

УДК 614.84

В. С. Макаренко, ад'юнкт (ORCID 0000-0001-5629-1159)

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

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. О. Ковальов, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4974-5201)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ВОГНЕГАСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕГКИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ «В»

Визначено масові витрати компонентів вогнегасної системи на основі легких сипких матеріалів. На основі раніш проведених досліджень в якості легкого сипкого матеріалу, що забезпечує плавучість всієї системи, було обрано подрібнене піноскло з розміром гранул 1–1,5 см. В якості сипкого матеріалу, що підвищує ізолюючі властивості вогнегасної системи, застосовано спучений перліт з розміром гранул 1,0–1,4 мм. Для подавання гранульованого спученого перліту розроблено та виготовлено пневможекційний прилад. Проведено дослідження з гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В» з додатковим подаванням на поверхню бінарного шару піноскло + перліт розпиленої води. Встановлено, що подавання води дозволяє зменшити витрати спученого перліту в два рази. Показано, що змочування шару перліту водою суттєво підвищує ізолюючі властивості такого шару і надає високу охолоджуючу здатність всієї вогнегасної системи на основі легких сипких матеріалів. На основі економічних розрахунків показано, що застосування води для змочування верхнього шару обумовлює можливість зменшити фінансові витрати потрібні на вогнегасні речовини. Встановлено, що фінансові витрати на вогнегасні речовини системи подрібнене піноскло + спучений перліт + розпилена вода з питомими поверхневими витратами компонентів $10,5 \text{ кг/м}^2$, $1,98 \text{ кг/м}^2$ і 2 кг/м^2 складають 184 грн/м^2 . За цим параметром ця вогнегасна система має суттєву перевагу по зрівнянню з системами піноскло+гель і повітряно механічними пінами. Проведено порівняння з результатами гасіння бензину на модельних вогнищах пожежі малих розмірів. На основі проведення екологічної оцінки запропонованої вогнегасної системи показано її переваги за цим параметром по зрівнянню з існуючими засобами гасіння легкозаймистих рідин. Розглянуто питання впровадження запропонованої вогнегасної системи в практику пожежогасіння резервуарів великих розмірів з легкозаймистими рідинами.

Ключові слова: легкозаймисті рідини, бензин, вогнегасні властивості, спучений перліт, піноскло, розпилена вода

1. Вступ

Світовий досвід вказує на суттєві труднощі при гасінні пожеж в резервуарах великих розмірів з легкозаймистими рідинами (ЛЗР) [1]. Гасіння таких резервуарів потребує залучення великих сил та засобів [2]. Крім того, гасіння таких пожеж вимагає витрату великого часу [3]. Нормативні документи різних країн світу пропонують в якості основного засобу гасіння ЛЗР використовувати різні види пін [4]. Однак вогнегасні піни мають ряд недоліків [5]. Одним з основних недоліків вогнегасних пін є їх самовільне руйнування та руйнування під дією теплового випромінювання полум'я. Останній вид руйнування особливо проявляється при гасінні резервуарів великих розмірів з ЛЗР [6].

Ще одним з недоліків багатьох видів пін є швидке їх руйнування в разі контакту з полярними рідинами. Це викликало потребу розробки пін спеціального призначення. Але такі піни малоефективні в разі їх використання для гасіння неполярних рідин. Це знижує універсальність пінних засобів пожежогасіння [7]. Також можна відмітити невисокі екологічні і економічні характеристики вогнегасних пін [8]. Таким чином можна констатувати актуальність потреби в розробці нових засобів гасіння пожеж за участю ЛЗР.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Розробка нових засобів гасіння горючих рідин ведеться в різних напрямках [9]. Більша частина таких досліджень ведеться в напрямку розробки засобів гасіння [10] в яких використовується в якості домінуючого механізму припинення горіння – ізоляція поверхні рідини від зони горіння [11]. Інша частина досліджень базується на використанні таких механізмів припинення горіння як розведення пари горючих рідин [12], охолодження рідини або зони горіння [13], інгібування окисно – відновних реакцій в зоні полум'я [14] та зриву полум'я [15]. Аналіз цих робіт дозволяє зробити висновок про більшу перспективність розробки нових засобів гасіння рідин в яких в якості домінуючого механізму припинення горіння реалізується ізолюючий механізм.

Ізолюючий механізм гасіння в повної мірі може реалізується в пінах швидкого тверднення (ПШТ) [16]. Так в роботі [17] експериментально встановлено високі ізолюючі властивості таких пін. Вони мають перевагу по зрівнянню зі повітряно-механічними і компресійними пінами завдяки набагато більшій стійкості та можливості використовувати їх як для ізоляції поверхонь полярних так і неполярних рідин. Однак в цих роботах ПШТ запропоновано використовувати не для гасіння рідин, а для локалізації розливів токсичних та горючих рідин. В роботі [18] зроблено висновок про можливість використовувати ПШТ для гасіння як полярних так неполярних рідин. Дані наведені в цій роботі дозволяють зробити висновок про набагато більшу термічну стійкість ПШТ по зрівнянню с повітряно-механічними пінами.

Однак у ПШТ мають недоліки. Для утворення таких пін є потреба у використанні екологічно небезпечних піноутворювачів та компонентів гелеутворюючих систем. Крім того процес одержання ПШТ більш складний ніж процес генерування повітряно-механічних пін. Він потребує попереднього змішування двох окремих багатокомпонентних рідин з наступним спінюванням розчину, що утворився. Причому додаткові складності викликає потреба в приготуванні розчинів з точно визначеними концентраціями.

Суттєво інший підхід було запропоновано в роботі [19]. В цій роботі вогнегасно-ізолюючий шар на поверхні рідини формується за участю легких сипких матеріалів. Нижній шар створюється шляхом подавання на поверхню рідини гранульованого або подрібненого піноскла (ПС). Цей шар забезпечує плавучість всієї вогнегасної системи. Другий шар гелю формується на поверхні першого шару шляхом роздільно – одночасного подавання компонентів гелеутворюючої системи. Цей шар забезпечує високі ізолюючі властивості всієї вогнегасної системи. Вогнегасна система ПС+гель показала високі вогнегасні властивості під час гасіння як полярних так і неполярних ЛЗР. Суттєвою позитивною особливістю такої вогнегасної системи є велика стійкість вогнегасно – ізолюючого гелевого шару, як за звичайних умов, так і в разі інтенсивного теплового впливу на неї.

В роботі [19] встановлено, що у випадку гасіння висококиплячих горючих рідин (ГР) достатньо використання ПС без шару гелю. Висока ефективність ПС або змоченого водою ПС під час гасіння ГР дозволяє зробити висновок, що на теперішній час ця вогнегасна система є найбільш прийнятною для гасіння висококиплячих рідин. В разі гасіння ЛЗР вогнегасна система ПС+гель є більш ефективною по зрівнянню з пінними засобами пожежогасіння. Але у цій системі є ряд недоліків. Одним з недоліків такої системи є складний процес формування гелевого шару. Він потребує використання двох окремих засобів подавання розчинів геле-

утворюючої системи. Причому концентрації компонентів в цих розчинах повинні бути точно визначеними. Крім того, під час подавання компонентів гелеутворюючої системи тільки мала частина гелю утворюється в порожнинах між гранулами ПС. Більша частина гелю утворюється на верхній поверхні зовнішнього шару ПС, що не приводе до збільшення ізолюючих властивостей вогнегасної системи. Це, в свою чергу, обумовлює збільшення маси шару гелю.

Для подолання останнього недоліку в роботі [20] запропоновано замість гелю на поверхню ПС подавати легкий сипкий матеріал – спучений гранульований перліт [21] з меншим розміром гранул ніж ПС [22]. В такому випадку більша частина гранул перліту потрапляє в порожнини між гранулами ПС [23], що приводе до збільшення ізолюючих властивостей [21]. Перевага перліту по зрівнянню з гелем також обумовлена суттєво меншою густиною перліту. Це приводе до зменшення маси верхнього ізолюючого шару і відповідно до меншої маси шару ПС, який забезпечує плавучість всієї вогнегасної системи.

В роботах [21] та [23] було експериментально визначено вогнегасні властивості системи ПС+перліт і ПС+перліт+вода на лабораторних модельних вогнищах пожежі класу «В» та стандартних модельних вогнищах пожежі «2В». В цих роботах були встановлені оптимальні масові витрати ПС, перліту і води на гасіння малих за розміром вогнищ пожеж з ЛЗР – бензином. Але для наближення інтенсивності горіння та умов гасіння до реальних пожеж потребує проведення відповідних досліджень для стандартних модельних вогнищ пожежі більших розмірів, ніж раніш було використано.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є відсутність даних щодо вогнегасних характеристик систем на основі сипких матеріалів з використанням стандартних модельних вогнищ пожежі класу «В» більших за розміром ніж вогнище «2В».

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є визначення вогнегасних характеристик систем піноскло + перліт і піноскло + перліт + вода для гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В».

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

1. Розробити методику визначення вогнегасних характеристик систем піноскло + перліт і піноскло + перліт + вода з використанням стандартного модельного вогнища пожежі «8В».

2. Сконструювати і виготовити пристрій для подавання гранульованого перліту.

3. Експериментально визначити вогнегасні властивості систем піноскло + перліт і піноскло + перліт + вода з використанням стандартного модельного вогнища пожежі «8В».

4. Провести порівняння за параметром ефект – вартість запропонованої вогнегасної системи з існуючими.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес гасіння легкозаймистих рідин з використанням легких сипких матеріалів.

Предметом дослідження є експериментальне визначення масових витрат матеріалів вогнегасних систем піноскло + перліт і піноскло + перліт + вода на гасіння стандартного вогнища пожежі «8В» з бензином.

Методи дослідження:

– стандартні експериментальні методи визначення вогнегасних характеристик засобів пожежогасіння, які модифіковані з урахуванням особливостей систем на основі сипких матеріалів;

– для визначення витрат вогнегасних речовин використовувались вагові і об'ємні методи;

– при визначенні гранулометричного складу сипких матеріалів застосовано ситовий аналіз;

– для оцінки фінансових витрат використані елементи економічного аналізу.

Відомо, що при гасінні ЛЗР пінами витрати останніх в разі великих за розміром вогнища помітно більші ніж на вогнищах малих розмірів. Це пояснюється тим, що час гасіння для великих за розміром вогнищ більший ніж в разі гасіння малих вогнищ. Це приводить до великого часу впливу теплового випромінювання на нанесений шар піни. Це в свою чергу викликає руйнування частини пінного шару. В разі використання в якості вогнегасних речовин сипких матеріалів не відбувається руйнування вогнегасного шару [23]. Це приводить до меншого впливу розміру модельного вогнища пожежі на питомі витрати вогнегасних речовин в порівнянні з гасінням пінами.

Але в разі гасіння більших за розміром модельних вогнищ потребує використання інших засобів подачі компонентів вогнегасних систем на основі сипких матеріалів. На відміну від засипання сипких матеріалів в малі за розміром ємності подавання за допомогою механізованих пристроїв не дозволяє забезпечити формування рівномірного по висоті шару сипких матеріалів. Ця проблема ускладнюється також завдяки неможливості візуального контролю за рівномірністю висоти шару сипкого матеріалу в рідині. Останній факт пояснюється повною непрозорістю факелу полум'я і неможливістю суттєвого наближення оператора гасіння до стандартного модельного вогнища пожежі «8В» [19]. Це приводить до можливості суттєвої різниці між питомими масовими витратами вогнегасних речовин під час гасіння стандартних модельних вогнищ «2В» і «8В».

Таким чином, гіпотезою дослідження є більші питомі масові витрати компонентів вогнегасних систем піноскло + перліт і піноскло + перліт + вода під час гасіння модельного вогнища «8В» в порівнянні з відповідними характеристиками отриманими для модельного вогнища «2В».

5. Розробка методики визначення вогнегасних характеристик сипких матеріалів

Методика дослідження базується на основі раніш отриманих результатів з гасіння модельних вогнищ пожежі класу «В» малих розмірів. Реальні пожежі можуть суттєво відрізнятися за інтенсивністю горіння від горіння ГР в деко модельного вогнища пожежі.

В першу чергу різниця в умовах горіння полягає в більшій площі поверхні рідини, що горить, в стандартному модельному вогнищі пожежі «8В» по зрівнянню з вогнищем «2В». Крім того, на інтенсивність горіння сильно впливає висота вільного борту ємності в якій знаходиться рідина. Найбільша інтенсивність горіння спостерігається за малих висот вільного борту. В стандартних модельних вогнищах пожежі класу «В» висота вільного борту обирається з міркувань мінімально потрібної для забезпечення такої висоти шару піни, щоб вона не виходила за межі верхнього борта дека.

Вважається, що основним параметром модельного вогнища пожежі класу «В», що визначає масову швидкість вигорання рідини є відношення площі поверхні рідини до периметру ємності з рідиною. Для деко циліндричної форми це відношення дорівнює $D/4$, де D – діаметр деко. В попередніх роботах, де використовувалися лабораторні модельні вогнища і стандартне модельне вогнище «2В» це відношення змінювалися в межах 2,8 до 7,2 см. В цих межах співвідношення масових швидкостей вигорання помітно змінюється. Починаючи зі значення $D/4=15$ зміна масової швидкості вигорання зі зростанням розміру модельного вогнища становиться не суттєвою. Таке відношення відповідає діаметру вогнища пожежі 60 см, або стандартному модельному вогнищу «8В». Таким чином в цій роботі для визначення вогнегасних властивостей системи на основі легких сипких матеріалів обирається стандартне модельне вогнище пожежі «8В». Саме таке вогнище було обрано в роботі [19]. Це дозволить коректно порівняти результати для обраної вогнегасної системи з відповідними даними для системи ПС + гель.

Основні параметри стандартного модельного вогнища пожежі «8В» наведено нижче:

- діаметр – 60 см,
- вільна площа поверхні рідини – $0,28 \text{ м}^2$,
- висоту борту 20 см,
- об'єм води 16 л,
- об'єм бензину АІ-92 – 8 л.

В якості сипких матеріалів, як і у попередніх роботах [20–23] обрано ПС і спучений гранульований перліт, характеристики яких наведено в табл. 1.

Табл. 1. Характеристики сипких матеріалів: насипна щільність (ρ) плавучість в бензині (Пл), розмір гранул (l) і частка сипкого матеріалу, що просипається крізь шар піноскла (прос)

Характеристика сипкого матеріалу	Сипкий матеріал	
	Подрібнене піноскло	Спучений перліт
ρ , кг/м ³	99	165
Пл	0,51	0,24
l , мм	10–15	$1,0 \pm 1,4$
прос, (%)	0	≤ 3

Для визначення гранулометричного складу сипких матеріалів застосовано ситовий аналіз.

5.1. Розробка пристрою для подавання гранульованого перліту

Подавання сипких вогнегасних речовин на поверхню рідини потребує розробки відповідних засобів. Для подавання гранульованого ПС було використано повітряний ежекційний апарат, який був запропоновано в роботі [19]. Попередні досліди показали, що цей апарат не забезпечує прийнятні умови подавання дрібного спученого перліту. В першу чергу це обумовлено на порядок меншими розмірами гранул перліту по зрівнянню з гранулами ПС. На основі аналізу ежекційних пристроїв, що знаходяться в продажі було обрано розпилювач в'язких композицій РТ-0402. Цей розпилювач було модифіковано шляхом збільшення діаметру вихідного отвору до 8 мм. Для забезпечення подавання стислого повітря використовувався компресор Güde 231/8/24.

В попередніх дослідах було обрано діаметр вихідного отвору розпилювача і

потрібний тиск повітря для розпилювання перліту. Відповідні характеристики апарату для подавання перліту склали з відстані 2 м:

- максимальна дальність подавання 5 м;
- розсіювання уздовж осі ствола – 0,4 м;
- розсіювання у боки – 0,3 м;
- витрати перліту 4,5 дм³/хв.

5.2. Розробка методики визначення вогнегасних характеристик

Для можливості проведення порівняльного аналізу умови проведення експерименту були наближені до таких, що використовувались в роботах [19, 22, 23]. Різниця складалась в розмірах дека і способі подавання перліту. При цьому кількість компонентів вогнегасної системи було збільшено відповідно до збільшення площі поверхні рідини. Крім того, в зв'язку з труднощами візуального контролю рівномірності нанесення шару ПС під час використання стандартного модельного вогнища пожежі «8В» було прийнято коефіцієнт запасу для кількості поданого ПС рівним 1,5 (+50 %). Розрахунки показали, що об'єм ПС повинен складати 30 л.

Після формування шару ПС на поверхні бензину здійснювалось подавання перліту до моменту, коли локальна висота полум'я не перевищувала 10 см. Далі проводилось подавання води до моменту припинення горіння. Після цього подавалась такий самий час додаткова кількість води. Тобто загальна кількість води, що подана була в два рази більше ніж кількість води витраченої на момент припинення горіння. Така технологія гасіння була обґрунтована в роботах [22, 23].

Таким чином послідовність дій була наступною. Деко стандартного модельного вогнища пожежі класу «8В» встановлювалось на горизонтальну поверхню. В нього заливалося 16 л води і 8 л бензину АІ-92. Далі бензин підпалювався. Після однієї хвилини вільного горіння візуально фіксувалась висота полум'я. Потім в деко за допомогою пневмо-ежекційного приладу рівномірно по поверхні подавалось 30 дм³ ПС. На далі за допомогою розробленого ежекційного апарату на поверхню ПС рівномірно подавався перліт до моменту коли висота полум'я не перевищувала 10 см. Маса витраченого перліту розраховувалась ваговим методом з урахуванням частини перліту що не потрапила в модельне вогнище.

В разі подавання води вона рівномірно розпилювалась на поверхню бінарного шару ПС + перліт за допомогою побутових розпилювачів ОЗ-2 до повного загасання полум'я. Час подавання води фіксувався. З урахуванням результатів робіт [22, 23] додатково подавалась вода ще такий самий час. Маса води визначалась ваговим методом. Після цього через 5 хвилин проводилось випробування на повторне займання під дією палаючого факелу.

В разі досліду з гасінням без участі води з урахуванням результатів робіт [21] та [23] кількість поданого перліту було обрано в два рази більшою ніж потрібно для гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В» з участю води. Через 5 хвилин після погасання полум'я проводився дослід з визначення можливості повторного займання.

5.3. Експериментальне визначення витрат вогнегасних речовин на гасіння

Експеримент проводився за вище наведеною методикою. На рис. 1а–1з представлені етапи гасіння модельного вогнища пожежі «8В» в варіанті з подаванням води. Експерименти було проведено за температури 12–13 °С та швидкості
Fire safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-39-3

ті вітру 1–2 м/с. Об'єми ПС і перліту відміряли за допомогою мірних стаканів. Маса води визначалась шляхом зважування оприскувача на початку і в кінці експерименту. Через 5 хвилин після гасіння вогнища пожежі проводився експеримент на визначення можливості повторного займання. У всіх випадках займання не відбувалось.

Відповідні чисельні результати експерименту представлено в табл. 2. Данні з висоти шарів вогнегасних речовин приведені для випадку коли вони рівномірно подаються на рівну горизонтальну поверхню.

Табл. 2. Питомі поверхневі витрати (Φ) і висоти шарів (H) компонентів вогнегасної системи потрібних для гасіння модельного вогнища пожежі «8В»

Вид системи	Піноскло		Перліт		Вода		Загальна маса
	Φ , кг/м ²	H, см	Φ , кг/м ²	H, см	Φ , кг/м ²	H, см	Φ , кг/м ²
8 «В»							
З участю води	10,5	10,5	1,98	1,2	2,0	0,2	14,48
Без участі води	10,5	10,5	3,63	2,2	-	-	14,13
2 «В»							
З участю води	6,7	7	1,6	1,0	2,0	0,2	10,3

Результати візуальних спостережень вказують, що через 1 хвилину після підпалювання бензину висота полум'я досягає 1,5–2 м. При цьому не можливо побачити поверхню бензину, що горить. Подавання ПС на поверхню бензину спочатку підвищує інтенсивність горіння. Після подавання 30 л ПС висота полум'я поступово зменшується до 30–35 см. Подальше подавання перліту зменшує висоту полум'я до 5–10 см. Причому горіння відбувається переважно вздовж борта дека. Подальше подавання води приведе до припинення горіння бензину. В разі поверхневої витрати води 2,0 кг/м² не відбувається повторне займання стандартного модельного вогнища пожежі в разі піднесення до поверхні змоченого перліту горящого факела.

В досліді без залучення води для гасіння бензину, горіння припиняться в разі нанесення на поверхню ПС шару перліту висотою 2,2 см. При цьому також не спостерігається повторного займання. Досліди з гасіння стандартних модельних вогнищ пожежі класу «8В» проводились по два рази, як у варіанті з застосуванням води, так і без її застосування.

6. Розрахунок фінансових витрат на вогнегасні речовини

Важливою характеристикою вогнегасного засобу є його економічні параметри. Розглянемо тільки одну складову економічного параметру вогнегасного засобу – вартість вогнегасних речовин. В роботі [23] було проведено короткий порівняльний економічний аналіз вогнегасних систем на основі легких сипких матеріалів і системи ПС+гель. Для розрахунків фінансових витрат було використані дані, які отримані з використанням стандартного модельного вогнища пожежі «2В». Нижче приведемо результати, що базуються на дослідженнях з гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В». Останні дані найбільш наближені до реальних умов гасіння великих за розміром резервуарів з ЛЗР. Під час розрахунків було використано такі самі цінові параметри речовин як у роботі [23]. Також, як у цій роботі витрати на воду не було враховано.



а)



б)



в)



г)



д)



е)



ж)

Рис. 1. Етапи гасіння модельного вогнища пожежі «8В»: а – основне обладнання, яке використовувалось для гасіння; б – горіння через 1 хвилину після запалювання бензину; в – зменшення висоти полум'я під час подавання ПС; г – подавання перліту; д – горіння після нанесення перліту з товщиною шару 1 см; е – припинення горіння після подавання води; ж – дослід на повторне займання

Вихідні данні для розрахунку. Вартість 1 кг матеріалу: гранульований спучений перліт – $C_{\text{перл}}=20,7$ грн/кг; ПС (скляна пінокрихта) – $C_{\text{пс}}=13,7$ грн/кг. Питомі витрати ПС $\Phi_{\text{пс}}=10,5$ кг/м², перліту в разі додаткового використання води $\Phi_{\text{перл}}=1,98$ кг/м², перліту за умови відсутності використання води $\Phi_{\text{перл}}=3,63$ кг/м².

Фінансові витрати вогнегасного засобу в розрахунку на 1 м² поверхні гасіння, (С), розраховувалось за співвідношенням:

$$C = C_{\text{пс}} \cdot \Phi_{\text{пс}} + C_{\text{перл}} \cdot \Phi_{\text{перл}} \quad (1)$$

В табл. 3 представлені результати проведених фінансових розрахунків разом з відповідними результатами для повітряно-механічної піни (ПУ – софір) і системи ПС + гель.

Табл. 3. Фінансові витрати на гасіння 1 м² площі горіння бензину для різних вогнегасних систем

Система	ПС +перліт+вода	ПС +перліт	ПС +гель	ПВМ (Софір)
Фінансові витрати, грн/м ²	184	219	250	~1000
Відношення фінансових витрат	1	1,2	1,4	5,4

7. Обговорення результатів дослідження гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В»

Візуальне спостереження гасіння модельного вогнища пожежі «8В» вказує на те, що пневматичне подавання перліту забезпечує заповнення порожнин між гранулами ПС. Тільки невелика частина гранул перліту утримується на верхній поверхні гранул ПС. Це суттєво відрізняється від випадку гасіння з використанням гелеутворюючих систем [19]. В останньому випадку більша частина гелю утворюються на верхній поверхні гранул ПС. Це в свою чергу не збільшує ізолюючих властивостей системи ПС+гель, а приводе до збільшення масових витрат компонентів вогнегасної системи. Порівняння чисельних результатів, що наведено в роботі [19] і одержаних для систем ПС+перліт і ПС+перліт+вода вказує на суттєву перевагу в масових витратах компонентів вогнегасних систем ПС+перліт+вода і ПС+перліт по зрівнянню з системою ПС+гель (табл. 3).

Результати проведених досліджень з гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В» також підтверджують висновки наведені в роботі [23], що змочування шару перліту водою забезпечує покращення ізолюючих властивостей сухого перліту. Крім цього, вода збільшує охолоджуючий ефект шару перліту. Одночасно можна відмітити, що для гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В» потребуються більші питомі поверхневі витрати перліту та ПС по зрівнянню з гасінням меншого за розміром вогнища пожежі «2В». Це обумовлено помітно більшою інтенсивністю горіння в більшому за розміром вогнищі пожежі «8В». Останнє приводе до більшого нагріву поверхневого шару бензину і стінок дека. Це підтверджує факт більш інтенсивного горіння поблизу стінок дека після нанесення шару перліту висотою 1 см (рис. 1, д) і швидкого загасання полум'я після подавання води в цю область (рис. 1, е).

Ще однією особливістю гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В» по зрівнянню з гасінням менших за розміром вогнищ є складність забезпечити рівномірний за висотою шар ПС на поверхні бензину. Це обумовлено неможли-

вістю візуального контролю за рівномірністю висоти шару ПС, завдяки непрозорістю факелу полум'я. Тільки після подавання ПС з поверхневою витратою 8–9 кг/м² виявляються ділянки ПС з меншою висотою шару. В подальшому ПС подається на саме на ці ділянки. Але завдяки розсіюванню гранул ПС при подаванні за допомогою повітряного ежекційного апарату частина ПС потрапляє на ділянки з вже досягнутою вогнегасною висотою шару ПС. Це в свою чергу приведе до збільшення витрат ПС по зрівнянню з вогнищами пожежі менших розмірів.

Порівняння витрат вогнегасних речовин двох систем ПС+перліт+вода та ПС+перліт вказує на майже однакову масову витрату компонентів двох систем, що досліджено (табл. 2). Але перша система має перевагу у плані фінансових витрат (табл. 3). Одночасно можна відмітити, що вогнегасна система ПС+перліт має перевагу в тому, що в ній достатньо використовувати два засоби подавання компонентів, а система ПС+перліт+вода вимагає додаткового застосування засобу подавання розпиленої води. Порівняння отриманих результатів з відповідними даними для модельного вогнища пожежі «2В» (табл. 2) вказує на більші питомі масові витрати компонентів вогнегасної системи піноскло + перліт + вода під час гасіння модельного вогнища «8В» по зрівнянню з відповідними характеристиками отриманими для модельного вогнища «2В» на 40 %.

Порівняння економічних параметрів чотирьох, розглянутих вогнегасних засобів гасіння пожеж класу «В» дозволяє констатувати, що всі три вогнегасні системи на основі ПС мають перевагу по зрівнянню з ПВМ в 4–5,4 рази. Це обумовлено в основному двома факторами – високою вартістю піноутворювачів і низькою стійкістю пін. Руйнування пін потребує додаткового подавання піни замість тієї піни, що зруйнувалась. Вогнегасні системи ПС+перліт+вода та ПС+перліт також мають додаткову перевагу в економічному плані по зрівнянню з іншими в можливості повторного використання сипких матеріалів після простої процедури їх відновлення. Одночасно з цим, їх використання під час гасіння не приведе до забруднення цих рідин. Ще однією перевагою систем ПС+перліт+вода та ПС+перліт є прості умови та необмежений час їх зберігання.

Крім того, вогнегасні системи ПС+перліт+вода та ПС+перліт мають найбільш високі екологічні параметри. Вони не містять в своєму складі летучих, водорозчинених та поверхнево-активних речовин. ПС та перліт є інертними, термічно стійкими, малотоксичними речовинами (4 клас небезпеки).

Наступним етапом досліджень, що потрібно провести для впровадження запропонованої вогнегасної системи в практику є практичне гасіння повномасштабних реальних пожеж резервуарів з ЛЗР. Це, в свою чергу, потребує розробки відповідних засобів подавання вогнегасних речовин, які забезпечать високі витрати вогнегасних речовин. Для подальшого підвищення вогнегасних властивостей систем на основі легких сипких матеріалів доцільно провести окремі дослідження нових видів легких сипких матеріалів, які будуть спеціально призначені для цілей пожежогасіння рідин.

8. Висновки

1. Розроблено методику визначення вогнегасних властивостей систем піноскло+перліт і піноскло+перліт +вода з використанням стандартного модельного вогнища пожежі «8В», яка полягає в подаванні за допомогою пневмоежекційного приладу подрібненого піноскла об'ємом 30 дм³, з наступним подавання перліту за допомогою розробленого ежекційного апарату до моменту коли висота полум'я

знизиться до 10 см. Після чого за допомогою розпилювача на поверхню розпиляється вода до повного припинення горіння.

2. Шляхом модифікації промислового розпилювача в'язких консистенцій сконструювано та виготовлено пристрій для подавання гранульованого перліту на гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В», який дозволяє подавати перліт на відстань до 5 м.

3. Експериментально визначено вогнегасні властивості систем піноскло + перліт і піноскло+перліт+вода з використанням стандартного модельного вогнища пожежі «8В». В разі додаткового використання води з питомою витратою 2 кг/м² вогнегасні витрати піноскла становить 10,5 кг/м² з додатковим нанесенням перліту з питомою витратою 1,98 кг/м². Під час гасіння без участі води витрати піноскла і перліту становлять 10,5 кг/м² і 3,63 кг/м² відповідно.

4. Порівняння отриманих результатів з відповідними даними для модельного вогнища пожежі «2В» вказує на більші питомі масові витрати компонентів вогнегасної системи піноскло+перліт+вода під час гасіння модельного вогнища «8В» по зрівнянню з відповідними характеристиками отриманими для модельного вогнища «2В» на 40 %. Фінансові витрати на вогнегасні речовини для систем піноскло+перліт+вода, піноскло+перліт, піноскло+гель і повітряно-механічну піну становлять 184 грн/м², 219 грн/м², 250 грн/м² і 1000 грн/м² відповідно.

Література

1. Campbell R. Fires at Outside Storage Tanks. National fire protection association. 2014. URL: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Building-and-life-safety/osflammableor Combustible Liquidtank Storage Facilities.ashx>

2. 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>

3. Lang X.-q., Liu Q.-z., Gong H. Study of Fire Fighting System to Extinguish Full Surface Fire of Large Scale Floating Roof Tanks. Procedia Engineering. 2011. Vol. 11. P. 189–195. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811008344>

4. EN 1568-1:2018. Fireextinguishing media. Foam concentrates. Part 1: Specification for medium expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids

5. EN 1568-2:2018. Fireextinguishing media. Foam concentrates. Part 2: Specification for high expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids

6. EN 1568-3:2018. Foam concentrates. Part 3: Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids /European standard

7. Olkowska E., Polkowska Z., Namieśnik J. Analytic sofsur factantsin the environment: problems and challenges. Chem. Rev. 2011. Vol. 111. № 9. P. 5667–5700. doi: 10.1021/cr100107g

8. 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

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. Vol. 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 use of pulsed high-speed liquid jet for putting out gas blowout. *The International Journal of Multiphysics*. 2015. Vol. 9. № 1. P. 9–20. doi: 10.1260/1750-9548.9.1.9

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., Kovaliov P., Bezuglov O. Mathematical modeling of fireproof efficiency of coatings based on silicate composition. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006. MSF. P. 70–75. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1006.70

14. Vasilchenko A., Otrosh, Yu., Adamenko N., Doronin E., Kovalov A. Feature of fire resistance calculation of steel structures with intumescent coating. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 230. № 02036. doi: 10.1051/matecconf/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. 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

17. Kireev A., Kirichenko I., Petukhov R., Sharshanov A., Tarkho T. 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

18. Мусаев М. Е., Дадашов И. Ф. Разработка единого средства для предотвращения испарения токсичных жидкостей и тушения пожаров класса «В». Академия МЧС Азербайджанской Республики. 2021. Вып. 3–4. С. 117–124. URL: <https://engineeringmechanics.az/uploads/2023/05/8-fhn-akademiya-musayev-meqale-03-11-2021.pdf>

19. 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.

20. 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

21. Макаренко В. С., Кіреєв О. О., Слепужніков Є.Д., Чиркіна М. А. Дослідження впливу порошків на вогнегасні характеристики бінарних шарів пористих матеріалів. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. Вип. 1(35). С. 297–310. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-22

22. Makarenko V., Kireev A., Slepuzhnikov Y., Hovalenkov S. Properties of mul-
Fire safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-39-3

ti-component fire extinguishing systems based on light bulk materials. *Key Engineering Materials*. 2023. Vol. 954. P. 177–184. doi: 10.4028/p-6v6dmx

23. 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

V. Makarenko, Adjunct

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

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

Y. Slepuzhnikov, PhD, Associate Professor, Head of Department

O. Kovalov, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

FIRE-EXTINGUISHING CHARACTERISTICS OF LIGHT BULK MATERIALS FOR CLASS "B" FIRES

On the basis of earlier studies, crushed foam glass with a granule size of 1–1,5 cm was chosen as a light loose material that ensures the buoyancy of the entire system. As a loose material that increases the insulating properties of the fire extinguishing system, expanded perlite with a granule size of 1 was used 1–1,4 mm. A pneumatic ejection device was developed and manufactured for feeding granular expanded perlite. A study was also conducted on extinguishing a standard model fire «8B» with additional application of sprayed water to the surface of the binary layer of foam glass + perlite. It has been established that supplying water allows to reduce the consumption of swollen perlite by two times. It is shown that wetting a layer of perlite with water significantly increases the insulating properties of such a layer and provides a high cooling capacity of the entire fire extinguishing system based on light loose materials. On the basis of economic calculations, it is shown that the use of water for wetting the upper layer makes it possible to reduce the financial costs required for fire-extinguishing substances. It was established that the financial costs of fire-extinguishing substances of the system crushed foam glass + expanded perlite + sprayed water with specific surface consumption of the components 10,5 kg/m², 1,98 kg/m² and 2 kg/m² amount to 184 UAH/m². According to this parameter, this fire extinguishing system has a significant advantage compared to foam glass + gel systems and air-mechanical foams. A comparison was made with the results of extinguishing gasoline on model fires of small sizes. On the basis of the environmental assessment of the proposed fire extinguishing system, its advantages in terms of this parameter are shown in comparison with existing means of extinguishing flammable liquids. The issue of introducing the proposed fire extinguishing system into the practice of fire extinguishing of large tanks with flammable liquids was considered.

Keywords: flammable liquids, gasoline, fire extinguishing properties, expanded perlite, foam glass, sprayed water

References

1. Campbell, R. (2014). Fires at Outside Storage Tanks. National fire protection association. Available at: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Building-and-life-safety/osflammableorCombustibleLiquidtankStorageFacilities.ashx>

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

3. Lang, X.-q., Liu, Q.-z., Gong, H. (2011). Study of Fire Fighting System to Extinguish Full Surface Fire of Large Scale Floating Roof Tanks. *Procedia Engineering*, 11, 189–195. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811008344>

4. Code, P. (2018). Fire extinguishing media. Foam concentrates – Part 1:

Specification for medium expansion foam concentrates for urface application to water-immiscible liquids. European committee for standardization.

5. Code, P. (2018). Fire extinguishing media. Foam concentrates – Part 2: Specification for high expansion foam concentrates for urface application to water-immiscible liquids. European committee for standardization.

6. Code, P. (2018). Fire extinguishing media. Foam concentrates – Part 3: Specification for low expansion foam concentrates for urface application to water-immiscible liquids. European committee for standardization.

7. Olkowska, E., Polkowska, Z., Namieśnik, J. (2011). Analytic sofsur factants in the environment: problems and challenges. *Chem. Rev*, 111(9), 5667–5700. doi: 10.1021/cr100107g

8. 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

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., 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

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. 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

17. Kireev, A., Kirichenko, I., Petukhov, R., Sharshanov, A., Tarkho, T. (2021). Modeling the insulation properties of multicomponent solid foam-like material based on gel-forming systems. *Functional materials*, 3(28), 549–555. doi: 10.15407/fm28.03.549

18. Musayev, M. Ye., Dadashov, I. F. (2021). Razrabotka yedinogo sredstva dlya

predotvrashcheniya isparennya toksichnykh zhidkostey i tusheniya pozharov klassa «B». Academy of the Ministry of Emergency Situations of the Azerbaijan Republic. Academy of the Ministry of Emergency Situations of the Azerbaijan Republic, (3–4), 117–124. Available at: <https://engineeringmechanics.az/uploads/2023/05/8-fhn-akademiya-musayev-meqale-03-11-2021.pdf>

19. Dadashov, I. F., Kiryeyev, O. O., Trehubov, D. H., Tarakhno, O. V. (2021). Hasinnya horyuchykh ridyn tverdymy porystymy materialamy ta heleutvoryuyuchymy systemamy. Kharkiv. NUCPU, 240 p.

20. Makarenko, V. S., Kiryeyev, O. O., Tregubov, D. G., Chyrkina, M. A. (2021). Doslidzhennya vohnehasnykh vlastyvostry binarnykh shariv lehkykh porystykh materialiv. Problemy nadzvychnykh sytuatsiy, 1(33), 235–245. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-18

21. Makarenko, V., Kireev, O., Slepuzhnikov, E., Chyrkina, M. (2022). Doslidzhennya vplyvu poroshkiv na vohnehasni kharakterystyky binarnykh sharivporystykh materialiv. Problems of Emergency Situations, 1(35), 297–310. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-22

22. 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

23. Makarenko, V., Kireev, A., Chyrkina-Kharlamova, M., Minska, N., Sharshanov, A. Doslidzhennya hasinnya model'noho vohnyshcha pozhezhi klasu «B» sypkymy materialamy. Problems of Emergency Situations, 2(38), 281–296. doi: 10.52363/2524-0226-2023-38-19

Надійшла до редколегії: 08.03.2024

Прийнята до друку: 13.04.2024