–18] відомі непоодинокі спроби використання ВВР на основі солей перехідних металів. Ефективність аерозольного гасіння пожеж водними розчинами цих солей зумовлена, насамперед, особливими хімічними властивостями *d*-металів як акцепторів електронів, що у підсумку забезпечує цим вогнегасним композиціям високу вогнегасну здатність. В цих роботах як інгібітори горіння використовувались такі солі перехідних металів, як  $CoCl_2$ ,  $NiCl_2$ ,  $MnCl_2$ ,  $FeCl_2$  тощо. Деякі з цих солей виявились більш ефективними інгібіторами горіння, ніж відомі хладони, такі як  $CF_3Br$ .

Особливої уваги заслуговують координаційні сполуки калію і феруму [19], які були використані для приготування ВВР. Зокрема? концентровані водні розчини калій гексаціаноферату(II) –  $K_4[Fe(CN)_6]$  (жовтої кров'яної солі) і, особливо, калій гексаціаноферату(III) –  $K_3[Fe(CN)_6]$  (червоної кров'яної солі) [20] виявились доволі ефективними вогнегасними речовинами. Зокрема, 30% водний розчин червоної кров'яної солі при гасінні лісових пожеж виявився спроможним ефективно придушувати як полум'яне горіння, так і тління.

Доволі перспективними речовинами, які використовуються для створення ВВР, є неорганічні солі купрум(II). В роботах [21, 22] як ВВР використали концентровані водні розчини  $CuCl_2$  і  $K_2[CuCl_4]$  для гасіння осередків займань класу «В». Серед цих ВВР особливої уваги заслуговує виготовлений за особливою технологією 40% водний розчин  $CuCl_2$ , який в умовах аерозольного гасіння осередків пожеж класу «В» (дизельне пальне) проявив неабияку

вогнегасну ефективність [21]. Вогнегасна ефективність цієї ВВР є наслідком особливої термолітичної поведінки купрум(II) хлориду в полум'ї. Після потрапляння аерозолю водного розчину  $CuCl_2$  в полум'я розпочинаються складні фізико-хімічні перетворення, які призводять до переривання ланцюгових реакцій в полум'ї.

**Мета роботи.** Розробити особливу технологію приготування концентрованого водного розчину амоній карбонату, вивчити фізико-хімічні властивості отриманої ВВР, що дасть змогу спрогнозувати доцільність використання цієї ВВР як вогнегасного засобу, придатного для аерозольного гасіння осередків пожеж класу «В».

**Експериментальна частина.** Вибір неорганічної солі для приготування водної вогнегасної речовини супроводжувався детальним аналізом стосовно доступності, вартості, та можливого токсичного чи іншого шкідливого впливу на живі організми та довкілля не лише вихідної вогнегасної речовини, а й продуктів термічного розкладання ВВР після її потрапляння в полум'я.

Для приготування ВВР як вогнегасну речовину використали дуже поширену в хімічному синтезі неорганічну сіль – амоній карбонат, а як розчинник – 25% водний розчин амоніаку. Синтез концентрованого водно-аміачного розчину амоній карбонату ґрунтувався на високій хімічній спорідненості катіонів амонію неорганічної солі та розчиненої у воді слабкої основи –  $NH_4OH$ , а також на здатності амоній гідроксиду ефективно призупиняти гідроліз  $(NH_4)_2CO_3$ , перебіг якого є вкрай небажаним в процесі приготування та подальшій експлуатації ВВР.

Водна вогнегасна речовина – 50% водно-аміачний розчин амоній карбонату – призначалася для гасіння осередків пожеж класу «В» з використанням технології аерозольного гасіння. ВВР готували розчиненням  $(NH_4)_2CO_3$  у 25% водному розчині амоніаку.

50% водно-аміачний розчин амоній карбонату отримували розчиненням 100,1 масових частин  $(NH_4)_2CO_3$  у 100 масових частинах 25% водного розчину амоніаку (тобто, масове співвідношення інгредієнтів становило 1:1). До 1 л 25% водного розчину амоніаку додавали 10,4 моля (1001 г) амоній карбонату, після чого суміш перемішували при кімнатній температурі до повного розчинення солі. В процесі розчинення  $(NH_4)_2CO_3$  розчин помітно охолоджувався. Після досягнення кімнатної температури ВВР була готова до використання. Питому густину 50% водно-аміачного розчину амоній карбонату визначали гравіметрично: після

зважування 1 см<sup>3</sup> ВВР, його густина ( $d$ , г/см<sup>3</sup>) становила 1,26. Для встановлення інших фізико-хімічних характеристик розчину, таких як температура замерзання, потрібно перерахувати масову частку ( $\omega$ , %) розчину у молярну ( $C_M$ , моль/л) і моляльну ( $C_m$ , моль/1 кг розчинника) концентрації за формулами:

$$C_M = \frac{\omega \cdot 10 \cdot d_{\text{ВВР}}}{M_{(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3}};$$

$$C_m = \frac{\omega \cdot m_{\text{ВВР}} \cdot 10}{M_{(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3} \cdot m_{\text{розчинника}}}.$$

Скориставшись другим законом Рауля обчислювали температуру замерзання ВВР за формулою:

$$\Delta T_{\text{зам.}} = -K_{\text{води}} \cdot C_m \cdot i,$$

де  $\Delta T_{\text{зам.}}$  – зниження температури замерзання ВВР стосовно води ( $\Delta T_{\text{зам.}} = T_{\text{зам. ВВР}} - T_{\text{зам. води}}$ ),  $K_{\text{води}}$  – криоскопічна стала, яка для води становить 1,86 К·г/моль,  $i$  – ізотонічний коефіцієнт, який для розчину  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  становить 3.

Водневий показник (рН) для отриманої ВВР визначали експериментально за допомогою рН-метра AD1030 ADWA.

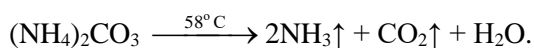
Фізико-хімічні властивості 50% водно-аміачного розчину амоній карбонату та значення молярної та моляльної концентрацій наведені в табл. 1.

Таблиця 1

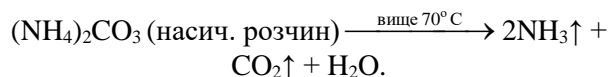
Фізико-хімічні характеристики ВВР

ВВР	$d$ (г/см <sup>3</sup> )	$C_M$ (моль/л)	$C_m$ (моль/1кг розчинника)	$T_{\text{замерзання}}$ (°C)	рН
50% водно-аміачний розчин $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	1,26	6,55	10,41	-58	12,1

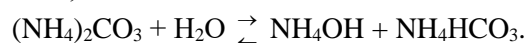
**Виклад основного матеріалу.** Амоній карбонат, який був обраний як вогнегасна речовина – це безбарвні (майже білі) кристали, які при тривалому зберіганні розкладаються вже за кімнатної температури. Однак при температурі 58°C сіль цілковито розпадається на амоніак, вуглекислий газ та воду за реакцією:



В розчиненому стані  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  є більш стійким до нагрівання і розкладається за температури вище 70°C.



Сіль дуже добре розчинна у воді, її коефіцієнт розчинності ( $k_s$ ) при температурі 15°C становить 100,1 г/100 г  $\text{H}_2\text{O}$ . Однак, оскільки амоній карбонат – це сіль, яка утворена слабкою основою (амоніак) та слабкою кислотою (карбонатна кислота), то у водному розчині відбуваються одночасні процеси гідролізу і за катіоном, і за аніоном:



Хоча обидва компоненти і є слабкими електролітами, все ж вони мають різні "сили" (константи дисоціації). Так, гідроліз катіону амонію ( $\text{NH}_4^+$ ) створює кисле середовище. Константа дисоціації амоніаку ( $K_b$  ( $\text{NH}_4\text{OH}$ )) становить  $1,76 \cdot 10^{-5}$ . Натомість, гідроліз карбонат-аніону ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) створює лужне середовище. Константа дисоціації карбонатної кислоти за другим ступенем ( $K_{a2}$  ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ )) становить  $4,69 \cdot 10^{-11}$ . Оскільки карбонат-іон як кислота є "слабшим" (його константа дисоціації значно менша), його здатність приєднувати протони (гідролізуватися) сильніша. Тому лужний вплив карбонату переважає над кислим впливом амоніаку.

Обчислимо рН середовища ВВР виходячи з амоній карбонату і води. Виконання таких обчислень дозволить нам вийти за межі приблизних значень і побачити математичне обґрунтування того, чому розчин має саме таку реакцію середовища. Для солі, утвореної слабкою основою та слабкою кислотою, значення рН у першому наближенні не залежить від концентрації солі (якщо вона достатньо висока) і обчислюється за формулою:

$$\text{pH} = 7 + \frac{1}{2} \text{p}K_{a2} - \frac{1}{2} \text{p}K_b.$$

Для обчислення нам потрібні показники констант дисоціації відповідної кислоти та основи при 25°C. Для амоніаку ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ):

$$\text{p}K_b = -\lg(K_b) = 4,75.$$

Для карбонатної кислоти ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ): оскільки карбонат-іон ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) взаємодіє з водою, утворюючи гідрокарбонат-іон, то для обчислення використовуємо другу константу дисоціації кислоти, отже

$$\text{p}K_{a2} = -\lg(K_{a2}) = 10,33.$$

Підставимо отримані значення  $\text{p}K_b$  і  $\text{p}K_{a2}$  у рівняння:

$$pH = 7 + \frac{1}{2}(10,33) - \frac{1}{2}(4,75) = 9,79.$$

Отже теоретичне значення  $pH = 9,79$ . Однак на практиці для концентрованих розчинів це значення трохи нижче (зазвичай  $9,0 \div 9,5$ ) через декілька факторів:

- Іонна сила: у концентрованих розчинах активність іонів відрізняється від їх концентрації.
- Гідроліз у дві стадії: утворення певної кількості гідрокарбонат-іонів ( $\text{HCO}_3^-$ ), які є менш лужними.
- Леткість амоніаку: частина амоніаку виходить з розчину, що зміщує рівновагу в бік зниження  $pH$ .

При розробці технології приготування ВВР на основі амоній карбонату необхідно також враховувати такі важливі нюанси:

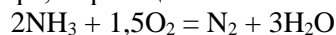
- Нестабільність: амоній карбонат – дуже нестабільна сполука. При розчиненні та перебуванні на повітрі він розкладається з виділенням амоніаку ( $\text{NH}_3$ ) та вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ), а також поступово перетворюється на амоній гідрокарбонат ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ).
- Зміна  $pH$  середовища: у міру того, як з розчину вивітряється амоніак, значення  $pH$  поступово знижується і може наблизитися до  $7,8 \div 8,2$  (характерно для гідрокарбонату).
- Концентрація: чим вища концентрація чистого  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ , тим ближче  $pH$  буде до позначки 9,4.

Отже, якщо для приготування ВВР на основі амоній карбонату за розчинник брати чисту воду, то за певний час концентрація  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  сильно знизиться через гідроліз солі. В результаті замість концентрованого розчину  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  ВВР буде містити, в основному, водний розчин амоній гідрокарбонату ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ) низької концентрації, оскільки значна частина утвореного внаслідок гідролізу  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  випаде в осад через малу розчинність амоній гідрокарбонату у воді. Зазначимо, що розчинність амоній гідрокарбонату при  $20^\circ\text{C}$  становить 21,6 г на 100 г води, що у майже 5 разів менше від розчинності амоній карбонату у воді.

Щоб запобігти негативним процесам, пов'язаним з гідролізом водного розчину амоній карбонату, потрібно змістити рівновагу реакції гідролізу ліворуч шляхом підвищення  $pH$  розчину. Ця проблема вирішується шляхом використання як розчинника 25% водного розчину амоніаку,  $pH$  якого становить 12,5.

На сам кінець варто обговорити можливу ефективність розробленої ВВР на основі амоній карбонату як вогнегасного засобу, придатного для аерозольного гасіння осередків пожеж класу «В». Після потрапляння аерозолу цієї ВВР в полум'я, водно-амоніачний розчин  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  буде миттєво розкладатися з утворенням амоніаку ( $\text{NH}_3$ ), вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) та водяної пари ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Своєю чергою амоніак в полум'ї з легкістю

вступає в реакцію горіння, додатково відводячи таким чином окисник (кисень повітря) з зони горіння. В результаті цієї реакції в полум'ї додатково буде утворюється молекулярний азот та водяна пара, за реакцією:



Оскільки всі згадані газоподібні продукти термоокисної деструкції розробленої ВВР самі по собі проявляють неабияку вогнегасну дію, то неважко спрогнозувати, що 50% водно-амоніачний розчин амоній карбонату матиме високу вогнегасну ефективність у разі гасіння осередків пожеж класу «В» із застосуванням технології аерозольного гасіння.

**Висновки.** Завдяки розробленій технології отримано нову ВВР у вигляді концентрованого водно-амоніачного розчину амоній карбонату. Результати проведених досліджень з вивчення фізико-хімічних властивостей отриманої ВВР дали змогу спрогнозувати доцільність використання розробленої ВВР як ефективного вогнегасного засобу придатного, для аерозольного гасіння осередків пожеж класу «В».

#### Список літератури:

1. Михалічко Б.М. Курс загальної хімії. Теоретичні основи : навч. посіб. Київ: Знання, 2009. 548 с.
2. Рябов І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі : навч. посіб. Харків: в-во АПБУ, 2002. 352 с.
3. Ashmore P.G., King C.V. Catalysis and Inhibition of Chemical Reactions. *Journal of The Electrochemical Society*. 1965. Vol. 112 (1). 13Сб. DOI <https://doi.org/10.1149/1.2423453>
4. Турчин А.І., Антонов А.В. Теоретичні і практичні питання застосування технологій тонкого розпилювання водних вогнегасних речовин. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2008. Т. 17 (1). С. 138–145.
5. Антонов А.В., Боровиков В.О., Орел В.П., Жартовський В.М., Ковалишин В.В. Вогнегасні речовини. Київ: Пожінформтехніка, 2004. 176 с.
6. Турчин А.І., Боровиков В.О., Антонов А.В., Козяр Н.М. Дослідження з визначення показників якості деяких водних вогнегасних речовин. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. Київ, 2008. Т. 18 (2) С. 110–115.
7. Ковалишин В.В., Турчин А.І., Антонов А.В., Козяр Н.М. Патент на винахід № 43403, Україна, МПК А62D1/02 (2009.01). Водопінна вогнегасна речовина на основі фторсинтетичного плівкоутворювального піноутворювача. № u2009 03835; заявл. 21.04.09; опубл. 10.08.09, Бюл. № 15.
8. Антонов А.В., Ковалишин В.В., Турчин А.І., Козяр Н.М. Патент на корисну модель № 52969 U, Україна, МПК А62D 1/02 (2006.01). Водна вогнегасна речовина для гасіння

тонкорозпиленними струменями пожеж класів «А» та «В» за ГОСТом 27331-87 з використанням від  $-30$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . № u200911293; Заявл. 06.11.2009; Опубл. 27.09.2009; Бюл. № 18.

9. Антонов А.В., Ковалишин В.В., Турчин А.І., Вайсман М. Н., Козяр Н.М. Патент на винахід № 96797 С2, Україна, МПК А62D 1/02 (2006.01). Водна вогнегасна речовина для гасіння тонкорозпиленними струменями пожеж класів «А» та «В» за ГОСТом 27331-87. № а200911271; Заявл. 06.11.2009; Опубл. 12.12.2011; Бюл. № 23.

10. Нільссон Йенс Біргер. Патент на винахід № 84683 С2, Україна, МПК С09К 21/00, А62D 1/00, А62D 1/06 (2006.01). Антипіренова композиція та спосіб її одержання. № а200501765; Заявл. 05.08.2003; Опубл. 25.11.2008; Бюл. № 22.

11. Mawhinney J.R. Design of water mist fire suppression systems for shipboard enclosures. Proc. of the Intern. Conf. on Water Mist. Fire Suppression Systems. Boras, Sweden. 1993. P. 16–44.

12. Moore T.A., Weitz C., McCormick S., Clauson M. Laboratory optimization and medium scale screening of iodide salts and water mixtures. Proc. of Halon Option Technicfl Working Conf. Albuquerque, NM. 1996. P. 477–498.

13. Shilling H., Dlugogorski B.Z., Kennedy E.M., Leonardi E. Extinction of diffusion flames by ultra-fine water mist doped with metal chlorides. Proc. of the Sixth Australasian Heat and Mass Transfer Conf. New York, Begell House. 1996. P. 275–282.

14. Zheng R., Rogg B., Bray K.N. Effect of sprays of water and NaCl-water solutions on the extinction of laminar premixed methane-air counter flow flames. *Combust. Sci. Technol.* 1997. V. 126. P. 389–401. DOI <https://doi.org/10.1080/00102209708935687>.

15. Lazzarini A.K., Krauss R.H., Chelliah H.K., Linteris G.T. Extinction conditions of non-premixed flames with fine droplets of water and water/NaOH solutions. *Proc. Combust. Inst.* 2000. V. 28. P. 2939–2945. DOI [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(00\)80719-5](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(00)80719-5).

16. McDonneli D., Dlugogorski B.Z., Kennedy E.M. Evaluation of transition metals for practical fire suppression systems. Proc. of Halon Option Technicfl Working Conf. Albuquerque, NM. 2002. P. 117–124.

17. Linteris G.T., Katta V.R., Takahashi F. Experimental and numerical evaluation of metallic compounds for suppressing cup-burner flames. *Combust. Flame.* 2004. V. 138 (1-2). P. 78–96. DOI <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2004.03.013>.

18. Liu J., Cong B., Liao G. Experimental study on  $\text{CH}_4$ /air fire suppression effectiveness of water mist with metal chloride additives. Book of Abstr. of 32th Intern. Symp. on Combustion. Monreal, Canada. 2008. P. 1F03.

19. 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. *Combust. Explos. Shock Waves.* 2006. V. 42 (6) P. 678–687. DOI <https://doi.org/10.1007/s10573-006-0101-z>

20. 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. *Combust. Explos. Shock Waves.* 2010. V. 46 (1). P. 16–20. DOI <https://doi.org/10.1007/s10573-010-0003-8>

21. 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. V. 105. P. 188–195. DOI <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.003>.

22. Mykhalichko O.B., Godovanets N.M., Shcherbina O.N., Mykhalichko B.M., Preproduction testing extinguishing efficiency of a novel water-based fire-extinguishing agent on basis of  $\text{K}_2[\text{CuCl}_4]$  compound. *Fire safety.* 2014. No. 24. P. 111–115.

#### References:

1. Mykhalichko B.M. (2009). Kurs zahal'noyi khimiyi. Teoretychni osnovy. [General Chemistry Course. Theoretical Foundations] Kyiv: Znannya. 548 s. [in Ukrainian].

2. Ryabov I.B., Saychuk I.V., Sharshanov A.Ya. (2002). Termodynamika i teploperedacha u pozhezhnyy spravi [Thermodynamics and heat transfer in firefighting]. Kharkiv: v-vo APBU. 352 p. [in Ukrainian].

3. Ashmore P.G., King C.V. (1965). Catalysis and Inhibition of Chemical Reactions. *Journal of The Electrochemical Society.* Vol. 112 (1). 13Cb. doi: <https://doi.org/10.1149/1.2423453>

4. Turchyn A.I., Antonov A.V. (2008). Teoretychni i praktychni pytannya zastosuvannya tekhnolohiy tonkoho rozpylyuvannya vodnykh vohnehasnykh rehovyn [Theoretical and practical issues of applying fine spraying technologies for water-based fire extinguishing agents]. *Naukovyy visnyk UkrNDIPB.* T. 17 (1). S. 138-145. [in Ukrainian].

5. Antonov A.V., Borovikov V.O., Orel V.P., Zhartovsky V.M., Kovalyshyn V.V. (2004). Vohnehasni rehovyny [Fire extinguishing substances]. Kyiv: Pozhinformtekhnik. 176 p. [in Ukrainian].

6. Turchyn A.I., Borovikov V.O., Antonov A.V., Kozyar N.M. (2008). Doslidzhennya z vyznachennya pokaznykiv yakosti deyakykh vodnykh vohnehasnykh rehovyn [Research on determining the quality indicators of some aqueous fire extinguishing agents]. *Naukovyy visnyk UkrNDIPB.* T. 18 (2) P. 110-115 [in Ukrainian].

7. Kovalyshyn V.V., Turchyn A.I., Antonov A.V., Kozyar N.M. Patent na vynakhid № 43403, Ukrayina, MPK A62D1/02 (2009.01). Vodopinna

vohnehasna rečovyna na osnovi forsyntetychnoho plivkoutvoryuval'noho pinoutvoryuvacha [Water-based fire extinguishing agent based on a fluorine-synthetic film-forming foaming agent]. № u2009 03835; zayavl. 21.04.09; opubl. 10.08.09, Byul. № 15. [in Ukrainian].

8. Antonov A.V., Kovalyshyn V.V., Turchin A.I., Kozyar N.M. Patent na korysnu model' № 52969 U, Ukrayina, MPK A62D 1/02 (2006.01). Vodna vohnehasna rečovyna dlya hasinnya tonkorozpylenomy strumenyamy pozhezh klasiv «A» ta «V» za HOSTom 27331-87 z vykorystanniam vid -30 do +50°C [Water-based fire extinguishing agent for extinguishing class “A” and “B” fires with finely dispersed jets in accordance with GOST 27331-87 at temperatures ranging from -30 to +50°C]. № u200911293; Zayavl. 06.11.2009; Opubl. 27.09.2009; Byul. № 18. [in Ukrainian].

9. Antonov A.V., Kovalyshyn V.V., Turchin A.I., Weismann M.N., Kozyar N.M. Patent na vynakhid № 96797 S2, Ukrayina, MPK A62D 1/02 (2006.01). Vodna vohnehasna rečovyna dlya hasinnya tonkorozpylenomy strumenyamy pozhezh klasiv «A» ta «V» za HOSTom 27331-87 [Water-based fire extinguishing agent for extinguishing class “A” and “B” fires with finely sprayed jets in accordance with GOST 27331-87]. № a200911271; Zayavl. 06.11.2009; Opubl. 12.12.2011; Byul. № 23. [in Ukrainian].

10. Nilsson Jens Birger. Patent na vynakhid № 84683 S2, Ukrayina, MPK S09K 21/00, A62D 1/00, A62D 1/06 (2006.01). Antypirenova kompozytsiya ta sposib yiyi oderzhannya [Fire retardant composition and method for its preparation]. № a200501765; Zayavl. 05.08.2003; Opubl. 25.11.2008; Byul. № 22. [in Ukrainian]

11. Mawhinney J.R. (1993). Design of water mist fire suppression systems for shipboard enclosures. Proc. of the Intern. Conf. on Water Mist. Fire Suppression Systems. Boras, Sweden. P. 16-44.

12. Moore T.A., Weitz C., McCormick S., Clauson M. (1996). Laboratory optimization and medium scale screening of iodide salts and water mixtures. Proc. of Halon Option Technicfl Working Conf. Albuquerque, NM. P. 477-498.

13. Shilling H., Dlugogorski B.Z., Kennedy E.M., Leonardi E. (1996). Extinction of diffusion flames by ultra-fine water mist doped with metal chlorides. Proc. of the Sixth Australasian Heat and Mass Transfer Conf. New York, Begell House. P. 275-282.

14. Zheng R., Rogg B., Bray K.N. (1997). Effect of sprays of water and NaCl-water solutions on the

extinction of laminar premixed methane-air counter flow flames. *Combust. Sci. Technol.* V. 126. P. 389-401. doi:

<https://doi.org/10.1080/00102209708935687>

15. Lazzarini A.K., Krauss R.H., Chelliah H.K., Linteris G.T. (2000). Extinction conditions of non-premixed flames with fine droplets of water and water/NaOH solutions. *Proc. Combust. Inst.* V. 28. P. 2939-2945. doi: [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(00\)80719-5](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(00)80719-5)

16. McDonneli D., Dlugogorski B.Z., Kennedy E.M. (2002). Evaluation of transition metals for practical fire suppression systems. Proc. of Halon Option Technicfl Working Conf. Albuquerque, NM. P. 117-124.

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

doi: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2004.03.013>

18. Liu J., Cong B., Liao G. (2008). Experimental study on CH<sub>4</sub>/air fire suppression effectiveness of water mist with metal chloride additives. Book of Abstr. of 32th Intern. Symp. on Combustion. Monreal, Canada. P. 1F03.

19. 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. *Combust. Explos. Shock Waves.* V. 42 (6) P. 678-687. doi: <https://doi.org/10.1007/s10573-006-0101-z>

20. 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. *Combust. Explos. Shock Waves.* V.46 (1). P. 16-20. doi: <https://doi.org/10.1007/s10573-010-0003-8>

21. 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.* V. 105. P. 188-195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.003>

22. Mykhalichko O.B., Godovanets N.M., Shcherbina O.N., Mykhalichko B.M. (2014). Preproduction testing extinguishing efficiency of a novel water-based fire-extinguishing agent on basis of K<sub>2</sub>[CuCl<sub>4</sub>] compound. *Fire safety.* № 24. P. 111-115.

© В.-П. О. Пархоменко, О. І. Лавренюк,  
К. Ф. Лиходід, Б. М. Михалічко, 2026.

**Оглядова стаття.**

Надійшла до редакції 05.03.2026.

Прийнята до друку 29.04.2026.

Опублікована 25.05.2026.