

УДК 614.84

О. О. Кіреєв, д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0002-8819-3999)

Ю. К. Гапон, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-3304-5657)

М. А. Чиркіна-Харламова, к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-2060-9142)

В. М. Нуянзін, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0003-4785-0814)

А. О. Майборода, к.пед.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-6108-9772)

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ВОГНЕГАСНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛЕГКИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ГАСІННІ АЦЕТОНУ

Проведено експериментальне дослідження вогнегасної здатності систем, створених на основі легких сипких пористих матеріалів, при ліквідації займання ацетону. Для цього використано модифіковану методику визначення вогнегасної ефективності, яка раніше була застосована для етанолу. Як вогнегасні матеріали досліджувалися подрібнене піноскло, а також гранульовані форми спучених перліту та вермікуліту. В якості нижнього шару, що забезпечує плавучість вогнегасної системи використано гранульоване піноскло з розміром частинок у межах 10–15 мм. Як верхній шар, що забезпечує високі ізолюючі властивості розглянуто спучений перліт з розміром кулястих гранул діаметром 1–1,5 мм і спучений пластинчастий вермікуліт з лінійним розміром пластинок 1×2 мм. Експериментально встановлені плавучість обраних сипких матеріалів в ацетоні, їх насипну густину і вологоутримання. На основі експериментальних результатів розраховані висоти шарів сухих та змочених сипких матеріалів, що необхідні для гасіння ацетону. Встановлено, що попереднє змочування сипких матеріалів значно підвищує їхню вогнегасну здатність. Цей факт пояснюється двома факторами – підвищенням ізолюючих властивостей перліту та вермікуліту за рахунок заповнення порожнин між гранулами перліту і вермікуліту та зниженням концентрації пари ацетону за рахунок його абсорбції водою. Також введення води приводить до підвищення охолоджуючих властивостей вогнегасної системи. Найменші висоти вогнегасних шарів під час гасіння ацетону забезпечують системи: змочене піноскло – 6,5 см і піноскло (5,5 см)+перліт (1 см)+вода. Проведено експертне оцінювання комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння для обраних вогнегасних систем при гасінні ацетону. Намічені подальші напрямки досліджень вогнегасних характеристик систем на основі сипких пористих матеріалів і методи встановлення комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння.

Ключові слова: ацетон, вермікуліт, вогнегасні здатність, подрібнене піноскло, перліт, спучені сипкі матеріали

1. Вступ

Гасіння полярних легкозаймистих рідин (ПЛЗР) має суттєві особливості по зрівнянню з гасінням неполярних рідин. Звичайні піноутворювачі (ПУ) забезпечують утворення повітряно-механічних пін (ПМП), які руйнуються під час контакту з ПЛЗР [1–4]. Це потребує використовувати для утворення стійких по відношенню до ПЛЗР пін. Для цього необхідно використовувати піноутворювачі спеціального призначення. Такі піни мають меншу ніж звичайні ПМП стійкість, особливо швидко вони руйнуються під дією інтенсивних теплових потоків. Ще одним недоліком цих пін є наявність в їх складі екологічно небезпечних речовин [5–7].

Розробка ПУ спеціального призначення ведеться в напрямку забезпечення ефективного гасіння спиртів. Іншим полярним рідинам приділяється невелика увага. Так в останні роки в літературі не знайдено матеріалів по гасінню такий ПЛЗР як ацетон (номенклатурна назва пропанон), який знайшов великі застосування в різних галузях.

У великих кількостях ацетон використовується як добрий розчинник для полярних і неполярних органічних речовин. Так він здатен розчиняти жири, оливи,

смоли, каніфоль, целулоїд, нітро- та ацетилцелюлозу. Завдяки здатності розчиняти ацетилен і переводити його в вибухонебезпечний стан використовується в ацетиленовій газорізці та газозварюванні. Він також використовується у виробництві лаків, вибухових речовин та ліків. Щорічне мирове виробництво ацетону в теперішній час перевищує 260 млн тон.

Недоліком ацетону є висока пожежовибухонебезпека. Його температура кипіння складає 56,1 °C, температура спалаху –20 °C, температура самозаймання 465 °C. Межі вибухонебезпечних концентрацій дорівнюють 2,6–12,8 %. [8]. За здатністю до займання ацетон відносять до легкозаймистих речовин. За величиною дипольного моменту (20,9 D) він відноситься до полярних речовин, які необмежено розчиняються у воді і багатьох органічних рідинах.

Таким чином, можна констатувати наявність недоліків у існуючих засобах пожежогасіння в разі потреби гасіння ацетону. Це робить актуальною проблему розробки ефективних засобів гасіння ацетону.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У наукових публікаціях представлено низку нових підходів, спрямованих на підвищення ефективності гасіння легкозаймистих рідин. В роботах [9, 10] запропоновано використання ударних хвиль і динамічних потоків води з великою швидкістю руху. Також ведуться розробки в напрямку застосування дрібнодисперсної води [11] твердих пористих матеріалів [12], піротехнічних складів та складів, що спучуються [13–15]. Але аналіз цих робіт дозволяє зробити висновок про ряд різних недоліків таких систем в разі потреби гасіння рідин на великій площі. Крім того розглянуті вище засоби гасіння не забезпечують відсутність повторного займання рідини, яку загасили.

Останню вимогу можуть забезпечити вогнегасні системи з високими ізолюючими властивостями та стійкістю. В якості таких систем в роботах [16, 17] було обґрунтовано доцільність застосування вогнегасних засобів в яких використовуються легкі сипкі пористі матеріали. В якості таких матеріалів було обрано гранульоване або подрібнене піноскло (ПС) [18]. Для підвищення ізолюючих властивостей шару ПС нанесеного на поверхню горючої рідини на нею додатково наносився шар дрібних спучених перліту [19] або вермікуліту [20]. Ці сипкі матеріали мають високу термічну стійкість та вони можуть заповнювати порожнини між гранулами нижнього шару ПС, що забезпечує підвищення ізолюючих властивостей бінарної системи ПС + перліт. Ще одним варіантом підвищення ізолюючих властивостей шару ПС є нанесення на його поверхню шару гелю [16]. Результати отримані в роботі [17] вказують на суттєву перевагу у витраті вогнегасних речовин для систем за участю перліту і вермікуліту.

У роботі [21] показано перевагу за параметром ефективність/вартість вогнегасної системи ПС + перліт по зрівнянню з іншими вогнегасними системами, які запропоновані для гасіння горючих та легкозаймистих неполярних рідин. В цій роботі для оцінки фінансових витрат підчас гасіння запропоновано враховувати такі витрати: на вогнегасні речовини, їх зберігання, переробку або утилізацію після закінчення строку їх зберігання, на обладнання та його експлуатацію; на залучення додаткової техніки та персоналу, компенсацію збитків від процесу гасіння; компенсацію екологічної шкоди від вогнегасних речовин.

Основні дослідження вогнегасних систем на основі ПС було проведено для

вуглеводневих рідин. Частина таких досліджень було проведено для полярних горючих рідин класу спиртів [22]. В цих роботах було показано, що на вогнегасну здатність систем на основі ПС суттєвий впливають абсорбційні властивості ізолюючих шарів в разі їх змочування водою. Це дозволяє припустити, що такий самий вплив абсорбційних властивостей на вогнегасну здатність систем на основі сипких матеріалів може мати місце і під час гасіння інших полярних горючих рідин завдяки тому, що пари полярних органічних речовин добре поглинаються водою. Подрібнене ПС як раз має відкриті пори в яких може утримуватися велика кількість води. Досліди з гасіння більшості полярних рідин системами на основі ПС не було проведено. В якості такої полярної рідини було обрано ацетон (номенклатурна назва пропанон).

На підставі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність створення високоефективного вогнегасного засобу для гасіння ацетону на основі ПС і спучених перліту і вермікулиту з одночасним введенням до складу вогнегасної системи води. Невирішеним аспектом проблеми розробки такого засобу є брак кількісних даних з вогнегасної здатності таких систем у разі гасіння ацетону.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є експериментальне визначення вогнегасної ефективності систем, що складаються з легких сипких матеріалів із вмістом води, а також вибір найефективнішої системи з точки зору економічної доцільності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести вибір легких сипких матеріалів для верхнього шару бінарної вогнегасної системи які в найбільшій ступені утримують воду, що забезпечить підвищення ізолюючих і охолоджуючих властивостей вогнегасної системи.
2. Експериментально визначити насипну густину, вологоутримання, здатність заповнювати порожнечі нижнього шару сипких матеріалів та вогнегасну здатність обраних засобів при гасінні ацетону. Дослідити можливість повторного використання обраних сипких матеріалів для гасіння ацетону.
3. Провести оцінку комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння для обраних вогнегасних систем.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження виступає процес гасіння полярної горючої рідини (ацетону) із застосуванням вогнегасних систем, сформованих на основі легких сипких матеріалів. Предмет дослідження – експериментальне встановлення параметрів вогнегасної ефективності сипких пористих матеріалів при гасінні ацетону.

Робочими гіпотезами дослідження є припущення про позитивний вплив попереднього зволоження сипкого матеріалу на вогнегасну ефективність запропонованої пожежогасної системи, а також про потенційну можливість повторного використання зазначених матеріалів для гасіння ацетону.

В роботі застосовані експериментальні методики визначення вогнегасної здатності обраних засобів при гасінні легкозаймистих рідин які удосконалені з урахуванням властивостей систем на основі сипких матеріалів, ситовий аналіз та показники економічної ефективності і метода експертного оцінювання фінансових витрат при гасінні пожеж класу «В».

5. Дослідження вогнегасних властивостей легких сипких матеріалів під час гасіння ацетону

5.1. Вибір легких сипких матеріалів для верхнього шару бінарної вогнегасної системи

Вибір сипких матеріалів для вогнегасної системи базувався на аналізі їхніх фізико-хімічних властивостей, таких як плавучість, вологоутримання, термічна стійкість та здатність до ізоляції горючих рідин. Згідно з результатами попередніх досліджень [16–18, 22], для нижнього шару було обрано подрібнене піноскло (ПС) з розміром частинок 10–15 мм (рис. 1а), що забезпечує високу плавучість та стійкість до термічного впливу.

Для верхнього шару розглядалися два варіанти: спучений подрібнений вермікуліт з розміром пластинок 1×2 мм (рис. 1б) та спучений гранульований перліт з діаметром сферичних гранул 1–1,5 мм (рис. 1в). Ці матеріали обрані з урахуванням їхньої здатності ефективно заповнювати порожнини між гранулами ПС, створюючи щільний ізолюючий шар, який перешкоджає проникненню рідини через нижній шар. Крім того, їхні розміри сприяють утворенню стабільної структури, що підвищує ефективність гасіння.

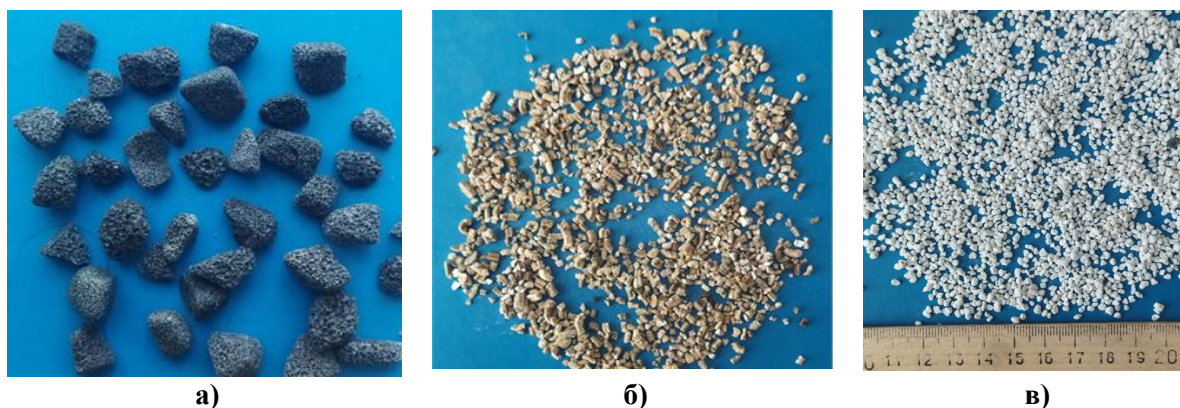


Рис. 1. Зовнішній вигляд матеріалів для верхнього шару: а – піноскло, б – спучений вермікуліт, в – спучений перліт

Комбінація ПС з вермікулітом або перлітом дозволяє створити багатошарову вогнегасну систему, яка поєднує в собі переваги кожного з компонентів, забезпечуючи ефективне гасіння ацетону за рахунок ізоляції пального середовища та зменшення теплового впливу.

5.2. Експериментальне визначення характеристик та вогнегасної здатності сипких матеріалів при гасінні ацетону

В зв'язку з тим, що різні партії сипких матеріалів можуть відрізнятися за своїми властивостями було проведено за методикою [17] експериментальне визначення насипної густини, вологоутримання, здатності заповнювати порожнечі нижнього шару, частки матеріалу, що просипалась крізь нижній шар піноскла і плавучісті в ацетоні запропонованих сипких матеріалів.

Вологоутримання (В) розраховувалося за співвідношенням:

$$B = \frac{m_{H_2O}}{(m_{H_2O} + m_C)}, \quad (1)$$

де m_{H_2O} – маса води, m_C – маса сухого сипкого матеріалу.

Плавучості в ацетоні (Π) визначалась візуально як відношення висоти шару сипучого матеріалу, який знаходиться над рівнем рідини ($h_{\uparrow}$), до загальної висоти шару сипучого матеріалу (h):

$$\Pi = \frac{h_{\uparrow}}{h} = \frac{h_{\uparrow}}{h_{\uparrow} + h_{\downarrow}}, \quad (2)$$

Визначення частки матеріалу, що просипався крізь нижній шар ПС розраховувалась за рівнянням:

$$ПР = \frac{m_2}{m_1}, \quad (3)$$

де m_1 – загальна маса сипкого матеріалу верхнього шару, m_2 – маса сипкого матеріалу верхнього шару, що просипався крізь нижній шар ПС.

Здатність заповнювати порожнечі між гранулами ПС гранулами перліту та вермікуліту оцінювалась візуально за трьохбальною шкалою: 1 – висока, 2 – помірна, 3 – низька. Відповідні результати представлено в табл. 1.

Табл. 1. Розмір гранул (l), плавучість в ацетоні (Π), насипна щільність (ρ), вологоутримання (В), здатність заповнювати порожнечі нижнього шару (З), частка матеріалу, що просипалась крізь базовий шар піноскла (ПР) для різних сипких матеріалів

Матеріал	l, мм	Π , %	ρ , кг/м ³	В, %	З, бали	ПР, %
ПС	10–15	50	101	33	3	0
перліт	1–1,5	26	160	46	1	10
вермікуліт	1–2	11	233	49	2	5

Результати наведені в табл. 1 вказують на суттєву перевагу ПС як сипкого матеріалу, який створює умови для плавучості всієї системи. За іншими характеристиками відати перевагу як матеріалу верхнього шару перліту або вермікуліту важко.

Методика проведення експерименту з визначення вогнегасних характеристик систем на основі легких сипких матеріалів була такою самою як в роботі [22]. Як лабораторне модельне вогнище пожежі класу «В» було обрано металеву циліндричну ємність з діаметром внутрішньої частини 11 см і висотою 11 см. В нею заливалось 110 мл ацетону. При цьому висота шару рідини склала 1,1 см. Далі рідина підпалювалась і горіла протягом 1 хвилини. Далі в ємність з рідиною, що горить засипався базовий шар ПС висотою 4 см. При цьому рівень рідини піднімався до ~2 см, а рівень шару ПС яка знаходиться над поверхнею рідини складала ~2 см. Через 1 хвилину після засипання ПС здійснювалась візуальна оцінка ступеня горіння.

Після 1 хвилини горіння з базовим шаром ПС рівномірно по поверхні засипався наступний шар сипкого матеріалу висотою 0,5 см. Візуальні спостереження показали, що в разі засипання перліту та вермікуліту більша частина цих сипких матеріалів заповнювала порожнини між гранулами базового шару ПС. При цьому загальна висота шару сипких матеріалів не змінювалась. Надалі проводилась візуальна оцінка інтенсивності горіння в балах. Ілюстрація проведення експерименту представлена на рис. 2.

В разі продовження горіння засипався ще один шар сипкого матеріалу висотою 0,5 см. Подальші додаткові засипання сипкого матеріалу проводились до моменту гасіння. В разі загасання модельного вогнища в лабораторних умовах через 1 хвилину проводилось випробування на повторне займання. Для цього на відстань 1 см від поверхні вогнегасного шару підносився вогняний факел. При займанні, що тривало більше 5 с, на поверхню наносився додатковий шар сипкого матеріалу заввишки 0,5 см, і проводився новий експеримент для визначення можливості повторного займання. В разі відсутності повторного займання вважалось, що лабораторне модельне вогнище пожежі класу «В» таким, що погашено.

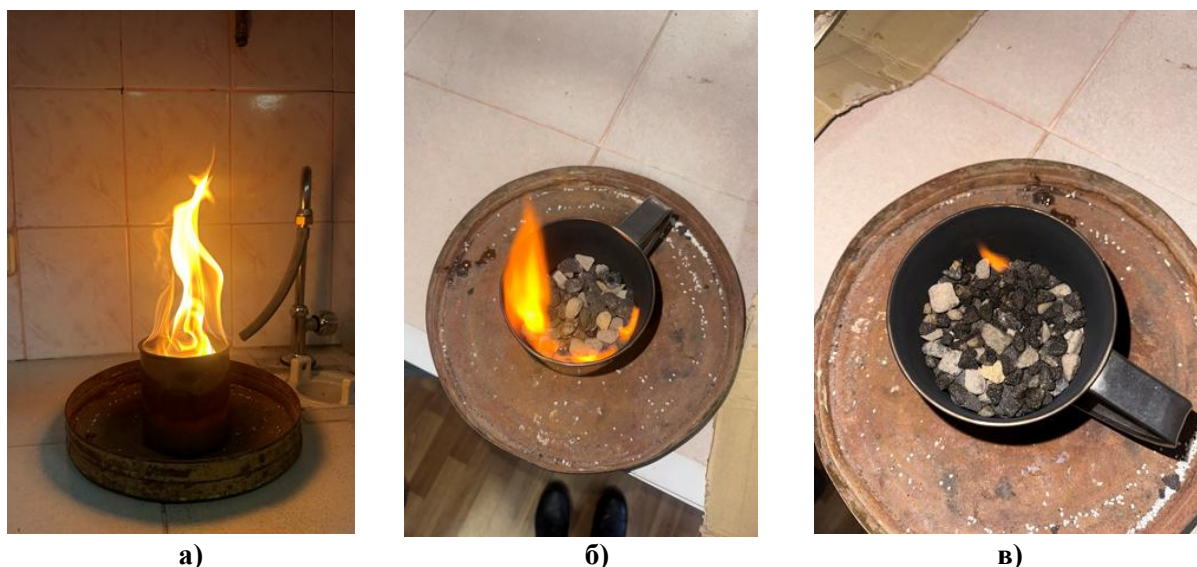


Рис. 2. Етапи гасіння ацетону: а – горіння без шару сипкого матеріалу; б – горінні після засипки базового шару ПС; в – горіння після нанесення шару перліту 0,5 см

Для кожної вогнегасної системи дослідження гасіння виконувалося тричі. Якщо результати припинення горіння в трьох окремих випробуваннях не співпадали, вибирався найгірший результат.

Експерименти з гасіння проводились в двох варіантах – з сухими та змоченими сипкими матеріалами. Змочування ПС здійснювалась зануренням на 1 хвилину ПС у воду з наступним стряхуванням його у ситі. Для спучених перліту і вермікуліту по такий самий методиці як для ПС відбувалось їх грудкування. Тому їх змочування проводилось після нанесення сухого матеріалу на поверхню рідин, що горять шляхом розпилювання води з питомою поверхневою витратою 1 кг/м^2 (10 г на лабораторне модельне вогнище). Для порівняння результатів цієї роботи з результатами для неполярних легкозаймистих рідин було проведено дослідження з гасіння неполярної легкозаймистої рідини бензину А-92. Експериментальні результати представлені в табл. 3.

Табл. 3. Вогнегасні висоти сипких матеріалів у разі нанесення на базовий шар піноскла додаткових шарів сипких матеріалів

Рідина	Вогнегасні висоти сипких матеріалів, см			Вогнегасні висоти змочених матеріалів, см		
	ПС	перліт	вермікуліт	ПС	перліт	вермікуліт
Ацетон	3,5	1,5	2	1	1	1
Бензин А-92	7	2	2	7	1	1,5

Експериментальні результати цієї роботи одержані з використанням «базового шару». При цьому нижній шар ПС осідав на дно ємності з ацетоном. В такому випадку в рідину занурено тільки шар ПС висотою 2 см. Вище цього рівня знаходиться шар ПС висотою 2 см і додатковий шар сухого або змоченого сипкого матеріалу. В умовах реальної пожежі нижній шар ПС повинен бути таким щоб утримувати верхній шар вогнегасної системи. Для розрахунку реальної загальної висоти шарів сипких матеріалів потрібної для гасіння ацетону використано методику наведену в роботі [22]. При цьому були використані результати з плавучості, вологоутримання та насипної густини сипких матеріалів які наведено в табл. 1.

Результати розрахунку висоти вогнегасних шарів сипких матеріалів для випадку коли шар сипкого матеріалу не осідає на дно ємності з ацетоні наведено в табл. 4.

Табл. 4. Розрахункові вогнегасні висоти сипких матеріалів для випадку коли шар сипкого матеріалу не осідає на дно ємності

Рідина	Вогнегасні висоти сипких матеріалів, см			Вогнегасні висоти змочених матеріалів, см		
	ПС	ПС+перліт	ПС+вермікуліт	ПС	ПС+перліт	ПС+вермікуліт
Ацетон	9,5	6+1,5	6,5+2	6,5	5,5+1	6+1
Бензин А-92	18	6,5+2	7+2	19	5,5+1	6+1,5

Наведені результати вказують на невелику перевагу за висотою вогнегасного шару при гасінні ацетону системи ПС+перліт (сухий) і однакову ефективність систем, ПС і ПС+перліт, в змочену стані. Для гасіння бензину найбільш доцільно використовувати систему ПС+перліт в разі змочування обох сипких матеріалів.

Всі компоненти систем на основі сипких пористих матеріалів є термічно стійкими. В умовах гасіння з ними не відбувається ні яких суттєвих візуально спостерігаємих змін. В деяких випадках фіксувалося розтріскування невеликої кількості гранул ПС. Спучені перліт і вермікуліт подаються на поверхню шара ПС і на них діє менший термічний вплив ніж на ПС. Ці факти вказують на принципову можливість багаторазового використання всіх сипких компонентів вогнегасної системи. Для підтвердження цієї можливості було проведено відповідні дослідження. Такі дослідження було проведено для систем ПС+перліт і ПС+перліт+вода.

В кожному дослідженні з процесу гасіння лабораторного модельного вогнища класу «В» визначались маси ПС і перліту які подано на гасіння. Після кожного гасіння сипкі матеріали висушувались та просіювались крізь сита з різними отворами і зважувались. При цьому було встановлено що втрати ПС не перевищували 4 %, а перліту 1,5 %.

Другім етапом досліджень було повторне використання ПС і перліту для гасіння ацетону. Ці досліді вказали на повний збіг результатів первинного і повторного використання сипких матеріалів при гасінні ацетону. Такі самі результати було отримано і вразі третього і четвертого використання сипких матеріалів. Причому такі результати були отримані як з сухими так і змоченими матеріалами. Ці результати вказують на можливість багаторазового використання сипких речовин для гасіння ацетону.

5.3. Оцінка комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння на основі сипких матеріалів

В роботі [21] запропоновано для оцінки ефективності вогнегасних засобів використовувати комплексний параметр ефективності (Еф):

$$\text{Еф} = \frac{\text{результат}}{\text{вартість}} = \text{Еф1} + \text{Еф2} + \text{Еф3} + \text{Еф4} + \text{Еф5} + \text{Еф6} + \text{Еф7}. \quad (4)$$

За результат прийнято факт гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі класу «В». Економічний параметр «ефективність» включає сім складових:

Еф1 – вартість вогнегасних речовин (ВР);

Еф2 – витрати на зберігання ВР;

Еф3 – витрати на переробку або утилізацію ВР після закінчення строку їх зберігання;

Еф4 – витрати на обладнання та його експлуатацію;

Еф5 – складова пов'язана з обмеженнями, які обумовлені потребою забезпечення інтенсивності подавання ВР вище критичної;

Еф6 – витрати на компенсацію збитків від процесу гасіння;

Еф7 – витрати на компенсацію екологічної шкоди від ВР.

Табл. 5. Складові комплексного показника вогнегасної ефективності (Еф1– Еф 7) та сумарне Еф

Складові комплексного показника вогнегасної ефективності	Вогнегасна система					
	ПМП	ПШТ	ПС+гель	ПС+перліт	ПС+перліт+вода	ПС++вода
Еф1 бали	4	3,5	1,6	1,9	2,8	3
Еф2 бали	2,3	1,5	1,8	3,7	3,4	3,7
Еф3 бали	2,2	1,7	2,5	4	3,8	4
Еф4 бали	3,0	2,0	1,4	3,0	2,7	3,6
Еф5 бали	2,2	2,4	3,0	3,8	3,2	3,8
Еф6 бали	1,2	1,5	2,8	4,0	3,3	3,3
Еф7 бали	1,6	1,6	2,6	4,0	4	4
Еф бали	16,5	14,2	15,7	24,4	23,2	25,4

Кожна складова оцінювалась за чотирьохбальною шкалою методом експертних оцінок:

1 – низьке значення;

2 – середнє значення;

3 – високе значення;

4 – дуже високе значення.

В табл. 5 наведені середні результати для кожної складової комплексного параметру ефективності вогнегасного засобу та сумарне значення загального параметру ефективності, які отримані для ПМП, пін швидкого твердіння (ПШТ) [23] та систем ПС+гель, ПС + перліт і ПС + перліт + вода.

З наведених в табл. 5 результатів можна зробити висновок, що найбільш чисельні значення комплексного показника вогнегасної ефективності мають системи ПС+вода, ПС+перліт і ПС+перліт+вода. Причому основна перевага цих систем забезпечена за такими складовими: витратами на їх зберігання; витратами на

переробку або утилізацію вогнегасної речовини після закінчення строку їх зберігання; відсутністю обмежень на інтенсивність подавання вогнегасних речовин вище критичної; витратами на компенсацію збитків від процесу гасіння та витратами на компенсацію екологічної шкоди.

6. Обговорення результатів визначення вогнегасних характеристик сипких матеріалів

Аналіз експериментальних результатів дозволяє констатувати, що змочування перліту і вермікулиту дає можливість зменшити витрати сипких матеріалів на гасіння як ацетону так і бензину. Це свідчить про те, що змочування дрібних сипких матеріалів сприяє підвищенню їх ізолюючих властивостей завдяки заповненню водою порожнин між гранулами перліту і вермікулиту. На відміну від ПС, останні складаються з гранул меншого розміру, і порожнини між ними також мають менші розміри. Це призводить до перекривання поверхневих шарів води, яка змочує ці матеріали, і до повного заповнення порожнин між гранулами водою. У ПС порожнини між гранулами мають більші розміри, що унеможливорює перекривання водяних шарів на поверхні матеріалу та, відповідно, не дозволяє воді повністю заповнити порожнини між гранулами.

Змочування ПС без додаткового нанесення перліту або вермікулиту суттєво підвищує його вогнегасні характеристики по відношенню ацетону. Цей факт можна пояснити тим, що вода абсорбує пари ацетону. Це приводить до зменшення їх концентрації в зоні горіння що забезпечує припинення горіння. В той же самий час змочування ПС не викликає підвищення вогнегасних характеристик в разі гасіння бензину, що пояснюється відсутності абсорбції парів бензину водою.

Також, аналіз отриманих результатів дає змогу зробити висновок про перевагу шару спученого перліту по зрівнянню зі спученим вермікулітом. Це можна пояснити більшою насипною щільністю вермікулиту та його меншими ізолюючими властивостями.

Порівняння вогнегасних властивостей засобів на основі сипких матеріалів вказує на їх перевагу по зрівнянню з існуючими пінними засобами пожежогасіння за стійкістю та екологічними і економічними характеристиками. Запропоновані засоби пожежогасіння також мають суттєву перевагу за екологічними характеристиками по зрівнянню з засобами пожежогасіння в яких сумісно використовуються ПС і гелеутворюючі системи.

Вогнегасна система, що використовує легкі сипкі матеріали, має переваги в порівнянні з пінами швидкого твердіння за стійкістю та екологічними характеристиками. Високі екологічні характеристики вогнегасних систем на основі сипких матеріалів обумовлено тим, що її компоненти не токсичні, термічно стійкі, не розчиняються у горючих рідинах.

Однією з суттєвих загальних переваг вогнегасних систем на основі сипких матеріалів є відсутність обмежень за інтенсивності їх подавання на поверхню рідин, що горять. Це обумовлено їх термічною стійкістю. Формування вогнегасного шару для таких систем практично не обмежено часом. Це, у свою чергу, дає змогу використовувати малі витрати на засобах подавання сипких матеріалів, що приводить до меншим фінансовим витратам.

Високі економічні характеристики системи піноскло + перліт і піноскло + перліт + вода обумовлені малими фінансовими витратами на вогнегасні речовини, легкістю їх зберігання, можливістю багаторазового використання, малими витратами на компенсацію збитків від процесу гасіння та компенсацію екологічної

шкоди від вогнегасних речовин.

Експериментальні дослідження проводилися на малорозмірних модельних вогнищах пожежі класу «В». Однак умови горіння та витрати вогнегасних речовин значною мірою залежать від розмірів вогнища. Тому кількісні характеристики вогнегасної здатності, отримані на малорозмірних вогнищах, потребують уточнення при застосуванні до вогнищ більших розмірів.

В рамках розвитку концепції комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння треба переходити від бальної системи оцінки цього економічного параметру до грошової. Для цього потрібне залучення відповідних фахівців.

Для впровадження в практику пожежогасіння полярних рідин вогнегасних засобів на основі сипких матеріалів необхідно провести додаткові дослідження щодо їх ефективності при гасінні різних полярних рідин.

7. Висновки

1. Для нижнього шару вогнегасної системи на основі сипких матеріалів обрано гранульоване піноскло з розміром гранул 10–15 мм, а для верхнього шару спучений перліт з розміром кулеподібних гранул діаметром 1–1,5 мм і спучений пластинчастий вермікуліт з лінійним розміром пластинок 1×2 мм.

2. Експериментально визначені насипна густина, вологоутримання, здатність заповнювати порожнечі нижнього шару, частка матеріалу, що просипалась крізь нижній шар піноскла і плавучість в ацетоні обраних сипких матеріалів підтвердили можливість використання цих матеріалів для гасіння ацетону. Встановлено, що найбільшу плавучість має піноскло – 50 %, а найбільший вологоутримання спучений вермікуліт 49 %. Експериментально визначені висоти вогнегасних шарів систем на основі сипких матеріалів потрібних для гасіння ацетону. Найкращі результати показали змочені матеріали: піноскло – 6,5 см, піноскло (5,5 см)+перліт (1 см). Проведені дослідження підтвердили можливість багаторазового використання сипких матеріалів, зокрема піноскла та перліту, у системах гасіння ацетону. Втрати цих матеріалів після кожного використання не перевищували 4 % для піноскла та 1,5 % для перліту, що свідчить про їх високу ефективність та економічність у застосуванні.

3. На основі проведеної методом експертних оцінок комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння для обраних вогнегасних систем при гасінні ацетону найкращий результат показало змочене піноскло 25,4. Для систем на основі сипких матеріалів піноскло+перліт і піноскло+перліт+вода цей показник склав 24,4 і 23,2 відповідно. Для повітряно механічних пін, пін швидкого твердіння і систем за участю гелів комплексний параметр ефективності склав 16,5; 14,2 і 15,7 відповідно.

Література

1. EN 1568-1:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 1: Specification for medium expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids. European committee for standardization, 2018. 44 p. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/29188adf-ed7b-49cf-9e76-b996ab64fd89/en-1568-1-2018>
2. EN 1568-2:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 2: Specification for high expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids. European committee for standardization, 2018. 41 p. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/1b7c7790-8464-4bc4-9ec6-b98ac41ff5ed/en-1568-2-2018>

3. EN 1568-3:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 3: Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible. European committee for standardization, 2018. 59 p. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/6e79e77f-10b9-4be3-b589-23797d03ae3b/en-1568-3-2018>

4. Боровиков В. О., Чеповський В. О., Слущка О. М. Рекомендації щодо гасіння пожеж у спиртосховищах, що містять етиловий спирт. МНС України. К.:УкрНДІПБ, 2009. 76 с.

5. Ivanković T. Surfactants in the environment. Arh. Hig. Rad. Toksikol. 2010. Vol. 61. № 1. P. 95–110. doi: 10.2478/10004-1254-61-2010-1943

6. Olkowska E. Analytics of surfactants in the environment: problems and challenges. Chem. Rev. 2011. Vol. 111. № 9. P. 5667–5700. doi: 10.1021/cr100107g

7. Dadashov I., Loboichenko V., Kireev A. Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. Pollution Research. 2018. Vol. 37. № 1. P. 63–77. URL: http://29yjmo6.257.cz/bitstream/123456789/9380/1/Poll%20Res-10_proof.pdf

8. Трегубов Д. Г., Дадашов І. Ф., Мінська Н. В., Гапон Ю. К., Чиркіна-Харламова М. А. Фізико-хімічні основи розвитку та гасіння пожеж горючих рідин: навч. посіб. Х.: НУЦЗУ, 2023. 229 с. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/19111/3/ФХОПРпрепрінт.pdf>

9. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. 6(10(90)). P. 11–16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.114504

10. Semko A., Beskrovnaya M., Vinogradov S., Hritsina I., Yagudina N. The usage of high speed impulse liquid jets for putting out gas blowouts. Journal of Theoretical and Applied Mechanics (Poland). 2017. Vol. 3. P. 655–664. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84938701022&partnerID=40&md5=7bb1aef5a447873de21f8e81c67eedd0>

11. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. Improving the installation for fire extinguishing with finely dispersed water Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 2. № 10–92. P. 38–43. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127865

12. Vambol S., Bogdanov I., Vambol V., Suchikova Y., Kondratenko O., Hurenko O., Onishchenko S. Research into regularities of pore formation on the surface of semiconductors. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3. № 5–87. P. 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2017.104039

13. Chernukha A., Teslenko A., Kovalov P., Bezuglov O. Mathematical Modeling of Fire-Proof Efficiency of Coatings Based on Silicate Composition. Materials Science Forum. 2020. Vol. 1006. P. 70–75. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1006.70

14. Vasilchenko A., Otrosh Y., Adamenko N., Doronin E., Kovalov A. Feature of fire resistance calculation of steel structures with intumescent coating. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 230. P. 02036. doi: 10.1051/mateconf/201823002036

15. Kustov M., Kalugin V., Tutunik V., Tarakhno O. Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii. 2019. Vol. 1. P. 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99

16. Дадашов І. Ф., Кіреєв О. О., Трегубов Д. Г., Тарахно О. В. Гасіння горючих рідин твердими пористими матеріалами та гелеутворюючими

системами. Харків, 2021. 240 с. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14033>

17. Макаренко В. С., Кіреєв О. О., Трегубов Д. Г., Чиркіна М. А. Дослідження вогнегасних властивостей бінарних шарів легких пористих матеріалів. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. Вип. 1(33). С. 235–245. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-18

18. Wang Hao, Chen Ziwei, Ji Ru, Liu Lili, Wang Xidong. Integrated utilization of high alumina fly ash for synthesis of foam glass ceramic. *Ceramics International*. 2018. 44(12). P. 13681–13688. doi: 10.1016/j.ceramint. 2018.04.207. S2CID 139498288

19. U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2022: U.S. Geological Survey, 2022. 202 p. doi: 10.3133/mcs2022

20. Makarenko V., Kireev A., Slepuzhnikov Y., Hovalenkov S. Properties of multi-component fire extinguishing systems based on light bulk materials. *Key Engineering Materials*. 2023. Vol. 954. P. 177–184. doi: 10.4028/p-6v6dmx

21. Кіреєв О. О., Гапон Ю. К., Чиркіна-Харламова М. А., Слепужніков Є. Д., Черкашин О. В. Вибір найбільш ефективного засобу гасіння легкозаймистих рідин. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2024. № 2(40). С. 30–43. doi: 10.52363/2524-0226-2024-40-3

22. Бабашов І. Б., Дадашов І. Ф., Кіреєв О. О., Савченко О. В., Мусаєв М. Є. Результати визначення вогнегасних характеристик легких сипких матеріалів при гасінні етанолу. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 1(37). С. 250–263. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/17964/1/18.pdf>

23. Mahammad E., Musayev, Ilgar F. Dadashov, Alexander A. Kireev, Rza Kh. Khudiyev. Research fire extinguishing and insulating characteristics of fast-hardening foams. *Processes of Petrochemistry and Oil Refining*. 2024. Vol. 25. № 2. P. 567–577. doi: 10.62972/1726-4685.2024.2567

A. Kireev, DSc, Professor, Professor of the Department

Yu. Hapon, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

M. Chyrkina-Kharlamova, PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department

V. Nuianzin, PhD, Associate Professor, Head of the Department

A. Maiboroda, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

FIRE EXTINGUISHING EFFICIENCY OF LIGHTWEIGHT BULK MATERIALS WHEN EXTINGUISHING ACETONE

Experimental studies of the fire extinguishing ability of systems based on bulk porous materials during acetone extinguishing were carried out. For this purpose, the experimental methodology for determining the fire extinguishing properties of such extinguishing agents, which was previously proposed for ethanol, was chosen. Crushed foam glass, granulated swollen perlite, and vermiculite were selected as bulk materials. As the bottom layer, which ensures the buoyancy of the fire extinguishing system, granular foam glass with a granule size of 10-15 mm was used. As the upper layer, which provides high insulating properties, we consider swollen perlite with a size of spherical granules with a diameter of 1-1.5 mm and swollen lamellar vermiculite with a linear size of 1×2 mm. The buoyancy of the selected bulk materials in acetone, their bulk density and moisture retention were experimentally determined. On the basis of the experimental results, the heights of the layers of dry and wetted bulk materials required for acetone extinguishing were calculated. It was found that the wetting of bulk materials leads to a significant increase in their extinguishing properties. This fact is explained by two factors: an increase in the insulating properties of perlite and vermiculite due to filling the voids between the perlite and vermiculite granules and a decrease in the concentration of acetone vapour due to its absorption by water. The introduction of water also increases the cooling properties of the fire extinguishing system. The lowest heights of fire extinguishing layers during acetone extinguishing are provided by the systems: wetted foam glass – 6.5 cm and

foam glass (5.5 cm)+perlite (1 cm)+water. An expert evaluation of the complex parameter of the effectiveness of fire extinguishing agents for the selected fire extinguishing systems when extinguishing acetone was carried out. The best result was shown by wetted foam glass. Further directions of research on the fire extinguishing characteristics of systems based on bulk porous materials and methods for establishing a complex parameter of the effectiveness of fire extinguishing agents are outlined.

Keywords: acetone, vermiculite, fire extinguishing ability, crushed foam glass, perlite, swollen bulk materials

References

1. EN 1568-1:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 1: Specification for medium expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids. European committee for standardization, 44 . URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/29188adf-ed7b-49cf-9e76-b996ab64fd89/en-1568-1-2018>
2. EN 1568-2:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 2: Specification for high expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids. European committee for standardization, 41. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/1b7c7790-8464-4bc4-9ec6-b98ac41ff5ed/en-1568-2-2018>
3. EN 1568-3:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 3: Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible. European committee for standardization, 59. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/6e79e77f-10b9-4be3-b589-23797d03ae3b/en-1568-3-2018>
4. Borovykov, V. O., Chepovskyi, V. O., Slutska, O. M. (2009). Rekomendatsii shchodo hasinnia pozhezh u spyrtoskhovyshchakh, shcho mistiat etylovyy spyrt. MNS Ukrainy. K.:UkrNDIPB, 76.
5. Ivanković, T. (2010). Surfactants in the environment. Arh. Hig. Rad. Toksikol, 61, 1, 95–110. doi: 10.2478/10004-1254-61-2010-1943
6. Olkowska, E. (2011). Analytics of surfactants in the environment: problems and challenges. Chem. Rev, 111, 9, 5667–5700. doi: 10.1021/cr100107g
7. Dadashov, I., Loboichenko, V., Kireev, A. (2018). Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. Pollution Research, 37, 1, 63–77. Available at: http://29yjmo6.257.cz/bitstream/123456789/9380/1/Poll%20Res-10_proof.pdf
8. Trehubov, D. H., Dadashov, I. F., Minska, N. V., Hapon, Yu. K., Chyrkina-Kharlamova, M. A. (2023). Fyzyko-khimichni osnovy rozvytku ta hasinnia pozhezh horiuchykh ridyn: navch. posib. Kh.: NUTsZU, 229. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/19111/3/ФХОППрепринт.pdf>
9. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. (2017). Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(10(90)), 11–16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.114504
10. Semko, A., Beskrovnaya M., Vinogradov S., Hritsina I., Yagudina N. (2017). The usage of high speed impulse liquid jets for putting out gas blowouts. Journal of Theoretical and Applied Mechanics (Poland), 3, 655–664. Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84938701022&partnerID=40&md5=7bb1aef5a447873de21f8e81c67eedd0>
11. Dubinin, D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. (2018). Improving the installation for fire extinguishing with finely dispersed water. Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 2, 10–92, 38–43. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127865

12. Vambol, S., Bogdanov, I., Vambol, V., Suchikova, Y., Kondratenko, O., Hurenko, O., Onishchenko, S. (2017). Research into regularities of pore formation on the surface of semiconductors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3, 5–87, 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2017.104039
13. Chernukha, A., Teslenko, A., Kovalov, P., Bezuglov, O. (2020). Mathematical Modeling of Fire-Proof Efficiency of Coatings Based on Silicate Composition. *Materials Science Forum*, 1006, 70–75. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1006.70
14. Vasilchenko, A., Otrosh, Y., Adamenko, N., Doronin, E., Kovalov, A. (2018). Feature of fire resistance calculation of steel structures with intumescent coating. *MATEC Web of Conferences*, 230, 02036. doi: 10.1051/mateconf/201823002036
15. Kustov, M., Kalugin, V., Tutunik, V., Tarakhno, O. (2019). Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 1, 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99
16. Dadashov, I. F., Kirieiev, O. O., Trehubov, D. H., Tarakhno, O. V. (2021). Hasinnia horiuchykh ridyn tverdymy porystymy materialamy ta heleutvoriuiuchymy systemamy. Kharkiv, 240. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14033>
17. Makarenko, V. S., Kirieiev, O. O., Trehubov, D. H., Chyrkina, M. A. (2021). Doslidzhennia vohnehasnykh vlastyvostei binarnykh shariv lehkykh porystykh materialiv. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 1(33), 235–245. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-18
18. Wang, Hao, Chen, Ziwei, Ji, Ru, Liu, Lili, Wang, Xidong. (2018). Integrated utilization of high alumina fly ash for synthesis of foam glass ceramic. *Ceramics International*, 44(12), 13681–13688. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.04.207. S2CID 139498288
19. U.S. Geological Survey. (2022). Mineral commodity summaries 2022: U.S. Geological Survey, 202. doi: 10.3133/mcs2022
20. Makarenko, V., Kireev, A., Slepuzhnikov, Y., Hovalenkov, S. (2023). Properties of multi-component fire extinguishing systems based on light bulk materials. *Key Engineering Materials*, 954, 177–184. doi: 10.4028/p-6v6dmx
21. Kirieiev, O., Hapon, Yu., Chyrkina-Kharlamova, M., Slepuzhnikov, Ye., Cherkashyn, O. (2024). Vybir naibilsh efektyvnoho zasobu hasinnia lehkozaimystykh ridyn. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 2(40), 30–43. doi: 10.52363/2524-0226-2024-40-3
22. Babashov, I., Dadashov, I., Kirieiev, O., Savchenko, O., Musaiev, M. (2023). Rezultaty vyznachennia vohnehasnykh kharakterystyk lehkykh sypkykh materialiv pry hasinni etanolu. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 1(37), 250–263. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/17964/1/18.pdf>
23. Mahammad, E., Musayev, Ilgar F. Dadashov, Alexander A. Kireev, Rza Kh. Khudiyev. (2024). Research fire extinguishing and insulating characteristics of fast-hardening foams. *Processes of Petrochemistry and Oil Refining*, 25, 2, 567–577. doi: 10.62972/1726-4685.2024.2567

Надійшла до редколегії: 24.02.2025

Прийнята до друку: 18.04.2025