

УДК 614.84

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

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

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

Є. Д. Слепужніков, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-5449-3512)

О. В. Черкашин, к.пед.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0003-3383-7803)

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ВИБІР НАЙБІЛЬШ ЕФЕКТИВНОГО ЗАСОБУ ГАСІННЯ ЛЕГКОЗАЙМИСТИХ РІДИН

Проведено порівняння ефективності існуючих і нових засобів гасіння резервуарів зі стаціонарним дахом, що містять легкозаймісті рідини. В якості горючих рідин розглянуто легкозаймісті рідини. Обґрунтовано, що високі вогнегасні характеристики при гасінні легкозаймістих речовин можуть забезпечити такі засоби в яких домінуючим механізмом припинення горіння є ізоляція поверхні рідини від зони горіння. У світі в якості основного засобу гасіння рідин вимагають використовувати повітряно-механічні піни. Але для них властивий ряд недоліків. Одним з яких є мала стійкість піни від дії теплового потоку від полум'я рідини, що горить. Як альтернатива повітряно-механічним пінам запропоновано розглянути розроблені піни швидкого твердіння, а також системи піноскло + гель, піноскло + сипкий матеріал і піноскло + сипкий матеріал + вода. Для порівняння властивостей нових вогнегасних систем і повітряно-механічних пін запропоновано використати кількісний комплексний параметр ефективності засобів пожежогасіння. Цей параметр враховує фінансові витрати на: вогнегасні речовини, їх зберігання, переробку або утилізацію після закінчення строку їх зберігання; обладнання та його експлуатацію; залучення додаткової техніки та персоналу, компенсацію збитків від процесу гасіння; компенсацію екологічної шкоди від вогнегасних речовин. В цілому комплексний параметр ефективності розраховуються як сума сімох обраних фінансових складових. На першому етапі запропоновано використати спрощений бальний варіант розрахунку комплексного економічного параметру ефективності. Для цього складові ефективності визначається методом експертних оцінок. Найбільше значення комплексного параметру ефективності показали дві вогнегасних системи піноскло + сипкий матеріал і піноскло + сипкий матеріал + вода. Для цих системи пропонується провести відповідні експериментальні дослідження на модельних вогнищах пожежі великого розміру.

Ключові слова: вогнегасна ефективність, гелеутворюючі легкозаймісті рідини, економічні параметри, піна швидкого твердіння, сипкі матеріали

1. Вступ

З моменту появи горючих рідин виникла проблема з їх гасіння. До теперішнього часу відбувається зростання об'ємів використання горючих рідин, що використовуються в різних галузях людського життя. Щорічно в світі виникає тисячі пожеж за участю таких рідин [1]. Найбільші труднощі виникають під час гасіння пожеж легкозаймістих рідин (ЛЗР) в резервуарах великих розмірів. Забезпечення гасіння таких пожеж потребує залучення великої кількості сил та засобів. У всьому світі нормативні документи в якості основного засобу гасіння рідин передбачають використання повітряно-механічних пін (ПМП) [2–6].

Для пінних засобів пожежогасіння властивий ряд недоліків. Одним з них є обмежений час існування піни на поверхні рідини, що горить. Це дозволяє зробити висновок, що для підвищення ефективності гасіння горючих рідин (ГР) і ЛЗР потребує створення більш стійкого до руйнування засобу пожежогасіння. Крім того, до недоліків пінних засобів пожежогасіння рідин можна віднести невисокі еколого-токсикологічні і економічні характеристики пін [7].

Для вибору найбільш ефективного вогнегасного засобу пожежогасіння є потреба у визначенні поняття ефективності пожежогасіння і факторів які визначають

його. Такі фактори повинні базуватися на врахуванні економічних складових процесу пожежогасіння. У більшості наукових публікацій розглядалися тільки фінансові витрати на вогнегасні речовини та обладнання. Таким чином можна констатувати актуальність потреби в розробці кількісних економічних характеристик ефективності засобів гасіння пожеж і вибору найбільш ефективного вогнегасного засобу.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В теперішній час проводяться дослідження у напрямку підвищення ефективності засобів гасіння рідин. Значна їх частина спрямована на підвищення ефективності пінних засобів пожежогасіння. Так, вже впроваджено в практику пожежогасіння використання плівкоутворювальних піноутворювачів (ПУ) і компресійних пін. З нових розробок в цьому напрямку можна відмітити піни швидкого тверднення (ПШТ) [8] Вони були запропоновані для ізоляції розливів токсичних рідин. В роботах [9–10] було обґрунтовано використання ПШТ для гасіння рідин та визначено їх вогнегасну здатність при гасінні бензину.

Аналіз цих робіт дозволяє зробити висновок на багаторазову перевагу ПШТ по зрівнянню традиційними повітряно-механічними пінами (ПМП) за їх стійкістю і вогнегасною здатністю. Вогнегасна висота шару такої піни при гасінні бензину складає 2,5 см. Але одночасно наведені в відмічених роботах дані вказують, що не зважаючи на те, що візуально тверда піна зберігає свою цілісність декілька годин, вона з часом зменшує свої ізолюючі властивості.

Також можна виділити інші дослідження, спрямовані на покращення ефективності засобів гасіння рідин. В роботі [11] проведено моделювання створення протипожежної перешкоди за допомогою вибуху горючого заряду. Але використання такого підходу для гасіння резервуарів з рідинами не є об'єктивним, у зв'язку із можливістю руйнування під час вибуху ємності, що горить. В роботі [12] запропоновано використання імпульсного високошвидкісного струменя води для гасіння викиду парів газу. Основним механізмом гасіння в такому випадку є зрив полум'я. Здійснити такий метод гасіння резервуарів великих розмірів практично неможливо, оскільки важко забезпечити одночасне охоплення високошвидкісним струменем всієї поверхні горючої речовини.

В роботі [13] запропоновано удосконалення установки пожежогасіння дрібнодисперсною водою. Такий метод гасіння горючих рідин доцільно використання тільки для пожеж малої площі.

Результати роботи [14] можуть бути використані для підвищення ефективності гасіння пожеж класу «В» за допомогою пористих матеріалів. Проте в ній не представлено жодних конкретних рекомендацій щодо гасіння рідин. Результати математичного моделювання вогнезахисної ефективності покриттів на основі силікатної композиції наведені в роботі [15], що дозволяє провести оцінку теплоізолюючих властивостей відповідних покриттів нанесених на поверхню шару сипких матеріалів, які використовуються для гасіння рідин. Останній метод гасіння буде розглянуто нижче.

В роботі [16] наведено підхід до розрахунку вогнестійкості сталевих конструкцій з нанесенням спучуваючих покриттів, який доцільно використати для планування комплексу заходів із захисту резервуарів від теплового випромінювання сусідніх ємностей, що горять. Дослідження спрямоване на поліпшення екологічних характеристик піротехнічних аерозольних генераторів для гасіння пожеж різних класів [17]. Такий засіб пожежогасіння вважається перспективним для гасіння різних видів пожеж, але

його доцільно використання тільки для пожеж класу «В» малої площі.

На основі аналізу літературних даних в роботі [18] зроблено висновок про більшу перспективність розробки нових засобів гасіння рідин в яких в якості домінуючого механізму припинення горіння реалізується ізолюючий механізм. Такий механізм реалізується при використанні ПШТ [9–10], вогнегасних систем піноскло (ПС) + гель [18], ПС + сипкий матеріал (СМ), ПС + СМ + вода [19–20].

Кожен з цих методів має свої переваги і недоліки. Тому існує задача вибору найбільш ефективного методу гасіння пожеж резервуарів з горючими рідинами. Частково це питання розглянуто у роботах [18–20], але з часу їх публікації з'явилися нові данні та підходи к співставленню ефективність вогнегасних засобів.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми вибору найбільш ефективного вогнегасного засобу для гасіння резервуарів з горючими рідинами є прийняття до уваги нових даних і розробки критеріїв їх ефективності.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка кількісних критеріїв ефективності засобів пожежогасіння і вибір на їх основі нових найбільш ефективних методів гасіння пожеж резервуарів з легкозаймистими рідинами.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

1. Визначити поняття ефективності пожежогасіння і фактори, які визначають його.
2. Розробити кількісний комплексний параметр ефективності засобів пожежогасіння.
3. Провести вибір нових засобів пожежогасіння резервуарів з легкозаймистими рідинами для подальшого аналізу їх ефективності.
4. Провести вибір найбільш ефективного засобу пожежогасіння резервуарів з легкозаймистими рідинами.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес гасіння пожеж резервуарів з легкозаймистими рідинами.

Предметом дослідження є аналіз ефективності нових методів гасіння резервуарів легкозаймистими рідинами.

Основна гіпотеза дослідження полягає в можливості оцінки ефективності вогнегасного засобу за допомогою кількісного комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння який базується на економічних параметрах вогнегасної системи.

Методи дослідження:

- комплексний аналіз і узагальнення літературних даних з визначення вогнегасної здатності нових засобів гасіння пожеж класу «В», в яких реалізується ізолюючий механізм припинення горіння;
- аналіз лабораторних і натурних методів визначення вогнегасної здатності засобів гасіння легкозаймистих рідин;
- стандартні експериментальні методи визначення вогнегасних характеристик засобів пожежогасіння, які модифіковані з урахуванням особливостей систем на основі сипких матеріалів і швидкотвердіючих пін;
- порівняльний аналіз фізико-хімічних характеристик, та економічних параметрів речовин і матеріалів, які використовуються в різних способах гасіння пожеж;

– елементи економічного аналізу і метода експертного оцінювання фінансових втрат при гасінні ЛЗР.

5. Вибір нових ефективних методів гасіння пожеж резервуарів з легкозаймистими рідинами

5.1. Визначення поняття ефективності пожежогасіння і факторів, які визначають його

В ДСТУ 2272 : 2006 «Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять» відсутнє поняття ефективність пожежогасіння. Але є термін – показник вогнегасної здатності вогнегасної речовини. Він визначається як маса вогнегасної речовини, що припадає на одиницю площі модельного вогнища пожежі або його об'єму для впевненого гасіння в ньому в умовах стандартного експерименту.

Також в цьому державному стандарті є термін показник вогнегасної здатності технічного засобу пожежогасіння – площа модельного вогнища пожежі або об'єм (площа) модельної споруди з модельним(и) вогнищем(-ами) пожежі, в якому (на якій) вогонь можна впевнено загасити за допомогою одного технічного засобу пожежогасіння в умовах стандартного експерименту. В цьому випадку з урахуванням того, що в технічному засобі міститься строго визначена маса вогнегасної речовини можна констатувати, що показник вогнегасної здатності як речовини так і технічного засобу пожежогасіння дорівнює масі вогнегасної речовини потрібної для гасіння одиниці площі або об'єму модельного вогнища пожежі. Тобто показник вогнегасної здатності (V_z) можна математично визначити формулою:

$$V_z = \frac{m}{S}, \quad (1)$$

де m – маса вогнегасної речовини потрібної для гасіння, S – площа поверхні горіння.

В науковій та навчальній літературі [18–21] термін вогнегасна ефективність трактується більш широко ніж показник вогнегасної здатності. Він звичайно включає в собі крім масових витрат вогнегасної речовини їх економічні та екологічні параметри, експлуатаційні характеристики обладнання і вогнегасних речовин, можливі збитки від дії вогнегасних речовин. В разі гасіння пожеж резервуарів основним збитком є забруднення горючої рідини вогнегасними речовинами. Це призводить до неможливості її реалізації та в багатьох випадках унеможливує її переробку.

При оцінці економічних параметрів різних методів гасіння враховувалася вартість речовин та устаткування для їх подачі і зберігання, а також експлуатаційні витрати. Крім того під час вибору ефективного засобу гасіння доцільно враховувати універсальність методу пожежогасіння. Перевага треба віддати таким вогнегасним засобам, якими можна гасити різні види рідин: ГР, ЛЗР, полярні і неполярні.

5.2. Розробка кількісного комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння.

В роботах [20, 22] запропоновано для оцінки ефективності вогнегасних засобів використовувати комплексний параметр ефективності (E_f):

$$E_f = \frac{\text{результат}}{\text{вартість}}. \quad (2)$$

Під результатом мається на увазі – гасіння пожежі резервуару. В цій роботі в якості економічного параметру – прийнята вартість вогнегасних речовин, яка пішла на гасіння. В загальному випадку фінансовий параметр набагато складніший. Він повинен крім вартості вогнегасних речовин (ВР) (складова 1) враховувати такі фінансові витрати:

- складова (2) на зберігання ВР;
 - складова (3) переробку або утилізацію ВР після закінчення строку їх зберігання;
 - складова (4) на обладнання та його експлуатацію;
 - складова (5) пов'язана з обмеженнями, які обумовлені потребою забезпечення інтенсивності подавання ВР вище критичної;
 - складова (6) на компенсацію збитків від процесу гасіння;
 - складова (7) на компенсацію екологічної шкоди від ВР;
- Тоді загальна ефективність буде дорівнювати сумі декількох складових:

$$E_f = E_{f1} + E_{f2} + E_{f3} + E_{f4} + E_{f5} + E_{f6} + E_{f7}. \quad (3)$$

В роботах [20, 22] розглянуто тільки одну складову, яку відносно легко визначити – фінансові витрати на ВР. Інші економічні параметри визначити більш складно, деякі з них заздалегідь визначити неможливо. Це в першу чергу відноситься до нових перспективних засобів гасіння. Для них, ще не розроблено обладнання яке можна використовувати для гасіння реальних пожеж.

На першому етапі можна запропонувати спрощений бальний варіант розрахунку комплексного економічного параметру. Для цього кожна складова ефективності визначається методом експертних оцінок [23]. Для експертів надається інформація по кожному методу гасіння з наведенням відповідних даних з масових витратах ВР, вартості ВР, потрібного обладнання, умов зберігання ВР, особливостей переробки або утилізації ВР, впливу ВР на рідини під час гасіння та токсико-екологічних характеристик ВР. Крім того, відмічається особливість таких засобів пожежогасіння для яких нема обмежень з забезпечення інтенсивності подавання ВР. До таких засобів відноситься система ПС + СМ. В цієї системі ізолюючий шар на поверхні ЛЗР не руйнується під впливом теплового випромінювання від полум'я. Не суттєві обмеження з інтенсивності подавання компонентів ВР відноситься до ПШТ, вогнегасних систем піноскло (ПС) + гель, ПС + СМ + вода. Це пояснюється тим, що компоненти цих систем наносяться на такий шар ПС, який забезпечує низьку інтенсивність горіння ЛЗР А також тим, що ПШТ і гель мають високу вогнестійкість.

Підбір експертів проводився з урахуванням їх компетентності для оцінки відповідного параметру. Нижче наведено запропоновану бальну шкалу внеску різних складових вогнегасної ефективності в комплексний параметр ефективності вогнегасного засобу:

- 1 – низьке значення;
- 2 – середнє значення;
- 3 – високе значення;
- 4 – дуже високе значення.

5.3. Вибір засобів пожежогасіння резервуарів з легкозаймистими рідинами для аналізу ефективності

Раніше було обґрунтовано перевагу методів гасіння ЛЗР в резервуарах в яких домінуючим механізмом припинення горіння є ізоляція поверхні рідини [18]. На відміну від інших методів гасіння, в яких не реалізується ізолюючий механізм припинення горіння, вони дозволяють за рахунок ізоляції поверхні рідини забезпечити зниження концентрації парів рідини одночасно над усієї поверхнею менше нижньої концентраційної межі поширення полум'я.

З розглянутих вище нових методів гасіння пожеж класу «В» цей механізм реалізується в ПШТ та системах ПС+гель, ПС + СМ і ПС + СМ + вода. В якості СМ обрані дані для спученого перліту з розміром гранул з розміром гранул кулеподібної форми (1,2±0,2) мм. Подрібнене піноскло уявляло собою гранули неправильної форми розміром 10–15 мм. Піноутворювальна система для одержання ПШТ мала склад $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,5\text{SiO}_2$ (9 %)+ NaHCO_3 (9 %)+ПУ(6 %)+карбометилцелюлоза (КМЦ) (0,5 %). За даними робіт [8, 9–10, 18–20] ці вогнегасні системи можуть забезпечити більший по зрівнянню з ПМП час існування ізолюючого шару. Ці висновки відносяться до ЛЗР.

Для адекватного порівняння вогнегасної ефективності різних засобів пожежогасіння їх характеристики потрібно порівнювати за однакових умов проведення експерименту. Результати робіт [10, 20] дозволяють це зробити для всіх обраних систем в разі вибору результатів, отриманих на стандартизованому модельному вогнищі пожежі «2В». В потрібних випадках приведені в роботах дані по витратам вогнегасних речовин на гасіння перераховані в $\text{кг}/\text{м}^2$. Також в цієї роботі для порівняння були розраховані складові вогнегасної ефективності і комплексний параметр ефективності вогнегасного засобу для ПМП. Треба відмітити, що в розглянутих роботах не приймався до уваги такий параметр, як оптимальна інтенсивність подавання ВР. Це пов'язано з тим, що для обраних нових вогнегасних систем інтенсивність подавання ВР практично не впливає на її масову витрату. Це обумовлено тим, що вогнегасні шари сипких матеріалів практично не руйнуються під дією полум'я.

5.4. Вибір найбільш ефективного засобу пожежогасіння резервуарів з легкозаймистими рідинами

З відмічених вище робіт були обрані данні з вогнегасної здатності нових вогнегасних засобів для випадку гасіння ними найбільш поширеної ЛЗР – бензину. На цій основі була проведена експертна оцінка складових комплексного параметру ефективності вогнегасного засобу (E_f (1–7) та сумарне значення цього параметру (E_f). Для отримання експертних оцінок було залучено 9 практичних і наукових фахівців різних спеціальностей в областях пожежогасіння, переробки нафти, пожежної техніки, хімічної технології, економіки та екології. При цьому було використано напівсліпий метод – по можливості не вказувалось конкретний засіб пожежогасіння, а тільки загальні характеристики потрібного обладнання, речовин, матеріалів, їх вартість, вогнегасну здатність та клас небезпеки речовин. Винятком було розкриття тільки одного засобу пожежогасіння – ПМП. Відповідні складові комплексного параметру ефективності потрібно було оцінити використовуючи запропоновану бальну шкалу внеску різних складових вогнегасної ефективності в комплексний параметр ефективності вогнегасного засобу. Кожен експерт самостійно вибирав для оцінювання складову комплексного параметру ефективності в якій він вважав собі компетентним.

Нижче в табл. 1 наведені середні результати для кожної складової комплексного параметру ефективності вогнегасного засобу та сумарне значення загального параметру ефективності, які отримані для ПШТ та систем ПС+гель, ПС + СМ і ПС + СМ + вода. Також наведені відповідні результати для ПМП, які отримані при гасінні стандартизованого модельного вапнища пожежі «2В». У випадку вогнегасної здатності ПМП результати визначення фінансових витрат на ВР суттєво відрізняються від таких, що наведено в роботах [18–20].

В цих роботах вогнегасну здатність ПМП розраховано входячи з нормативних вимог з інтенсивності і часу подавання піни на гасіння резервуару РВС – 5000 [24].

Табл. 1. Вогнегасна здатність, складові показника вогнегасної ефективності (Еф 1-7) та сумарне значення комплексного параметру ефективності (Еф)

Складові комплексного показника вогнегасної ефективності	Вогнегасна система/ Вогнегасна здатність, кг/м ²				
	ПМП/ 2,6–2,9*, 26–29**	ПШТ/ 2,8*, 5,6**	ПС+гель/ 12+2	ПС+СМ/ 6,7+3,2	ПС+СМ+ +вода/6,7+ +1,6+2,0
Еф1, грн	9,4 – 10,4	28,5	250	219	185
Еф1 бали	4	3,5	1,2	1,3	2,2
Еф2 бали	2,3	1,5	1,8	3,7	3,3
Еф3 бали	2,2	1,7	2,5	3,8	3,8
Еф4 бали	3,0	2,0	1,4	3,0	2,6
Еф5 бали	2,2	2,4	3,0	3,8	3,2
Еф6 бали	1,2	1,5	2,8	4,0	3,3
Еф7 бали	1,6	1,6	2,6	4,0	3,8
Еф бали	16,5	15,2	15,3	23,6	22,2

* – без урахування руйнування піни.

** – з урахуванням руйнування піни.

Це пояснюється тим, що гасіння стандартизованого модельного вогнища пожежі «2В» відбувається протягом 10–20 с, а гасіння ПМП резервуарів великого розміру потребує десятки хвилин. За такий час значна частина піни руйнується. Це в свою чергу збільшує загальну витрату піни в десятки разів. Для подальших розрахунків вогнегасної здатності приймемо, що в ході гасіння руйнується ~90 % ПМП.

У випадку використання ПШТ її руйнування на порядок менше ніж ПМП [10]. В цієї роботі прийнято, що в ході гасіння руйнується 50 % ПШТ. Для вогнегасних систем ПС+гель, ПС + СМ і ПС + СМ + вода верхній ізолюючий шар практично не руйнується. Тому її витрати на гасіння резервуарів великого розміру будуть близькими до таких, що отримані під час гасіння стандартизованого модельного вогнища пожежі «2В».

6. Обговорення результатів визначення комплексного параметру ефективності

На відміну від більшості попередніх оцінок ефективності вогнегасних засобів пожежогасіння було обрано економічний підхід, який враховує сім складових. При цьому експертам були надані такі дані:

- показник вогнегасної ефективності;
- вартості ВР;
- умови і гарантований час зберігання ВР;
- оцінка витрат на переробку або утилізацію ВР після закінчення строку їх зберігання;

- запропоноване обладнання для подавання ВР, та особливості його експлуатації;

- обмеження з забезпечення інтенсивності подавання ВР вище критичної;

- вплив ВР на властивості рідини яку гасять, вартість цієї рідини;

- клас небезпеки ВР, їх летучість, розчинність у воді і вуглеводневих рідинах.

Особливостями запропонованого підходу є використання методу експертних оцінок і чотирьох бальна шкала оцінювання комплексного параметру ефективності пожежогасіння.

За показником вогнегасної здатності найкращі результати показали ПШТ, трохи гірші ПМП. Але цей показник не є економічним і враховується параметром Еф1.

Еф1. За вартістю компонентів ВР найкращі результати мають ПМП. Це обумовлено тим, що в ПШТ в їх складі крім ПУ присутні такі речовини: $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,5\text{SiO}_2$ (9 %), NaHCO_3 (9 %) і + КМЦ(0,5 %). Системи на основі сипких матеріалів (ПС+гель, ПС + СМ і ПС + СМ + вода) мають гірші показники за параметром вогнегасна здатність і вартості ВР.

Еф2. За параметром «витрати на зберігання ВР» вогнегасні системи ПС + СМ і ПС + СМ + вода мають безумовну перевагу, вони мають не обмежений час зберігання та не потребують особливих вимог до умов зберігання. На відміну від них ШТП і система ПС+гель мають в своєму складі два розчини, які потребують окремого зберігання. Причому склад цих розчинів потрібно підтримувати в строго визначених межах. Це вимагає ізоляції цих розчинів від контакту з атмосферним повітрям. Крім того, розчини з гелеутворювачем – силікатом натрію потребують захисту від їх замерзання, а їх гарантований термін зберігання складає 1 рік.

Еф3. За параметром «витрата на переробку або утилізацію ВР після закінчення строку їх зберігання» найкращий показник мають вогнегасні системи ПС + СМ і ПС + СМ + вода, завдяки тому, що їх компоненти мають не обмежений час зберігання та їх можна повторно використовувати після гасіння ЛЗР після простої процедури висушування. Найгірші показники за цим параметром мають системи ПШТ та ПС+гель, завдяки їх багатокомпонентності. ПМП мають більш високий показник за цим параметром тому, що має в своєму складі тільки один компонент – ПУ, який можна використовувати за іншим призначенням як поверхнево-активну речовину.

Еф4. Складним параметром для оцінювання експертами є складова комплексного параметра ефективності вогнегасного засобу пов'язана з оцінкою витрат на обладнання та його експлуатацію. Це обумовлено тим що більшості фахівців з пожежної безпеки маловідомі засоби для подавання сипких матеріалів. Але можна відмітити, що такі засоби реально існують і їх можна пристосувати для подавання ПС і СМ. Більшість експертів надали найбільшу оцінку засобам подавання ПМП і системі ПС+СМ завдяки з потребою подавання тільки одного та двох складових. Меншу оцінку отримала система ПС+гель, яка потребує крім подавання ПС ще і роздільне-одночасне подавання двох розчинів – гелеутворювача і каталізатора гелеутворення. Вогнегасна система ПС+СМ+вода також отримала низьку оцінку завдяки потребу роздільного подавання трьох складових системи.

Еф5. Складова комплексного параметра ефективності вогнегасного засобу пов'язана з потребою або відсутності потреби забезпечення інтенсивності подавання ВР яка перевищує критичну інтенсивність. В разі відсутності такої потреби можна зменшити потужність відповідного обладнання. Найбільшу кількість балів отримала система ПС+СМ, а найменшу ПМП. Для останньої системи характерна низька стійкість по відношенню до теплового випромінювання від полум'я рід-

ни, що горить. Це в сою чергу потребує таку інтенсивність подавання піни, яка перевищує швидкість її руйнування.

Еф6. За параметром пов'язаним з компенсацію збитків від процесу гасіння було прийнято до уваги, що в разі гасіння пожеж резервуарів основним збитком є забруднення горючої рідини вогнегасними речовинами. Важливість цього економічного параметру можна оцінити розрахував вартість зіпсованого бензину під час гасіння резервуару місткістю 5000 м³. Якщо прийняти оптову вартість 1 л бензину 40 грн, то економічні втрати складуть 200 млн грн. За цим параметром перевагу мають вогнегасні системи ПС+СМ і ПС+СМ+вода. Обидва сипких матеріали не токсичні, хімічно і термостійкі, вони не розчинюються в більшості горючих рідин. Їх видалення з більшості ЛЗР відносно проста задача. Наявність ПУ в ПМП і ПШТ приводе до суттєвого забруднення рідини яку гасять в зв'язку з утворенням стійкої емульсії.

Еф7. Оцінювання втрат на компенсацію екологічної шкоди від ВР показує, що за цим параметром перевагу мають вогнегасні системи ПС+СМ і ПС+СМ+вода. Це обумовлено тим, що їх компоненти не токсичні, хімічно інертні, термостійкі і вони класифікуються як речовини 4 класу небезпеки.

Еф. Дані отримані сумуванням складових ефективності Еф(1–7) вказують, що за сумарним комплексним параметром ефективності вогнегасного засобу найкращі результати отримали системи ПС+СМ і ПС+СМ+вода. Це обумовлено високими оцінками за параметрами: витрати на зберігання ВР, витрата на переробку або утилізацію ВР після закінчення строку їх зберігання, відсутності потреби забезпечення інтенсивності подавання ВР яка перевищує критичну інтенсивність, компенсацію збитків від процесу гасіння, компенсацію екологічної шкоди від ВР.

Крім цього до позитивних характеристик цих засобів гасіння які не включено до економічних параметрів можна відмітити великий термін зберігання ізолюючих властивостей та наявність виробництв ПС і СМ в Україні.

В багатьох роботах основна увага при оцінюванні економічних характеристик вогнегасних засобів обираються тільки фінансові витрати на ВР. В роботах [10, 18–20, 22] наведено дані які дозволяють розрахувати витрати на ВР при гасінні резервуару РВС-5000 (площа 400 м²) з бензином. Вони складають для вогнегасних систем ПМП, ПШТ, ПС+гель, ПС + СМ і ПС + СМ+ + вода 400 тис. грн, 11,4 тис. грн, 100 тис. грн, 87,6 тис. грн і 73,6 тис. грн відповідно. Це на багато порядків менше вартості зіпсованого бензину – 200 млн грн. Одночасно це вказує на необхідність враховувати додаткових економічних складових процесу: гасіння резервуарів з ЛЗР.

Подальшими напрямками досліджень є – проведення експериментальних досліджень на модельних вогнищах пожежі великого розміру та оцінка ефективності засобів гасіння висококиплячих і полярних рідин з використанням запропонованого підходу. При цьому треба бути прийняти до розгляду також засоби пожежогасіння в яких в більшій ступені реалізуються інші механізми припинення горіння. Крім цього треба переходити від бальної системи оцінки економічного параметру до грошової. Це потребує залучення відповідних фахівців.

7. Висновки

1. Обґрунтовано введення поняття економічної ефективності пожежогасіння і факторів які визначають його.

2. Розроблено кількісний комплексний параметр ефективності засобів пожежо-

гасіння який включає 7 економічних складових, які обумовлені фінансовими витратами на: вогнегасні речовини; зберігання вогнегасних речовин; переробку або утилізацію вогнегасних речовин після закінчення строку їх зберігання; обладнання та його експлуатацію; забезпечення інтенсивності подавання ВР яка перевищує критичну інтенсивність; компенсацію збитків від процесу гасіння; компенсацію екологічної шкоди від вогнегасних речовин. Для розрахунку складових ефективності засобів пожежогасіння запропонована 4-х бальна система оцінювання.

3. Проведено вибір нових засобів пожежогасіння резервуарів з легкозаймистими рідинами: піни швидкого твердження, системи піноскло + гель, піноскло + сипкий матеріал і піноскло + сипкий матеріал + вода.

4. Методом експертних оцінок визначено 7 складових вогнегасної ефективності і сумарний комплексний параметр вогнегасної ефективності обраних засобів пожежогасіння. Для порівняння проведено розрахунок комплексного параметру ефективності для повітряно-механічних пін. За значенням комплексного параметру ефективності розглянуті вогнегасні системи розташувалися в наступному порядку: піноскло + сипкий матеріал – 23,6; піноскло + сипкий матеріал + вода – 22,2; повітряно-механічні піни – 16,5; піноскло + гель – 15,3; піни швидкого твердження – 15,2.

Література

1. Hylton J. G., Stein G. P. U.S. Fire Department Profile. National Fire Protection Association. 2017. URL: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics/Fire-service/osfdprofile.pdf>

2. 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>

3. 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>

4. 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>

5. EN 1568-4. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 4: Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-miscible liquids. European committee for standardization, 2018. 55 p. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/333cc3e6-35bc-4525-9e86-7c51a8be409f/en-1568-4-2018>

6. ДСТУ EN 2:2014 Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63091

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. Pietukhov R., Kireev A., Tregubov D., Hovalenkov S. Experimental Study of the Insulating Properties of a Lightweight Material Based on Fast-Hardening Highly Fire Safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-40-3

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

9. Musayev M. E., Dadashov I. F. Development of a single means for preventing the evaporation of toxic liquids and extinguishing class B fires. *Academy of the Ministry of Emergencies of the Republic of Azerbaijan*. 2021. Vol. 3–4. C. 117–124. URL: <https://engineeringmechanics.az/uploads/2023/05/8-fhn-akademiya-musayev-meqale-03-11-2021.pdf>

10. 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

11. 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

12. Semko A., Rusanova O., Kazak O., Beskrovnaya M., Vinogradov S., Gricina I. The use of pulsed high-speed liquid jet for putting out gas blow-out. *The International Journal of Multiphysics*. 2015. Vol. 9(1). P. 9–20. doi: 10.1260/1750-9548.9.1.9/

13. 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/

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

15. 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

16. 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/mateccconf/201823002036

17. 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

18. 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>

19. 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

20. Макаренко В. С., Кіреєв О. О., Чиркіна-Харламова М. А., Мінська Н. В., Шаршанов А. Я. Дослідження гасіння модельного вогнища пожежі класу «В» сипкими матеріалами. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2023. Вип. 2(38). С. 281–296. doi: 10.52363/2524-0226-2023-38-19

21. Трегубов Д. Г., Дадашов І. Ф., Мінська Н. В., Гапон Ю. К., Чиркіна-Харламова М. А. Фізико-хімічні основи розвітку та гасіння пожеж горючих

рідин. Харків: ФОП Панов А. М., 2024. 216 с. ISBN 978-617-8113-75-9. URL: <http://reposit.sc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/19111/3/%d0%a4%d0%a5%d0%9e%d0%9f%d0%a0%d0%bf%d1%80%d0%b5%d0%bf%d1%80%d1%96%d0%bd%d1%82.pdf>

22. Макаренко В. С., Кіреєв О. О., Чиркіна-Харламова М. А., Слепужніков Є. Д., Ковальов О. О. Вогнегасні характеристики легких сипких матеріалів для пожеж класу «В». ISSN 2524-0226. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2024. Вип. 1(39). С. 40–54. doi: 10.52363/2524-0226-2024-39-3

23. Азаров С. І., Сидоренко В. Л., Єременко С. А., Пруський А. В. Методичні засади пожежного аудиту вибухонебезпечних об'єктів. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2020. № 2(10). С. 3–14. doi: 10.33269/nvcz.2020.2.3-14

24. НАПБ 05.035-2004. Інструкція щодо гасіння пожеж в резервуарах із нафтою та нафтопродуктами. Київ: УНДІПБ, 2004. 79 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71121

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

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

Ye. Slepuzhnikov, PhD, Associate Professor, Head of the Department

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

O. Cherkashyn, PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

SELECTION OF THE MOST EFFECTIVE MEANS OF EXTINGUISHING FLAMMABLE LIQUIDS

The paper compares the effectiveness of existing and new means of extinguishing tanks with a fixed roof containing flammable liquids. Flammable liquids are considered as combustible liquids. It is substantiated that high fire extinguishing characteristics when extinguishing flammable substances can be provided by means in which the dominant mechanism of combustion termination is the isolation of the liquid surface from the combustion zone. Currently, worldwide regulatory documents require the use of air-mechanical foams as the main means of extinguishing liquids. But they have a number of disadvantages. One of them is the low resistance of the foam to the heat flow from the flame of the burning liquid. As an alternative to air-mechanical foams, it is proposed to consider the recently developed fast-curing foams, as well as foam-glass + gel, foam-glass + bulk material, and foam-glass + bulk material + water systems. To compare the properties of new fire extinguishing systems and air-mechanical foams, it is proposed to use a quantitative complex parameter of the effectiveness of fire extinguishing agents. This parameter takes into account the financial costs of: fire extinguishing agents, their storage, processing or disposal after the expiration of their storage period; equipment and its operation; involvement of additional equipment and personnel, compensation for losses from the extinguishing process; compensation for environmental damage from fire extinguishing agents. In general, the comprehensive efficiency parameter is calculated as the sum of the seven selected financial components. At the first stage, it is proposed to use a simplified scoring option for calculating the complex economic parameter of efficiency. To do this, the components of efficiency are determined by the method of expert assessments. The highest value of the complex efficiency parameter was shown by two fire extinguishing systems: foam glass + bulk material and foam glass + bulk material + water. For these systems, it is proposed to conduct appropriate experimental studies on model fires of large size.

Keywords: fire extinguishing efficiency, gel-forming flammable liquids, economic parameters, quick-setting foam system, bulk materials

References

1. Hylton, J. G., Stein, G. P. U.S. (2017). Fire Department Profile. National Fire Protection Association. Available at: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics/Fire-service/osfdprofile.pdf>

2. 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. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/29188adf-ed7b-49cf-9e76-b996ab64fd89/en-1568-1-2018>
3. 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. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/1b7c7790-8464-4bc4-9ec6-b98ac41ff5ed/en-1568-2-2018>
4. 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. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/6e79e77f-10b9-4be3-b589-23797d03ae3b/en-1568-3-2018>
5. EN 1568-4. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 4: Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-miscible liquids. European committee for standardization, 2018, 55. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/333cc3e6-35bc-4525-9e86-7c51a8be409f/en-1568-4-2018>
6. DSTU EN 2:2014 Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT). Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63091
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. 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
9. Musayev, M., Dadashov, I. (2021). Development of a single means for preventing the evaporation of toxic liquids and extinguishing class B fires. *Academy of the Ministry of Emergencies of the Republic of Azerbaijan*, 3–4, 117–124. Available at: <https://engineeringmechanics.az/uploads/2023/05/8-fhn-akademiya-musayev-meqale-03-11-2021.pdf>
10. Mahammad, E. Musayev, Ilgar F. Dadashov, Alexander A. Kireev, Rza Kh.Khudiyeu. (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
11. 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
12. Semko, A., Rusanova, O., Kazak, O., Beskrovnaya, M., Vinogradov, S., Gricina, I. (2015). The use of pulsed high-speed liquid jet for putting out gas blow-out. *The International Journal of Multiphysics*, 9(1), 9–20. doi: 10.1260/1750-9548.9.1.9/
13. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2018). Improving the installation for fire extinguishing with finely dispersed water Eastern Eu-

European Journal of Enterprise Technologies, 2, 10–92, 38–43. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127865/

14. 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. (2017). Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3, 5–87, 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2017.104039

15. 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

16. 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/matecconf/201823002036

17. 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

18. Dadashov, I., Kirieiev, O., Trehubov, D., Tarakhno, O. (2021). Hasinnia horiuchykh ridyn tverdymy porystymy materialamy ta helevtvoriiuchymy systemamy. Kharkiv, 240. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14033>

19. 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

20. Makarenko, V., Kirieiev, O., Chyrkina-Kharlamova, M., Minska, N., Sharshanov, A. (2023). Doslidzhennia hasinnia modelnoho vohnyshcha pozhezhi klasu «V» sypkymy materialamy. Problemy nadzvychainykh sytuatsii, 2(38), 281–296. doi: 10.52363/2524-0226-2023-38-19

21. Trehubov, D., Dadashov, I., Minska, N., Hapon, Yu., Chyrkina-Kharlamova, M. (2024). Fyzyko-khimichni osnovy rozvitku ta hasinnia pozhezh horiuchykh ridyn. Kharkiv: FOP Panov A. M., 216. ISBN 978-617-8113-75-9. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/19111/3/%d0%a4%d0%a5%d0%9e%d0%9f%d0%a0%d0%bf%d1%80%d0%b5%d0%bf%d1%80%d1%96%d0%bd%d1%82.pdf>

22. Makarenko, V., Kirieiev, O., Chyrkina-Kharlamova, M., Slepuzhnikov, Ye., Kovalov, O. (2024). Vohnehasni kharakterystyky lehkykh sypkymy materialiv dlia pozhezh klasu «V». ISSN 2524-0226. Problemy nadzvychainykh sytuatsii, 1(39), 40–54. doi: 10.52363/2524-0226-2024-39-3

23. Azarov, S., Sydorenko, V., Yeremenko, S., Pruskyi, A. (2020). Metodychni zasady pozhezhnogo audytu vybukhonebezpechnykh ob'iektiv. Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka, 2(10), 3–14. doi: 10.33269/nvcz.2020.2.3-14

24. NAPB 05.035-2004. Instruktsiia shchodo hasinnia pozhezh v rezervuarakh iz naftoiu ta naftoproduktamy. Kyiv: UNDIPB, 2004, 79. Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71121

Надійшла до редколегії: 08.10.2024

Прийнята до друку: 14.11.2024