



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.48.2026.01>

*V. M. Balanyuk, N. I. Huzar*

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0853-4229> – В. М. Баланюк

<https://orcid.org/0009-0003-7189-6545> – Н. І. Гузар

✉ [bagr33@ukr.net](mailto:bagr33@ukr.net)

## ВПЛИВ ДОБАВОК КАТАЛІЗАТОРІВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЕРОЗОЛЬУТВОРЮВАЛЬНИХ СПОЛУК

**Проблема.** Пожежі на об'єктах нафтопереробної промисловості та нафтобазах, пов'язані з горінням легкозаймистих рідин, характеризуються високою інтенсивністю тепловиділення, швидким поширенням полум'я та значним виділенням токсичних продуктів горіння. Аналіз реальних пожеж показує складність їх ліквідації та необхідність удосконалення вогнегасних засобів. Перспективним напрямом є застосування вогнегасних аерозольутворювальних сполук (АУС), ефективність яких залежить від їх складу та умов горіння.

**Мета.** Метою роботи є дослідження впливу добавок каталізаторів на повноту згорання, швидкість горіння та вогнегасну ефективність аерозольутворювальних сполук з метою оптимізації їх складу для гасіння пожеж легкозаймистих рідин.

**Методи дослідження.** У роботі застосовано експериментальні методи дослідження, що передбачали визначення швидкості горіння АУС, температури горіння, вогнегасної концентрації та коефіцієнта перетворення сполуки в аерозоль. Дослідження проводились для різних варіантів рецептур із використанням каталізаторів (ферум(III) оксид ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), ферум(II,III) оксид ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), купрум(II) оксид ( $\text{CuO}$ )) та різних співвідношень компонентів.

**Основні результати дослідження.** Встановлено, що введення навіть незначних кількостей каталізаторів істотно впливає на експлуатаційні характеристики АУС. Зокрема, додавання 1 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  забезпечує зростання швидкості горіння АУС приблизно у 3 рази. Вогнегасна концентрація становить близько 24 г/м<sup>3</sup>. Використання каталізаторів підвищує коефіцієнт перетворення в аерозоль приблизно на 3–6 % та дозволяє регулювати швидкість горіння без втрати ефективності.

**Висновки.** Доведено, що застосування каталізаторів є ефективним способом підвищення експлуатаційних характеристик АУС. Запропоновані сполуки відзначаються високою ефективністю, простотою виготовлення та зниженою собівартістю.

**Ключові слова:** аерозольутворювальні сполуки, каталізатори горіння, вогнегасна ефективність, швидкість горіння, вогнегасна концентрація, легкозаймисті рідини, пожежогасіння.

*V. M. Balanyuk, N. I. Huzar*

*Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

## INFLUENCE OF CATALYST ADDITIVES ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF AEROSOL-FORMING COMPOSITIONS

**Problem.** Fires at oil refining facilities and oil depots involving flammable liquids are characterized by high heat release rates, rapid flame spread, and significant emission of toxic combustion products. Analysis of real fires shows the complexity of their extinguishing and the need to improve fire suppression agents. A promising direction is the use of aerosol-forming compounds (AFCs), whose effectiveness depends on their composition and combustion conditions.

**Objective.** The aim of the study is to investigate the influence of catalyst additives on combustion completeness, burning rate, and fire-extinguishing efficiency of AFCs in order to optimize their composition for extinguishing flammable liquid fires.

**Methods.** Experimental methods were applied, including determination of AFC burning rate, combustion temperature, extinguishing concentration, and conversion coefficient into aerosol. Studies were conducted for different formulations using catalysts ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{CuO}$ ) and various component ratios.

**Results.** It was established that even small amounts of catalysts significantly affect the operational characteristics of AFCs. In particular, the addition of 1 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  increases the burning rate of AFCs by 3 times. The extinguishing concentration is approximately  $24 \text{ g/m}^3$ . The use of catalysts increases the conversion coefficient into aerosol by approximately 3–6 % and allows regulation of the burning rate without loss of efficiency.

**Conclusions.** The application of catalysts is proven to be an effective way to improve AFC characteristics. The proposed compounds are distinguished by high efficiency, ease of production, and reduced cost.

**Key words:** aerosol-forming compounds, combustion catalysts, fire-extinguishing efficiency, burning rate, extinguishing concentration, flammable liquids, fire suppression.

**Постановка проблеми.** Пожежі на об'єктах нафтопереробної промисловості становлять одну з найбільш небезпечних категорій аварій, пов'язаних із горючими рідинами. Висока швидкість поширення полум'я, інтенсивне тепловиділення, а також токсичність продуктів горіння ускладнюють процес локалізації та ліквідації таких інцидентів. Прикладом такої небезпечної події є пожежа, що сталася 25 серпня 2023 року на території нафтопереробного заводу Marathon Petroleum у місті Гарівілл (штат Луїзіана, США) [1]. За офіційними даними, приблизно о 6:50 ранку за місцевим часом було зафіксовано витік нафти з одного з резервуарів зберігання. Пари нафти, які швидко поширилися в зоні розливу, зайнялися, утворивши масштабне полум'я поблизу резервуара. Займання супроводжувалося стрімким розповсюдженням вогню в межах технологічного майданчика. Враховуючи властивості нафти як легкозаймистої рідини з низькою температурою спалаху (від 35 до 60 °C), процес горіння супроводжувався значним тепловим навантаженням (близько  $2000\text{--}3000 \text{ кВт/м}^2$  у зоні максимального горіння). Полум'я досягало висоти понад 15 метрів, спричинивши небезпеку розповсюдження пожежі на сусідні резервуари. Пожежа тривала понад сім годин. У гасінні були задіяні місцеві пожежно-рятувальні підрозділи, аварійні бригади підприємства та екологічні моніторингові групи. Основними засобами гасіння виступали пінні генератори, стаціонарні лафетні стволи, а також автономні модулі із застосуванням водо-пінної суміші. Ефективність гасіння була обмежена через високу температуру і складність доступу до осередку горіння [2].

У результаті інциденту постраждало щонайменше вісім працівників, кілька з них були госпіталізовані з ознаками отруєння продуктами горіння. У прилеглих житлових районах було зафіксовано підвищення рівня токсичних речовин у повітрі, зокрема бензену. Серйозна аварія

сталася 15 жовтня 2019 року на паливному складі NuStar Energy в Крокетті, Каліфорнія, що призвела до вибуху та пожежі в двох резервуарах з етанолом. Перший вибух спричинив руйнування даху резервуара, який впав на сусідній резервуар, що призвело до другого вибуху. Кожен резервуар вмщував 126 000 галонів етанолу. Пожежа охопила площу близько 6 гектарів. Вогонь супроводжувався інтенсивним тепловим випромінюванням та утворенням великої кількості токсичних газів і часток, що потрапили в атмосферу. На місце події оперативно прибули понад 200 пожежних-рятувальників та обслуговуючий персонал. Для гасіння вогню використовували піну та воду для охолодження сусідніх резервуарів. Однак через відсутність належного доступу та відключену систему автоматичного пожежогасіння, пожежні-рятувальники зіткнулися з додатковими труднощами [3]. У ніч на 27 лютого 2022 року російські війська завдали ракетного удару по нафтобазі компанії KLO, розташованій у селі Крячки поблизу міста Васильків, Київської області. Близько 00:41 за місцевим часом ракета влучила в резервуари з нафтопродуктами, спричинивши їх займання та серію вибухів. Пожежа швидко поширилася на значну площу, і загроза від неї була помітна навіть у Києві. Через інтенсивні бойові дії в районі Василькова, пожежно-рятувальні підрозділи не могли негайно приступити до гасіння пожежі. Горіння нафтопродуктів супроводжувалося виділенням великої кількості токсичних речовин, зокрема метанолу, що становили загрозу для здоров'я мешканців прилеглих населених пунктів. Пожежа на нафтобазі призвела до значних екологічних та матеріальних збитків. Викиди токсичних речовин у атмосферу спричинили забруднення повітря. Загиблих та поранених внаслідок пожежі не зафіксовано [4].

У ніч на 9 лютого 2024 року російські війська завдали удару по нафтобазі, розташованій у Немишлянському районі Харкова, за допомогою

безпілотних літальних апаратів типу “Шахед”. Близько 23:00 за місцевим часом три безпілотники влучили в резервуари з нафтопродуктами на території нафтобази по вулиці Єнакіївській, 3. Внаслідок удару виникла масштабна пожежа, яка швидко поширилася на прилеглі житлові будинки. За даними місцевої влади, повністю згоріли 15 житлових будинків, ще п’ять були значно пошкоджені. Загинули семеро людей, серед них троє дітей. Екологи зафіксували перевищення гранично допустимих концентрацій нафтопродуктів у повітрі та воді. Зокрема, у річці Немишлі концентрація нафтопродуктів перевищила норму у 95 разів. Пожежу гасили понад 60 годин. Гасіння ускладнювалося тим, що потрібно було чекати повного вигорання палива в резервуарах. Пожежні-рятувальники працювали в умовах високої температури та токсичного диму. Пожежу вдалося повністю ліквідувати лише вранці 12 лютого [5].

Пожежа на нафтобазі призвела до значних екологічних та матеріальних збитків. Викиди токсичних речовин у атмосферу спричинили забруднення повітря, води та ґрунту. Загальна сума збитків, завданих довкіллю, склала понад 157 мільйонів гривень.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Таким чином в результаті проведеного аналізу було встановлено, що питання гасіння пожеж горючих та легкозаймистих рідин є надзвичайно актуальним, а пожежі без ефективного гасіння набувають значних розмірів з катастрофічними наслідками (Табл.1.).

Таким чином, пожежі, що виникають внаслідок розливів легкозаймистих рідин (ЛЗР), є однією з найбільш небезпечних загроз в умовах сьогодення. Враховуючи високий рівень вибухопожежної небезпеки, особливо на відкритих територіях, виникає потреба в ефективних методах та речовинах для гасіння таких пожеж. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми

є використання вогнегасних аерозольотворювальних сполук, які відзначаються високою вогнегасною ефективністю [6]. Вогнегасні аерозольотворювальні сполуки здатні знижувати температуру горіння та забезпечувати ефективне гасіння навіть на відкритому просторі [7]. Однак, для досягнення максимальної ефективності таких засобів необхідно оптимізувати їх склад, зокрема вплив каталітичних добавок на швидкість горіння, повноту згорання та визначити мінімальну вогнегасну концентрацію.

Актуальність даного дослідження полягає в потребі покращення експлуатаційних характеристик АУС шляхом впливу різноманітних комбінацій каталізаторів. Зокрема, важливо з’ясувати, як саме суміші оксидів металів та інших добавок можуть сприяти збільшенню швидкості горіння та покращенню вогнегасної ефективності. Визначення оптимальних умов для підвищення цих параметрів може значно поліпшити якість гасіння пожеж, особливо у випадках, коли швидкість та ефективність мають вирішальне значення.

**Мета статті.** Вивчення впливу добавок каталізаторів на швидкість, повноту згорання та вогнегасну ефективність вогнегасної аерозольотворювальної сполуки, та оптимізація складу АУС для швидкого та більш ефективного гасіння пожеж горючих та легкозаймистих рідин.

**Виклад основного матеріалу.** На даний момент існує значна кількість аерозольотворюючих сполук (АУС), для гасіння пожеж. Більшість сучасних АУС складаються з типових компонентів. Як окисники в рецептурах АУС найчастіше використовують калій нітрат ( $KNO_3$ ), калій перхлорат ( $KClO_4$ ), натрій нітрат ( $NaNO_3$ ) та амоній перхлорат ( $NH_4ClO_4$ ). Роль пального та одночасно зв’язуючої речовини в АУС виконують епоксидні й фенолоформальдегідні смоли, каучуки, а також інші органічні та неорганічні горючі компоненти. Додатково до складу АУС вводять газоутворювачі

Таблиця 1

**Характеристика резонансних пожеж на об’єктах зберігання нафтопродуктів**

№	Місце виникнення	Час виникнення	Час набуття пожежею максимальних показників	Площа пожежі	Тривалість пожежі від виникнення до повної ліквідації
1	Рівненська область, смт. Смига ур. Дружби, 1. Нафтобаза ЛВДС «5-С» (смт. Смига)	03 год. 48 хв	09 год. 07 хв	7000 м <sup>2</sup>	19 год. 14 хв
2	База зберігання нафтопродуктів ТОВ «АТП-М» за адресою: м. Звягель	02 год. 30 хв	3 год. 05 хв	5700 м <sup>2</sup>	20 год. 11 хв
3	Дослідно-промислова установка стабілізації газового конденсату в блочно-комплексному виконанні ТОВ «Сандарт-ОЙЛ-2000», м. Гадяч	18 год. 50 хв	04 год. 10 хв	600 м <sup>2</sup>	9 год. 40 хв

(вуглець, дициандіамід, дифеніламін, гуанідин, карбамід, органічні полімери), а також спеціальні добавки: каталізатори та інгібітори горіння, що призначені для усунення форсу полум'я та оптимізації процесу аерозолетворення [8]. Проте більшість з цих АУС мають ряд недоліків, зокрема вони являють собою багатокомпонентні суміші, що збільшує собівартість складу, мають досить високі температури горіння, в них неможливо регулювати швидкість та температуру горіння, а в склад аерозолу входить багато токсичних речовин. Крім того, виробництво відомих АУС потребує застосування складного обладнання та використання високовартісних компонентів, які використовуються як каталізатори або інгібітори горіння. Наприклад відома аерозольотворююча сполука [9] в якій автори пропонують наступний склад % мас: 65–82  $\text{KNO}_3$ , від 3 до 13,  $\text{KClO}_4$ , від 8 до 15, дициандіаміду та 4–10, епоксидної та фенолформальдегідної смоли та додатково від 3 до 10 оксаміду. Патент вказує, що для виготовлення зазначеної АУС необхідно змішувати компоненти АУС в розчиннику, потім пропускати отриману суміш через прокатний валок на різній швидкості та після видалення розчинника з суміші та подальшого подрібнення отриманої сухої суміші. Після чого суміш пресують, або нагрівають до 90 °С та заливають у відповідні форми. Недоліком зазначеної АУС є те, що при її виготовленні необхідно використання технологічно складних операцій та спеціального температурного режиму.

Відома [10] аерозольотворююча суміш, яка містить натрій перхлорат, калій перхлорат та порошок магнію при наступному вмісті компонентів, мас. %: перхлорат натрію – 35,0–42,0; калій перхлорат – 48,0–55,0; порошок магнію – 8,0–10,0. В патенті вказано, що вогнегасна концентрація аерозолу складає близько 25–40 г/м<sup>3</sup>. Враховуючи, що зазначена АУС містить натрій перхлорат, калій перхлорат, температура горіння такої АУС буде близько 2200 °С, що значно вище ніж більшість АУС. Відповідно зазначена сполука незважаючи на відносну доступність компонентів та легкість виготовлення буде мати суттєвий недолік – високу температуру горіння, що ускладнює її використання при гасінні пожежі. На основі аналізу рецептур вищенаведених [8–10] АУС було запропоновано аерозольотворюючу сполуку АУС1, яка містить калій нітрат, сахарозу, ідітол, дициандіамід та деревну муку. Дана АУС1 характеризується відсутністю можливості регулювання швидкості горіння, неповним згоранням АУС. Неповне згорання не дозволяє АУС повністю перейти в аерозоль, відповідно після її згорання, залежно від співвідношення компонентів, залишається від

7,7 % до 27,0 % мас. незгорілого залишку, що відповідає експериментальним даним коефіцієнта перетворення. Зазначена АУС1 володіє наступною вогнегасною ефективністю, мінімальна концентрація спостерігається для етанолу 12–17 г/м<sup>3</sup> і максимальна для гептану 21–26 г/м<sup>3</sup> (Табл. 2).

Таблиця 2

**Вогнегасна концентрація АУС1**

Горюча речовина				
метан	гептан	диз. пальне	деревина	спирт етиловий
Середні вогнегасні концентрації, г/м <sup>3</sup>				
16 – 27	21 – 26	16 – 22	15 – 24	12 – 17

Випробовування АУС1 з попередньо наведеною рецептурою показали наступні результати, температура горіння АУС1 – 1473 К, форс полум'я мінімальний. Середня вогнегасна концентрація при гасінні складала в середньому 20 г/м<sup>3</sup>, час гасіння – менше 5 секунд, швидкість горіння від 0,5–0,6 мм/с. Мінімальна вогнегасна концентрація визначалась в камері об'ємом 0,5 м<sup>3</sup>. Суть методики з визначення мінімальної вогнегасної концентрації, полягала у визначенні мінімальної наважки АУС1, яка б забезпечувала гасіння тигля з н-гептаном до 2-х хвилин.

З метою підвищення швидкості горіння, покращення експлуатаційних характеристик та вогнегасної ефективності АУС можна використовувати каталізатори. Каталізатори, які використовуються в твердих піротехнічних сумішах [11], можна класифікувати за кількома критеріями: за хімічним складом та за механізмом дії. Основними типами каталізаторів є металеві порошки, оксиди металів, солі перехідних металів та рідкоземельні оксиди. Металеві порошки, такі як залізо (Fe), мідь (Cu), марганець (Mn), нікель (Ni), застосовуються, для прискорення процесу горіння завдяки їхній здатності виступати як каталізатори термічного розкладу окисників. Оксиди металів, такі як  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{CuO}$ , прискорюють розклад окисників, знижуючи температуру запалювання суміші. Солі, наприклад, перманганати та ферроціаніди, також використовуються для впливу на іонні механізми реакцій [12].

Каталізатори впливають на кілька етапів процесу горіння, а саме зниження енергії активації, що дозволяє процесу початися при нижчих температурах, ініціація реакцій між паливом та окисником – пришвидшення переносу електронів і тепла та стабілізація процесу горіння – запобігання флуктуаціям температури та забезпечення рівномірного горіння.

У всіх випадках добавка каталізатора до АУС1 значно впливала на швидкість її горіння.

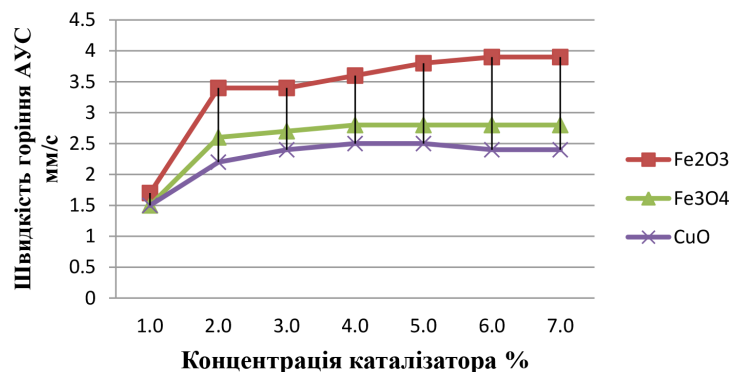


Рис. 1. Залежність швидкості горіння АУС від концентрації каталізаторів

При чому дія каталізаторів проявлялась вже при малих його концентраціях. Швидкість горіння при добавлянні каталізаторів ферум(III) оксиду, ферум(II,III) оксиду, купрум(II)оксиду, визначали фіксуючи час горіння циліндра АУС діаметром 10 мм та довжиною 70 мм. Циліндр АУС підпалювали з торця в горизонтальному положенні та вимірювали час горіння. Результати дії добавок каталізаторів ферум(III) оксиду, ферум(II,III) оксиду, купрум(II)оксиду показано на рис.

Як видно на графіку (рис. 1) всі зазначені каталізатори забезпечують зростання швидкості горіння, але добавка оксид заліза(III) при невеликих концентраціях значно збільшує швидкість горіння АУС. Відповідно при добавлянні лише 1 % мас Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до АУС вказаної рецептури її швидкість горіння збільшується до 1,7 мм/с. При цьому значенні дещо нижчими є показники для Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> – 1,5 мм/с та CuO – 1,5 мм/с. При подальшому збільшенні концентрації добавок до 2 % динаміка зростання швидкості горіння відрізняється залежно від типу каталізатора. Зокрема, для найефективнішого з них – ферум(III) оксиду, цей показник різко збільшується до 3,4 мм/с, тоді як для ферум(II, III) оксиду та купрум(II) оксиду значення є дещо нижчими. При подальшому збільшенні концентрації каталізатора Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> від 3 % до 7 % швидкість згорання збільшується незначно, на 0,5 мм/с. Для

каталізаторів на основі заліза та CuO підвищення швидкості після 3 % не спостерігалось. Загалом порівнюючи характеристики горіння запропонованих АУС, можемо зробити висновок, що добавка навіть незначної кількості каталізаторів горіння до сполук АУС значно покращує техніко-експлуатаційні показники, зокрема можливість регулювати швидкість горіння, а також ступінь перетворення АУС в аерозоль та відповідно вогнегасну ефективність, у порівнянні з АУС без них, що корелюється з проблемами розглянутих та наведених в роботах [13–15]. Це можна побачити по результатам досліджень наведених в таблиці 3.

Як видно з даних, наведених в таблиці 3, композиція АУС на основі сахарози володіє коефіцієнтом перетворення в АУС в залежності від співвідношення компонентів від 73 % до 92,3 %. Коефіцієнт перетворення визначається різницею маси АУС та залишку після її спалювання. При добавлянні 1 % ферум(III) оксиду показник повноти їх згорання збільшується в середньому до 3 %. При цьому збільшення цього показника характерне для АУС з вмістом лише сахарози, або інших органічних палив, так і їх сумішей з ідіолом та деревною мукою в зазначених співвідношеннях (табл. 3). Також з отриманих даних можна зробити висновок, що наприклад добавляння такого каталізатора як ферум(III) оксид до АУС приводить до збільшення

Таблиця 3

**Залежність коефіцієнта перетворення К % від співвідношення компонентів в АУС1**

Вміст компонентів АУС1, % мас.					К, %	К, % при добавлянні 1 % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Компоненти						
KNO <sub>3</sub>	ДЦДА	Сахароза	Ідітол	Деревна мука		
70	2	28	0,001	2	82,0	85,2
70	4	28	0,001	2	87,0	89,5
70	6	28	0,001	2	88,2	89,5
70	8	28	1	1	88,7	90,5
70	10	28	1	0,001	88,3	90,6
70	10	28	2	0,001	88,4	90,3
70	12	28	2	1	78,0	81,4
70	12	28	4	1	73,0	76,3
70	12	28	0,1	1	87,0	92,3

значення коефіцієнту перетворення (К) АУС в аерозоль. Це можна побачити в порівнянні результатів в таблиці 3. Дослідження зазначених рецептур показало, що вони володіють високою вогнегасною ефективністю та при зміні співвідношення компонентів в них можна регулювати швидкість горіння АУС без втрати вогнегасної ефективності.

**Висновок.** Вивчено вплив добавок каталізаторів на швидкість, повноту згорання та вогнегасну ефективність вогнегасної аерозольотворювальної сполуки. Встановлено, що найбільш ефективною добавкою-каталізатором є ферум(III) оксид ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), який при концентрації лише 1 % збільшує швидкість горіння приблизно у 3,4 раза (до 1,7 мм/с), а при концентрації 2 % – майже у 6,8 раза (до 3,4 мм/с) порівняно з базовою сполукою без добавок. Це дозволить розробити нові рецептури АУС та пристрої гасіння на її основі, для швидкого та більш ефективного пожежога-сіння горючих та легкозаймистих рідин.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Fire at Louisiana oil refinery sends tower of black smoke into the air, but no injuries reported. *Associated Press* (AP News). 2023. URL: <https://apnews.com/article/8acd26a19faee26206ba61d570ac0b6a>

2. Marathon's Garyville, Louisiana, refinery fire nearly out, company says. *Reuters*. 2023. URL: <https://www.reuters.com/business/energy/marathon-shuts-some-garyville-refinery-units-2023-08-25/>

3. Hernández L. Improper grounding of equipment faulted in 2019 fiery ethanol tank explosion in East Bay. *San Francisco Chronicle*. 2021. URL: <https://www.sfchronicle.com/local/article/Improper-equipment-grounding-faulted-in-2019-16203701.php>

4. Russia hits oil depot of KLO gas station network in Vasyilkiv. *Ukrinform*. 2022. URL: <https://www.ukrinform.net/rubric-ato/3414345-russian-invasion-update-russia-hits-oil-depot-of-klo-gas-station-network-in-vasylkiv.html>

5. Russian drone strike on Kharkiv, Ukraine's 2nd largest city, kills 7. *AP News*. 2024. URL: <https://apnews.com/article/b5181631189a7a0d069f8ae26848cdef>

6. Rohilla M., Saxena A., Tyagi Y. K., Dixit P. K., Mishra G. K., Narang R. Aerosol forming compositions for fire fighting applications: a review. *Fire Technology*. 2019. Vol. 55, № 6. P. 2515–2545. DOI: 10.1007/s10694-019-00843-7

7. Rohilla M., Saxena A., Tyagi Y. K., Singh I., Tanwar R. K., Narang R. Condensed aerosol based fire-extinguishing system covering versatile applications: a review. *Fire Technology*. 2021. Vol. 57. P. 2951–2973. DOI: 10.1007/s10694-021-01148-4

8. Патент 2009072594 Японія, МПК А62D 1/00, А62D 1/02. Fire extinguishing aerosol generator; опубл. 2009.

9. Патент 77071 Україна, МПК А62D 1/06. Аерозольотворююча сполука для гасіння пожежі; опубл. 2006.

10. Патент 128972 Україна, МПК А62D 1/06. Аерозольотворююча сполука для гасіння пожежі (варіанти).

11. Richter E., Krause U. Development of solid propellant for the production of fire suppression aerosols. *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 120. P. 103113. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103113

12. Balanyuk V., Myroshkin V., Kopystynskyi Yu., Hirskyi O., Harasym'uk O. Study of Fire-extinguishing Efficiency of Environmentally Friendly Binary Aerosol-nitrogen Mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 3, № 10. P. 4–11. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.72399

13. Баланюк В. М., Мирошкін В. С., Копистинський Ю. О., Гірський О. І., Гарасим'юк О. І. Порівняння вогнегасних речовин для гасіння пожеж легкозаймистих та горючих рідин. *Пожежна безпека*. 2022. № 41. С. 12–19. DOI: 10.32447/20786662.41.2022.02

14. Баланюк В. М. Визначення ефективності гасіння вогнегасними аерозолями горючих рідин на відкритому просторі. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2015. № 5/10 (77). С. 15–20. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51399

15. Баланюк В. М., Мирошкін В. С., Копистинський Ю. О., Гарасим'юк О. І., Гірський О. І., Гузар Н. І. та інш. Study of Efficiency Parameters for Using Fire-Extinguishing Aerosols to Suppress Flammable Liquid Fires in Open Spaces. *Key Engineering Materials*. 2024. Vol. 1020. P. 141–151. DOI: 10.4028/p-7xOPiH

### REFERENCES

1. Associated Press. (2023). Fire at Louisiana oil refinery sends tower of black smoke into the air, but no injuries reported. *AP News*. Retrieved from: <https://apnews.com/article/8acd26a19faee26206ba61d570ac0b6a>

2. Reuters. (2023). Marathon's Garyville, Louisiana, refinery fire nearly out, company says. *Reuters*. Retrieved from: <https://www.reuters.com/business/energy/marathon-shuts-some-garyville-refinery-units-2023-08-25/>

3. Hernández, L. (2021). Improper grounding of equipment faulted in 2019 fiery ethanol tank explosion in East Bay. *San Francisco Chronicle*. Retrieved from: <https://www.sfchronicle.com/local/article/Improper-equipment-grounding-faulted-in-2019-16203701.php>

4. Ukrinform. (2022). Russia hits oil depot of KLO gas station network in Vasyilkiv. *Ukrinform*. Retrieved from: <https://www.ukrinform.net/rubric-ato/3414345-russian-invasion-update-russia-hits-oil-depot-of-klo-gas-station-network-in-vasylkiv.html>

5. Associated Press. (2024). Russian drone strike on Kharkiv, Ukraine's 2nd largest city, kills 7. *AP News*. Retrieved from: <https://apnews.com/article/b5181631189a7a0d069f8ae26848cdef>

6. Rohilla, M., Saxena, A., Tyagi, Y. K., Dixit, P. K., Mishra, G. K., & Narang, R. (2019). Aerosol forming compositions for fire fighting applications: A review. *Fire Technology*, 55(6), 2515–2545. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00843-7>
7. Rohilla, M., Saxena, A., Tyagi, Y. K., Singh, I., Tanwar, R. K., & Narang, R. (2021). Condensed aerosol based fire-extinguishing system covering versatile applications: A review. *Fire Technology*, 57, 2951–2973. <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01148-4>
8. Japan Patent No. 2009072594. (2009). *Fire extinguishing aerosol generator*.
9. Patent Ukrainy No. 77071. (2006). *Aerozol-forming composition for fire extinguishing*.
10. Patent Ukrainy No. 128972. (n.d.). *Aerozol-forming composition for fire extinguishing (variants)*. [in Ukrainian].
11. Richter, E., & Krause, U. (2021). Development of solid propellant for the production of fire suppression aerosols. *Fire Safety Journal*, 120, 103113. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103113>
12. Balanyuk, V., Myroshkin, V., Kopystynskyi, Yu., Hirskyi, O., & Harasym'iuk, O. (2016). Study of fire-extinguishing efficiency of environmentally friendly binary aerosol-nitrogen mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10), 4–11. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72399>
13. Balaniuk, V. M., Myroshkin, V. S., Kopystynskyi, Yu. O., Hirskyi, O. I., & Harasym'iuk, O. I. (2022). *Porivniannia vohnehasnykh rehovyn dlia hasinnia pozhezh lehkozaymystykh ta horiuchykh ridyn* [Comparison of fire-extinguishing agents for flammable and combustible liquid fires]. *Pozhezhna bezpeka*, (41), 12–19. <https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.02> [in Ukrainian].
14. Balaniuk, V. M. (2015). *Vyznachennia efektyvnosti hasinnia vohnehasnykh aerosoliamy horiuchykh ridyn na vidkrytomu prostori* [Determination of the efficiency of extinguishing flammable liquids with fire-extinguishing aerosols in open space]. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, 5/10(77), 15–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51399> [in Ukrainian].
15. Balanyuk, V., Myroshkin, V., Kopystynskyi, Yu., Harasym'iuk, O., Hirskyi, O., & Huzar, N., et al. (2024). Study of efficiency parameters for using fire-extinguishing aerosols to suppress flammable liquid fires in open spaces. *Key Engineering Materials*, 1020, 141–151. <https://doi.org/10.4028/p-7xOPiH>

© В. М. Баланюк, Н. І. Гузар

**Оглядова стаття**

Дата першого надходження статті до видання: 05.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026