

## УДК 614.84

*О. О. Кіреєв<sup>1</sup>, д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0002-8819-3999)*

*Ю. К. Гапон<sup>2</sup>, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-3304-5657)*

*М. А. Чиркіна-Харламова<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-2060-9142)*

*О. М. Даник<sup>1</sup>, ст. викл. каф. (ORCID 0009-0003-6849-3403)*

*К. О. Русенко<sup>1</sup>, викл. каф. (ORCID 0009-0009-4866-6032)*

<sup>1</sup>Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

## ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НОВИХ ЗАСОБІВ ПІД ЧАС ГАСІННЯ СПИРТОВМІСНИХ МОТОРНИХ ПАЛИВ

Наведено результати експериментальних досліджень ефективності нових комбінованих систем пожежогасіння під час ліквідації загорянь спиртовмісних моторних палив, що містять 5 % біоетанолу. Введення полярного компонента – етанолу – до складу вуглеводневого палива зумовлює зміну його горючих властивостей і потребує створення спеціальних засобів гасіння, здатних ефективно припиняти горіння таких сумішей. Дослідження виконано із застосуванням удосконаленої експериментальної методики, яка передбачала використання лабораторного модельного вогнища пожежі класу «В» малих розмірів і нанесення базового шару сипкого матеріалу заввишки 4 см. Як об'єкти вивчення використовували гранульоване піноскло та спучений перліт із різним ступенем зволоження, а також швидкотвердіючу піну, що наносилася на поверхню палаючого бензоетанолу. Експериментально визначено насипну густину, водоутримання та плавучість сипких матеріалів у бензоетанолі, що дозволило оцінити їх стійкість і поведінку на межі фаз під час гасіння. Встановлено оптимальні висоти вогнегасних шарів: для швидкотвердіючої піни – 2,5 см, сухого піноскла – 16 см, змоченого піноскла – 8 см, комбінації сухого піноскла з сухим перлітом – (5,5+1) см, а поєднання сухого піноскла зі змоченим перлітом – (5+0,5) см. Отримані результати підтвердили здатність сипких матеріалів забезпечувати повне припинення горіння бензоетанолу та можливість їх багаторазового використання без зниження вогнегасних властивостей. На основі розрахунку комплексного параметра ефективності встановлено перевагу запропонованих систем на основі сипких матеріалів над традиційними пінними засобами (23,8–24,7 балів проти 14,0–16,3 балів). Отримані результати підтверджують доцільність і перспективність застосування таких систем для підвищення рівня пожежної безпеки під час роботи з моторними паливами, що містять біоетанол.

**Ключові слова:** бензоетанол, вогнегасна здатність, подрібнене піноскло, перліт, швидкотвердіюча піна

### 1. Вступ

Сучасними основними засобами гасіння рідин є різні типи пін [1–3]. Проте ці системи мають низку недоліків, серед яких короткий час існування піни, складність її подавання на значні відстані та недостатні економічні показники. У зв'язку з посиленням екологічних вимог, останнім часом застосування багатьох поширених піноутворювачів (ПУ) обмежено, адже вони входять до переліку речовин, регульованих Стокгольмською конвенцією про стійкі органічні забруднювачі, ратифікованою Україною (Закон № 949-V від 18 квітня 2007 р.) [4]. Можливі шляхи вирішення цієї проблеми наведено в роботі [5]. Для забезпечення відповідності вимогам Стокгольмської конвенції необхідна розробка нових, екологічно безпечних піноутворювачів, що потребує значних фінансових ресурсів і тривалого часу досліджень.

Пінні засоби пожежогасіння мають істотний недолік – обмежену універсальність. Піни отримані з ПУ загального призначення неспроможні гасити полярні рідини, а піни отримані з ПУ спеціального призначення мають невелику вогнегасну здатність під час гасіння неполярних рідин. Тому доцільна розробка нових засобів

гасіння рідин які мають велику ефективність при гасінні як полярних так і неполярних рідин.

У зв'язку з набуттям чинності Закону України «Про альтернативні види палива» [6] (дія якого тимчасово призупинена) було встановлено вимогу щодо обов'язкової наявності в моторних паливах не менше ніж 5 % біокомпонентів. У нашій країні як біокомпонент пропонується використовувати біоетанол. Введення до вуглеводневого палива полярної рідини – етанолу – змінює фізико-хімічні властивості моторного палива та створює нові умови займання і горіння, що ускладнює процес пожежогасіння. Це, у свою чергу, потребує пошуку нових вогнегасних речовин і технологічних рішень, здатних ефективно припиняти горіння спиртовмісних сумішей.

Таким чином, актуальність дослідження полягає в необхідності підвищення ефективності гасіння спиртовмісних моторних палив шляхом розроблення та визначення вогнегасної ефективності нових засобів, придатних для дії як на полярні, так і на неполярні рідини.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Основним засобом гасіння рідин у нормативних документах пропонуються різні види пін, однак вони мають низку недоліків – зокрема, короткий час існування, складність подавання на великі відстані, низькі економічні показники та обмежену універсальність при гасінні полярних і неполярних рідин. В літературних джерелах є пропозиції нових підходів для гасіння рідин. Так в роботах [7–8] проаналізовані результати з використанням механізму зриву полум'я ударними хвилями і швидкісними імпульсами струменів води, але такі засоби пожежогасіння не забезпечують відсутності повторного займання, що обмежує їх практичну ефективність при великих площах горіння.

Розглянуті удосконалення гасіння речовин дисперсною водою [9] вимагають надто високих інтенсивностей подавання вогнегасної речовини, що обмежує використання такого підходу для пожеж з малою площею горіння. Запропоновані для гасіння тверді пористі матеріали [10] потребують підвищення їх ізолюючих властивостей і підвищенню їх плавучості у горючих рідинах. Недоліком піротехнічних та спучувальних складів [11–13] є їх низькі охолоджуючі властивості. В цілому можна відмітити, що розглянуті вище засоби для гасіння рідин малоефективні при гасінні горючих рідин в разі великої площі горіння.

Особливо можна відмітити запропоновані раніш для ізоляції та гасіння розливів токсичних і горючих рідин швидкотвердіючі піни (ШТП) [14–16]. Вони здатні ефективно гасити як полярні так і неполярні рідини. ШТП мають велику перевагу перед традиційними пінними засобами за стійкістю, що приводе суттєво менших витрат вогнегасної речовини. Це в свою чергу забезпечує покращення екологічних та економічних характеристик ШТП по зрівнянню з традиційними пінами. Однак, існує обмеження у відсутності даних щодо їх ефективності при гасінні великих площ біоетанолу, що потребує подальших експериментів.

Ще одним з нових засобів гасіння рідин здатних ефективно гасити як полярні так і неполярні рідини є легкі сипкі матеріали [17–18]. Як сипкі матеріали було обрано гранульоване піноскло (ГПС) та спучені перліт. ГПС формує нижній шар який виконує функцію забезпечення плавучості бінарної системи. Спучені перліт утворюють верхній ізолюючий шар. Для підвищення ізолюючих властивостей запропоновано змочування верхнього шару водою. Вогнегасні системи гасіння рі-

дин на основі сипких матеріалів мають практично необмежену за часом стійкість навіть при дії інтенсивних теплових потоків. Крім того до їх складу не входять токсичні та екологічно небезпечні речовини. Ще однією позитивною особливістю систем на основі легких сипких матеріалів є можливість їх багаторазового використання. Аналіз показує, що ці матеріали мають практично необмежену стійкість та екологічні переваги, проте відсутні кількісні дані щодо ефективності їх використання при гасінні сумішей полярних та неполярних рідин, що залишається невирішеною частиною проблеми.

Аналіз властивостей ШТП і засобів гасіння на основі легких сипких матеріалів дозволяють зробити висновок про доцільність використання цих засобів гасіння рідин. Невирішеною частиною проблеми залишається відсутність кількісних даних щодо вогнегасної ефективності цих систем при гасінні біоетанолу, що обумовлює необхідність подальших експериментальних досліджень.

### **3. Мета та завдання дослідження**

Метою дослідження є експериментальне встановлення вогнегасної ефективності швидкотвердіючих пін і систем на основі легких сипких матеріалів, а також вибір найбільш ефективної з них.

Для цього необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести дослідження плавучості швидкотвердіючої піни і сипких матеріалів в бензоетанолі, а також насипну густину та водоутримання сипких матеріалів.
2. Експериментально визначити вогнегасну здатність обраних засобів гасіння бензоетанолу.
3. Встановити можливість повторного використання обраних сипких матеріалів при гасінні бензоетанолу.
4. Провести порівняння ефективності обраних засобів при гасінні бензоетанолу обраних вогнегасних систем.

### **4. Матеріали та методи дослідження**

Об'єктом дослідження роботи є процес гасіння бензоетанолу за допомогою швидкотвердіючих пін і вогнегасних систем на основі легких сипких матеріалів. Предмет дослідження – вогнегасна ефективність обраних засобів при гасінні бензоетанолу.

Робочою гіпотезою є перевага швидкотвердіючих пін та систем на основі сипких матеріалів за вогнегасною ефективністю порівняно з повітряно-механічними пінами.

У роботі застосовані елементи економічного аналізу та метод експертного оцінювання фінансових витрат при гасінні пожеж класу «В», а також лабораторні методики визначення вогнегасної здатності обраних засобів при гасінні бензоетанолу, модифіковані з урахуванням особливостей швидкотвердіючих пін і систем на основі сипких матеріалів.

## **5. Визначення ефективності швидкотвердіючих пін і сипких матеріалів при гасінні бензоетанолу**

### **5.1. Вибір вогнегасної системи на основі сипких матеріалів і швидкотвердіючої піни**

Вибір сипких матеріалів проводився з використанням результатів робіт [17–18]. Як матеріал нижнього шару було обрано ГПС з розміром гранул  $(12 \pm 2)$  мм. Для

верхнього шару було обрано спучений гранульований перліт з розміром кулеподібних гранул (1,2–1,5) мм. Такий розміри гранул перліту одночасно забезпечив заповнення порожнин між гранулами шару ГПС і відсутність здатності просиплюватися крізь цій шар.

Вибір піноутворюючої системи проводився враховуючи те, що найкращі ізолюючі властивості забезпечувала піноутворююча система  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$  (9 % р-н) +  $\text{NaHCO}_3$  (9 % р-н) + КМЦ (0,5 % об.) + піноутворювач «Морський» (6 % об.) [14–15] її склад було обрано за основу. Зі складу системи було виключено карбометилцелюлозу (КМЦ). Це пояснюється тим, що цей компонент додавався для того щоби підвищити час розтріскування твердої піни до 24 годин. Під час гасіння рідин така вимога до піни є надмірна.

Для обраної партії сипких матеріалів за методикою [18] було проведено експериментальне визначення насипної густини, вологоутримання і плавучості в бензоетанолі ГПС і перліту.

Вологоутримання (В) розраховувалося за співвідношенням:

$$B = m_{\text{H}_2\text{O}} / (m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{C}}), \quad (1)$$

де  $m_{\text{H}_2\text{O}}$  – маса  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $m_{\text{C}}$  – маса сухого сипкого матеріалу.

Плавучість у бензоетанолі (П) визначали візуально як відношення висоти частини шару сипкого матеріалу над рівнем рідини ( $h_{\uparrow}$ ) до його загальної висоти (h):

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

Отримані результати наведено в табл. 1.

**Табл. 1. Розмір гранул (І), плавучість в бензоетанолі (П), насипна щільність ( $\rho$ ), вологоутримання (В), для ГПС і перліту**

| Матеріал | І, мм     | П, % | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | В, % |
|----------|-----------|------|----------------------------|------|
| ГПС      | 10 – 14   | 52   | 104                        | 35   |
| перліт   | 1,2 – 1,5 | 26   | 163                        | 46   |

Для одержання ШТП в пластиковій прозорій еластичній ємності змішували однакові об'єми розчинів гелеутворювача  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$  (9 % ) + ПУ «Морський» (6% об.) і каталізатора гелеутворення  $\text{NaHCO}_3$  (9 % р-н) + ПУ «Морський» (6% об.). Після 10 с інтенсивного струшування ємності піна, що утворилась, по похилому жолобу подавалась в вогнище пожежі. Така процедура дозволяла шляхом зважування цієї ємності оцінити масу піни, що пішла на гасіння. Кратність одержаної твердої піни склала 13.

## 5.2. Експериментальне визначення вогнегасної здатності обраних засобів при гасінні бензоетанолу

Методики проведення експерименту були запозичені в роботах [14, 16, 18] Для обох двох обраних вогнегасних систем початок експерименту був однаковим. В металічну ємність з внутрішнім діаметром 11,2 см і висотою 11 см заливалось 110 мл бензоетанолу. Після підпалювання модельного вогнища і 1 хвилини вільного горіння відбувалось подавання вогнегасних речовин.

В разі використання систем, створених на основі легких сипких матеріалів в

ємність з бензоетанолом, що горить засипався базовий шар ГПС висотою 4 см. При цьому інтенсивність горіння помітно зменшилась. Надалі через кожну хвилину додатково засипався шар ГПС висотою 1 см. Це продовжувалось до тих пір поки не припиниться горіння.

Схожий експеримент було проведено з послідовною засипкою на базовий шар спученого перліту висотою по 0,5 см. Такий самий експеримент було проведено з додатковим нанесення на верхній шар сипкого матеріалу води шляхом її розпилювання з питомою поверхневою витратою  $0,1 \text{ г/см}^2$  (10 г на лабораторне модельне вогнище). При цьому вогнище вважалось таким що погашено якщо не відбувалось повторне займання під ідею зовнішнього відкритого полум'я через 10 хвилин після гасіння. Одержані результати по сипким матеріалам наведені в табл. 2.

**Табл. 2. Вогнегасні висоти (Н) та маси (М) сухих і змочених сипких матеріалів при нанесенні додаткових шарів на базовий шар піноскла**

| Сипкий матеріал | сухі  |                    | змочені |                       |
|-----------------|-------|--------------------|---------|-----------------------|
|                 | Н, см | М, $\text{г/см}^2$ | Н, см   | М, $\text{г/см}^{2*}$ |
| ГПС             | 6     | 0,6                | 2       | 0,2                   |
| ГПС+Перліт      | 0+1   | 0,16               | 0+0,5   | 0,08                  |

\* – маси наведено без урахуванням маси води ( $0,1 \text{ г/см}^2$ )

Одержані результати відносяться до випадку коли сипкий матеріал осідає на дно ємності. При цьому в рідину занурено нижній шар ГПС висотою 2 см. Вище рівня рідини знаходиться шар ГПС висотою 2 см і додатковий шар сухого або змоченого сипкого матеріалу. В більшості випадків реальної пожежі вогнегасний шар сипких матеріалів не досягає дна ємності з горючою рідиною. З використанням результатів приведених в табл. 1 за методикою наведеною в роботі [18] розраховані загальні висоти та маси вогнегасних шарів для випадку коли шар сипкого матеріалу не осідає на дно ємності з бензоетанолом (табл. 3).

**Табл. 3. Загальні вогнегасні висоти (Н) та маси (М) сухих та змочених сипких матеріалів, які потрібні для гасіння бензоетанолу і бензину в випадку коли шар сипкого матеріалу не осідає на дно ємності та маси ШТП і ПМП які потрібні для гасіння**

| Вогнегасний засіб    | сухі  |                    | змочені |                       |
|----------------------|-------|--------------------|---------|-----------------------|
|                      | Н, см | М, $\text{г/см}^2$ | Н, см   | М, $\text{г/см}^{2*}$ |
| Гасіння бензоетанолу |       |                    |         |                       |
| ГПС                  | 16    | 1,6                | 8       | 0,8                   |
| ГПС+Перліт           | 5,5+1 | 0,7                | 5+0,5   | 0,6                   |
| ШТП                  | 2,5   | 0,31               | –       | –                     |
| ПМП                  | 3,5   | 0,16               | –       | –                     |
| Гасіння бензину А-92 |       |                    |         |                       |
| ГПС                  | 18    | 1,8                | 15      | 1,5                   |
| ГПС+Перліт           | 6,5+2 | 0,9                | 5,5+1   | 0,7                   |

\* – маси розраховані без урахуванням маси води ( $0,1 \text{ г/см}^2$ )

В разі використання ШТП на поверхню бензоетанолу, що горить по похилому жолобу подавалася в текучому стані ШТП  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$  (9 мас.%) +  $\text{NaHCO}_3$  (9 мас.%) ПУ «Морський» (6 % об.) до моменту припинення горіння. Візуальне відображення проведення експерименту представлено на рис. 1.

Після припинення горіння проводився дослід на повторне займання. Маса ШТП, що пішла на гасіння склала 31 г, а вогнегасна товщина шару ШТП становила  $\sim 2,5$  см.

Також як і у випадку використання вогнище вважалось таким що погашено

якщо не відбувалось повторне займання під дією зовнішнього відкритого полум'я.

Для порівняння такі самі досліди були проведені з повітряно-механічної піною. Візуальні спостереження показали, що припинення горіння відбувається при нанесенні ПМП висотою  $\sim 2,0$  см. Але через 10 хвилин спостерігається повторне займання. Відсутність повторного займання забезпечує подавання ПМП масою 16 г, що відповідає висоті шару піни  $\sim 3,5$  см.

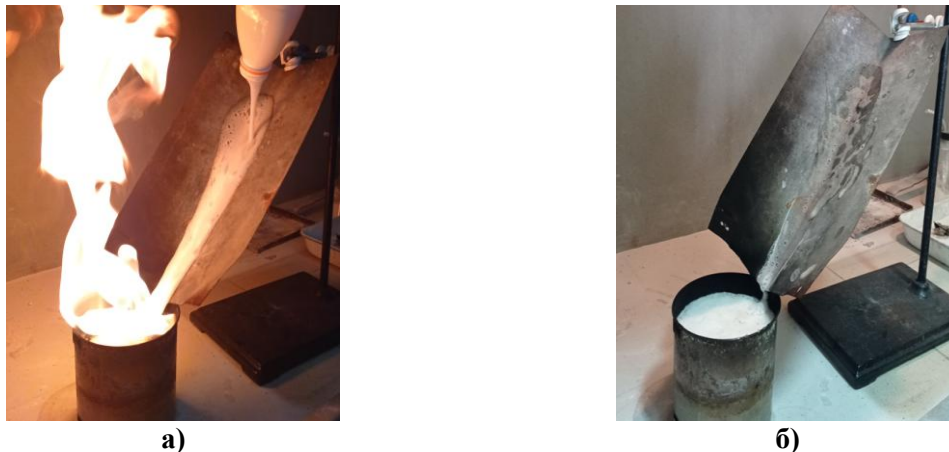


Рис. 1. Проведення експерименту з використанням ШТП на поверхні бензоетанолу: а – подавання ШТП; б – припинення горіння

Крім того було проведено досліди з дослідження руйнування ПМП і ШТП при контакті з бензоетанолом і етанолом. Вони показали, що на поверхні етанолу ПМП миттєво руйнується, на поверхні бензоетанолу руйнування відбувається повільно ( $\sim 6$  хвилин). В той же самий час ШТП не руйнується ні на поверхні етанолу ні на поверхні бензоетанолу.

### 5.3. Дослідження можливості повторного використання сипких матеріалів для гасіння бензоетанолу

В попередніх роботах була встановлена можливість використання ГПС і перліту в разі гасіння бензину, етанолу і ацетону [17–19]. По такий самий експериментальної методиці було встановлено можливості повторного використання обраних сипких матеріалів для гасіння бензоетанолу. Було встановлено що втрати сухого ГПС після просушування і просіювання крізь сіта не перевищували 5 %, а сухого перліту 2 %. Для змочених матеріалів втрати склали 3 % 1,5 %. Результати гасіння бензоетанолу в разі повторного використання сипких матеріалів не відрізнялись від їх первинного використання.

Такі самі результати було отримано і в разі третього і четвертого використання сипких матеріалів. Це підтверджує можливість багаторазового використання сипких речовин для гасіння бензоетанолу. З врахуванням результатів попередніх робіт можна припустити, що ГПС і перліт можна багаторазово використовувати для гасіння неполярних, полярних рідин і їх сумішей.

### 5.4. Оцінка комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння

Поняття ефективності вогнегасного засобу не регламентується нормативними документами і трактується дослідниками по різному. В ДСТУ 2272 : 2006 «Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять» є термін – показник вогнегасної здатності вогнегасної речовини. Він визначається як маса вогнегасної речовини (ВР), що припадає на одиницю площі модельного вогнища пожежі або його об'єму для впе-

вненого гасіння в ньому в умовах стандартного експерименту. Тобто основним параметром такого трактування є маса ВР, але таке визначення не враховує економічних, екологічних характеристик ВР та характеристик обладнання для його подавання.

У цій роботі для кількісної оцінки ефективності використано комплексний параметр ефективності вогнегасного засобу, запропонований у роботі [20]. У табл. 4 представлені результати для окремих складових цього параметру та сумарне значення загальної ефективності, отримані для ПМП, ШТП та систем ГПС + перліт, ГПС + перліт + вода і ГПС. В якості компонентів комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння обрано такі:

- 1 – вартість ВР;
- 2 – витрати на зберігання ВР;
- 3 – витрати на переробку або утилізації;
- 4 – витрати на обладнання та його експлуатацію;
- 5 – складова пов'язана з обмеженнями, які обумовлені потребою забезпечення інтенсивності подавання ВР вище критичної;
- 6 – витрати на компенсацію збитків від процесу гасіння;
- 7 – витрати на компенсацію екологічної шкоди від ВР.

**Табл. 4. Компоненти комплексного показника вогнегасної ефективності та їх сумарне значення**

| Складові комплексного показника вогнегасної ефективності, бали | Вогнегасна система |             |             |             |                 |             |
|----------------------------------------------------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|
|                                                                | ПМП                | ШТП         | ГПС         | ГПС+перліт  | ГПС+перліт+вода | ГПС+вода    |
| 1                                                              | 4                  | 3,5         | 1,3         | 1,5         | 2,8             | 2,8         |
| 2                                                              | 2,3                | 1,5         | 3,6         | 3,7         | 3,4             | 3,7         |
| 3                                                              | 2,2                | 1,7         | 4,0         | 4,0         | 4,0             | 4,0         |
| 4                                                              | 3,0                | 2,0         | 3,8         | 3,0         | 2,7             | 3,1         |
| 5                                                              | 2,0                | 2,4         | 3,8         | 3,8         | 3,6             | 3,8         |
| 6                                                              | 1,2                | 1,5         | 4,0         | 4,0         | 3,3             | 3,3         |
| 7                                                              | 1,6                | 1,4         | 4,0         | 4,0         | 4,0             | 4,0         |
| <b>1+7</b>                                                     | <b>16,3</b>        | <b>14,0</b> | <b>24,5</b> | <b>24,0</b> | <b>23,8</b>     | <b>24,7</b> |

Оцінка кожної складової проводилась за чотирибальною шкалою методом експертних оцінок.

## **6. Обговорення результатів визначення вогнегасних властивостей сипких матеріалів і пін**

У разі використання в якості критерію ефективності показника вогнегасної здатності речовин, беззаперечно перевагу демонструють ПМП і ШТП (табл. 3). Проте, оскільки досліди проводилися на модельних вогнищах пожежі класу «В» малих розмірів, перенесення цих результатів на реальні пожежі є некоректним. Це пояснюється тим, що ПМП швидко руйнується під впливом полум'я, а гасіння рідин на великій площі потребує значного часу. ШТП руйнується під дією полум'я значно повільніше. При порівнянні результатів гасіння ШТП і ПМП слід враховувати, що кратність ШТП становить 13, тоді як ПМП – 21. З урахуванням цього та даних роботи [16], при гасінні пожеж із великою площею горіння ШТП демонструє перевагу за показником вогнегасної здатності порівняно з ПМП.

Порівняння обраних засобів за комплексним параметром ефективності вказує на те, що ПМП і ШТП мають суттєву перевагу по зрівнянню з вогнегасними засобами на основі сипких матеріалів тільки за однією складовою комплексного па-

раметра ефективності – вартості ВР. Це обумовлене меншими масовими витратами пінних засобів і великим вмістом в них дешевого компонента – води.

При розгляді вогнегасних засобів на основі сипких матеріалів потрібно відмітити, що такі засоби являються стійкими до дії полум'я. Це в свою чергу забезпечує їм перевагу за рахунок відсутності суттєвої залежності результатів гасіння від інтенсивності подавання ВР (складова 5), що знижує витрати на обладнання (складова 4). Високі оцінки систем ГПС і ГПС + перліт за складовою 6 обумовлено інертністю ГПС і перліту, що мінімізує вплив їх на товарні характеристики горючої рідини.

Також вогнегасні системи на основі легких сипких матеріалів мають перевагу по зрівнянню з пінами за 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 (складова 7). Крім того встановлена можливість багаторазового використання ГПС і перліту практично виключає витрати на їх переробку або утилізацію (складова 3). Ще однією перевагою системи на основі легких сипких матеріалів є простота і великий час їх зберігання без зміни вогнегасних властивостей (складова 2).

Аналіз характеристик засобів гасіння на основі сипких матеріалів показує, що всі вони отримали високі оцінки за параметрами, що відображають витрати на компенсацію екологічної шкоди від ВР (складова 7) та витрати на переробку або утилізацію (складова 3). Крім того, слід відзначити, що за параметром 4 – витрати на обладнання та його експлуатацію – експерти віддали перевагу однокомпонентній системі ГПС. Вогнегасні системи без води отримали найвищі бали за складовою 6 – витрати на компенсацію збитків, пов'язаних із процесом гасіння. Це пояснюється тим, що додавання води до горючої рідини може призвести до утворення стійкої емульсії та погіршення товарних властивостей палива.

Аналіз всіх даних з табл. 4 дозволяє констатувати, що усі обрані системи на основі сипких матеріалів мають близькі значення комплексного показника вогнегасної ефективності за яким помітно переважають пінні засоби гасіння пожеж класу «В». Порівняння результатів гасіння бензоетанолу і бензину вказує на менші на 10–20 % витрати ВР, які потрібні для гасіння бензоетанолу.

Проведені оцінки вогнегасних характеристик базуються на експериментальних результатах отриманих на модельних вогнищах пожежі малих розмірів. Тому кількісні характеристики комплексного параметру ефективності вогнегасних засобів потребують уточнення на вогнищах великих розмірів. Крім того для об'єктивного встановлення ефективності засобів пожежогасіння треба переходити від експертної бальної системи оцінки до грошової. Для цього потрібне залучення відповідних фахівців. Також можна відмітити, що існує потреба в подальших дослідженнях вогнегасних характеристик засобів на основі сипких матеріалів для гасіння сумішей полярних і неполярних горючих рідин.

Мета роботи була досягнута шляхом проведення експериментів на модельних вогнищах пожежі та аналізу комплексного показника ефективності обраних вогнегасних засобів. Результати дозволили детально порівняти ефективність різних систем, хоча їх кількісні характеристики потребують уточнення для великих пожеж і різних умов застосування.

## 7. Висновки

1. Експериментально визначено насипну густину та водоутримання гранульованого піноскла і перліту, а також їх плавучість в бензоетанолі. Плавучість

ГПС склала 52 %, вологоутримання 35 %, для перліту – 26 % і 46 % відповідно. Ці параметри забезпечують формування стабільного вогнегасного шару і є основою для створення ефективних систем гасіння спиртовмісних палив із 5 % біоетанолу.

2. Визначені висоти вогнегасних шарів швидкотвердіючої піни, сухих і змочених піноскла та перліту під час гасіння бензоетанолу. Вони склали:

- швидкотвердіюча піна – 2,5 см,
- сухе піноскло – 16 см,
- змочене піноскло – 8 см,
- сухе піноскло + сухий перліт – (5,5+1) см,
- сухе піноскло + змочений перліт – 5+0,5 см.

Порівняння з бензином показало, що для бензоетанолу витрати вогнегасної речовини на 10–20 % менші, що обумовлено відмінними фізико-хімічними властивостями суміші палива з 5 % біоетанолу та підвищеною полярністю рідини.

3. Встановлена можливість багаторазового використання обраних сипких матеріалів при гасінні бензоетанолу. Втрати сухого ГПС після повторного використання не перевищували 5 %, перліту – 2 %, для змочених матеріалів – відповідно 3 % та 1,5 %. Результати повторного гасіння не відрізнялися від первинного, що підтверджує економічну та екологічну доцільність використання цих матеріалів у системах пожежогасіння.

4. На основі розрахунків комплексного параметру ефективності показано, що вогнегасні системи на основі сипких матеріалів мають перевагу по зрівнянню з пінними засобами вразі гасіння бензоетанолу (23,8–24,7 балів) проти (14,0–16,3 балів). Перевага обумовлена стійкістю до високої температури, можливістю багаторазового застосування, відсутністю токсичних компонентів та низьким впливом на товарні властивості палива.

### 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. Про ратифікацію Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі: Закон України від 18 квітня 2007 р. Верховна Рада України. Голос України. 2007. 19 червня. № 106. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/949-16>

5. Боровиков В. О., Слуцька О. М., Сукач Р. Ю., Войтович Д. П. Використання плівкоутворювальних піноутворювачів для гасіння пожеж у світлі положень Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі. Пожежна безпека. 2025. Вип. 46. С. 5–19. doi: 10.32447/20786662.46.2025.01

6. Про альтернативні види палива: Закон України від 14 січня 2000 р. Верховна Рада України. Голос України. 2000. 15 лютого. № 106. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1391-14>

7. 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

8. 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>

9. 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

10. 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

11. 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

12. 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

13. 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

14. Pietukhov R., Kireev A., Tregubov D., Hovalenkov S. Experimental Study of the Insulating Properties of a Lightweight Material Based on Fast-Hardening Highly Resistant Foams in Relation to Vapors of Toxic Organic Fluids. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 374–382. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.374

15. Petukhov R., Kireev A. Modeling the insulation properties of multicomponent solid foam-like material based on gel-forming systems. *Functional materials*. 2021. Vol. 28. № 3. P. 549–555. doi: 10.15407/fm28.03.549

16. 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

17. 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

18. 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. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-1

19. Кіреєв О. О., Гапон Ю. К., Чиркіна-Харламова М. А., Нуянзін В. М.,

Майборода А. О. Вогнегасна ефективність легких сипких матеріалів при гасінні ацетону. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2025. № 1(41). С. 100–113. doi: 10.52363/2524-0226-2025-41-7

20. 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

*A. Kireev<sup>1</sup>, DSc, Professor, Professor of the Department*

*Yu. Hapon<sup>2</sup>, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*

*M. Chyrkina-Kharlamova<sup>1</sup>, PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department*

*O. Danyk<sup>1</sup>, Senior Lecturer of the Department*

*K. Rusenko<sup>1</sup>, Lecturer of the Department*

<sup>1</sup>National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkassy, Ukraine

<sup>2</sup>Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, Ukraine

### DETERMINING THE EFFECTIVENESS OF NEW AGENTS DURING THE EXTINCTION OF ALCOHOL-CONTAINING MOTOR FUELS

The paper presents the results of experimental studies on the effectiveness of new combined fire extinguishing systems during the elimination of fires involving alcohol-containing motor fuels containing 5% bioethanol. The introduction of a polar component – ethanol – into the composition of hydrocarbon fuel causes a change in its combustible properties and requires the creation of special extinguishing agents capable of effectively stopping the combustion of such mixtures. The research was carried out using an improved experimental technique, which involved the use of a small laboratory model fire of class “B” and the application of a base layer of loose material 4 cm thick. Granulated foam glass and expanded perlite with varying degrees of moisture content were used as study objects, as well as fast-setting foam applied to the surface of burning benzene ethanol. The bulk density, water retention, and buoyancy of loose materials in benzene ethanol were determined experimentally, which made it possible to evaluate their stability and behavior at the phase boundary during extinguishing. The optimal heights of the fire-extinguishing layers were established: for fast-setting foam – 2.5 cm, dry foam glass – 16 cm, moistened foam glass – 8 cm, a combination of dry foam glass with dry perlite – (5.5+1) cm, and a combination of dry foam glass with moistened perlite – (5+0.5) cm. The results confirmed the ability of loose materials to completely extinguish the combustion of benzoethanol and the possibility of their repeated use without reducing their fire-extinguishing properties. Based on the calculation of the comprehensive efficiency parameter, the proposed systems based on loose materials were found to be superior to traditional foam agents (23.8–24.7 points versus 14.0–16.3 points). The results confirm the feasibility and promise of using such systems to improve fire safety when working with motor fuels containing bioethanol.

**Keywords:** benzene ethanol, fire extinguishing capacity, crushed foam glass, perlite, fast-setting foam

### 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. Available at: <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: Fire Safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-42-3

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. Verkhovna Rada Ukrainy (2014). Pro ratyfikatsiiu Stokholmskoi konventsii pro stiiki orhanichni zabrudniuvachi: Zakon Ukrainy. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1700-18>

5. Borovykov, V. O., Slutska, O. M., Sukach, R. Yu., Voitovych, D. P. (2025). Vykorystannia plivkoutvoriuvalnykh pinoutvoriuvachiv dlia hasinnia pozhezh u svitli polozhen Stokholmskoi konventsii pro stiiki orhanichni zabrudniuvachi. Pozhezhna bezpeka, 46, 5–19. doi: 10.32447/20786662.46.2025.01

6. Verkhovna Rada Ukrainy (2000). Pro alternatyvni vydy palyva: Zakon Ukrainy. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1391-14>

7. 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

8. 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>

9. 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

10. 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

11. 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

12. 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

13. 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

14. Pietukhov, R., Kireev, A., Tregubov, D., Hovalenkov, S. (2021) Experimental Study of the Insulating Properties of a Lightweight Material Based on Fast-Hardening Highly Resistant Foams in Relation to Vapors of Toxic Organic Fluids. Materials Science Forum, 1038, 374–382. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.374

15. Petukhov, R., Kireev, A. (2021). Modeling the insulation properties of multi-component solid foam-like material based on gel-forming systems. Functional materials, 3, 549–555. doi: 10.15407/fm28.03.549

16. Musayev, M., Dadashov, I., Kireev, O., Khudiyev, R. (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

17. 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

18. 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. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-1

19. Kirieiev, O., Hapon, Yu., Chyrkina-Kharlamova, M., Nuianzin, V., Maiboroda, A. (2025). Vohnehasna efektyvnist lehkykh sypkykh materialiv pry hasinni atsetonu. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 1(41), 100–113. doi: 10.52363/2524-0226-2025-41-7

20. 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

Надійшла до редколегії: 14.09.2025

Прийнята до друку: 15.10.2025