

## УДК 614.84

*І. Б. Бабашов<sup>1</sup>, проректор (ORCID 0000-0002-3294-1767)*

*І. Ф. Дадашов<sup>1</sup>, д.т.н., нач. фак. (ORCID 0000-0002-1533-1094)*

*О. О. Кіреєв<sup>2</sup>, д.т.н., професор (ORCID 0000-0002-8819-3999)*

*О. В. Савченко<sup>2</sup>, к.т.н., с.н.с., заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-1305-7415)*

*М. Є. Мусаєв<sup>3</sup>, аспірант (ORCID 0000-0002-8553-2617)*

<sup>1</sup> *Академія Міністерства з надзвичайних ситуацій Азербайджанської Республіки, Баку, Азербайджан*

<sup>2</sup> *Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

<sup>3</sup> *Азербайджанський університет архітектури та будівництва, Баку, Азербайджан*

## РЕЗУЛЬТАТИ ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕГАСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕГКИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ГАСІННІ ЕТАНОЛУ

Продовжено експериментальні дослідження раніше запропонованого методу гасіння полярних рідин за допомогою вогнегасних засобів на основі легких сипких пористих матеріалів. Розроблено експериментальну методику визначення вогнегасних властивостей системи на основі легких сипких матеріалів на основі лабораторного модельного вогнища пожежі класу «В». На її основі визначені товщини шарів легких сипких матеріалів, які призводять до гасіння етанолу та його масові швидкості вигорання за різної товщини шару. Отримані результати для сухих і змочених матеріалів. В якості шару, що забезпечує плавучість вогнегасної системи використано подрібнене піноскло з розміром гранул 1–1,5 см. Встановлено, що для забезпечення підвищених ізолюючих властивостей, в якості верхнього шару, доцільно використовувати спучений перліт з розміром гранул  $1,2 \pm 0,2$  мм і спучений пластинчастий вермикуліт з розміром пластинок  $2 \times 2,5$  мм і  $2 \times 5$  мм. Встановлено, що змочування верхнього шару сипких матеріалів, шляхом подавання розпиленої води, призведе до підвищення їх вогнегасних властивостей. Показано, що вода забезпечує зниження концентрації парів етанолу над шаром сипких матеріалів за рахунок їх адсорбції. Для підвищення ізолюючих та інгібуючих властивостей було використано подавання на поверхню подрібненого піноскла легкоплавкого кристалогідрату  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . Ця вогнегасна система забезпечила найменші масові витрати на гасіння етанолу  $6,99$  кг/м<sup>2</sup>. Проведено оцінку фінансових витрат на вогнегасні речовини для запропонованих систем. Зроблено висновок про суттєву економічну перевагу системи з подрібненим піносклом на поверхню якого розпилено воду. Фінансові витрати при застосуванні даної системи становлять  $100$  грн./м<sup>2</sup>. Відмічено, що така система має суттєву перевагу в простоті технічної реалізації завдяки необхідності подачі тільки одного сипкого матеріалу.

**Ключові слова:** етанол, сипкі матеріали, піноскло, спучений перліт, спучений вермикуліт, вогнегасні властивості

### 1. Вступ

Гасіння горючих рідин є однією з найбільш складних операцій пожежогасіння. Особливо великі труднощі викликає гасіння полярних легкозаймистих рідин (ПЛЗР). Більшість ПЛЗР добре розчиняються у воді, що призведе до руйнування повітряно-механічних пін одержаних з піноутворювачів загального призначення. А саме такі піни рекомендуються як основний засіб гасіння рідин [1–4]. Для гасіння ПЛЗР розроблені піноутворювачі спеціального призначення з маркуванням «AR» («alcohol resistant») або «ATC» («alcohol type concentrate»). Піни на їх основі під час контакту з ПЛЗР утворюють на поверхні рідини, що горить ізолюючі полімерні плівки. Такі плівки ускладнюють випаровування рідини, що призведе до її гасіння. Недоліком даних плівок є велика густина, що призведе до їх поступового занурення в ПЛЗР.

Саме низька стійкість повітряно-механічних пін на основі спиртостійких піноутворювачів обумовлює їх низькі вогнегасні властивості. Крім того, спиртостійкі піноутворювачі мають у своєму складі екологічно небезпечні речовини [5–7].

Таким чином, можна зробити висновок про наявність суттєвих недоліків у існуючих засобах пожежогасіння ПЛЗР. Актуальною проблемою є розробка ефективних засобів гасіння полярних легкозаймистих рідин.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для підвищення вогнегасних властивостей існуючих засобів пожежогасіння запропоновано багато підходів. В роботі [8] розглядається можливість використання ударних хвиль, але залишилися не вирішеними питання, пов'язані з використанням такого підходу на практиці. Технології високошвидкісних імпульсних струменів та дрібнодисперсної води, що розглянуто в роботах [9, 10], дозволяють забезпечити мобільність пожежно-рятувального підрозділу за рахунок необхідності невеликої кількості вогнегасної речовини та організувати гасіння на початковій стадії пожежі. Але ефективно використовувати дані методи для гасіння розвинутої пожежі заважає наявний тепловий потік, внаслідок чого безпечна відстань може бути кратно більшою ніж дальність подачі вогнегасної речовини. Методи підвищення пористості твердих матеріалів, що розглядаються в роботі [11], дозволяють значно збільшити їх теплоізолюючі властивості, але питання інгібування та синергетичного ефекту не розглядається, також не відомо яким технічним пристроєм можна забезпечити запропоновані параметри на практиці.

В роботах [12–14] розглянуто використання піротехнічних композицій, силікатних та спучуваючихся складів. Але дані технології найбільш ефективні для вогнезахисту конструкцій та втрачають значну частину переваг при спробі використати їх для гасіння або локалізації пожежі, що пояснюється складною рецептурою, застосуванням спеціального обладнання, та часом який необхідний для підготовки відповідної композиції.

У разі гасіння горючих рідин на великій площі однією з важливіших вимог до ефективного вогнегасного засобу є їх висока стійкість. Виходячи з цього було запропоновано використовувати вогнегасні засоби на основі легких сипких матеріалів [15]. Завдяки високій термічній стійкості компонентів вогнегасної системи на основі сипких матеріалів вона забезпечує формування на поверхні етанолу вогнегасного шару з необмеженим часом існування. В якості такого матеріалу було запропоновано використання подрібненого піноскла (ППС). Цей матеріал не тоне у всіх відомих рідинах. Крім того він має високу хімічну і термічну стійкість. Але за ізолюючими властивостями ППС суттєво поступається повітряно-механічним пінам.

Для підвищення ізолюючих властивостей шарів ППС було запропоновано два підходи. У першому на поверхні ППС формувався шар гелю шляхом подавання компонентів гелеутворюючої системи [15]. У разі нанесення шару гелю з поверхневою питомою витратою  $7 \text{ кг/м}^2$  він заповнював порожнини верхнього шару ППС, що забезпечувало гасіння всіх легкозаймистих рідин. Незважаючи на переваги такого засобу гасіння у порівнянні з повітряно-механічними пінами він має ряд недоліків. Найбільш суттєвими з них є потреба в здійсненні роздільної подачі трьох окремих вогнегасних речовин трьома різними засобами.

У другому підході на поверхню ППС подається інший легкий сипкий матеріал з більшими ніж у ППС ізолюючими властивостями. У такому випадку є змога подавати послідовно сипкі матеріали одним засобом. У якості таких матеріалів було обрано спучені перліт та вермикуліт [16]. Ці матеріали навіть при частковому заповненні порожнин між гранулами підвищують ізолюючі властивості шарів ППС. В результаті проведених досліджень було встановлено, що подавання змо-

чених сипких матеріалів додатково підвищує ізолюючі властивості. Одночасно, такий підхід має свій недолік – змочені перліт і вермікулит частково злипаються та потрапляють на поверхню ППС у вигляді грудочок. Наслідком цього є нерівномірний розподіл сипкого матеріалу по поверхні нижнього шару ППС.

Підвищення ізолюючих властивостей системи із сипких матеріалів при додаванні води для полярних рідин пояснюється високою абсорбцією їх парів водою. Абсорбція пари горючої рідини під час проходження крізь шар змоченого сипкого матеріалу призведе до зменшення її концентрації у приповерхневому шарі. Це в свою чергу може призвести до припинення горіння рідини. Отже використання води як компонента вогнегасної системи із сипких матеріалів є перспективним напрямком удосконалення засобів пожежогасіння горючих рідин.

Одним з механізмів припинення горіння рідин є інгібування окисно-відновних реакцій які відбуваються під час горіння. У попередніх дослідженнях не було розглянуто вплив інгібіторів горіння на гасіння ПЛЗР.

На основі вище розглянутого, можна зробити висновок про доцільність розробки ефективного вогнегасного засобу для гасіння ПЛЗР на основі легких сипких матеріалів, які містять в своєму складі воду та інгібітори горіння. Невирішеною частиною проблеми розробки такого засобу є відсутність кількісних даних з вогнегасних властивостей таких систему разі гасіння ПЛЗР.

### 3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є встановлення кількісних характеристик вогнегасної здатності систем на основі легких сипких матеріалів, які містять в своєму складі воду та інгібітори горіння, а також вибір найбільш ефективної із них за економічними показниками.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробити експериментальну методику визначення вогнегасних властивостей системи на основі легких сипких матеріалів, які містять в своєму складі воду та інгібітори горіння.

2. Експериментально визначити масові швидкості вигорання, витрати легкого сипкого матеріалу, маси води та інгібітору горіння, які забезпечують гасіння етанолу.

3. Обрати системи на основі легких сипких матеріалів, які найбільш ефективні для гасіння легкозаймистих полярних рідин за економічними показниками.

### 4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження даної роботи є процес гасіння ЛЗПР за допомогою легких сипких матеріалів. Предмет дослідження – визначення параметрів вогнегасного засобу на основі легких сипких матеріалів з додатковим внесенням інгібітору горіння і води на гасіння етанолу. Робочою гіпотезою дослідження є виявлення позитивного вкладу інгібітору горіння і води в вогнегасні властивості системи на основі легких сипких матеріалів в разі гасіння етанолу. В роботі використані експериментальні методики визначення масової швидкості вигорання горючих рідин.

При виборі сипких матеріалів для вогнегасної системи призначеної для гасіння ПЛЗР було прийнято до уваги результати роботи [17]. В якості легкого сипкого матеріалу, який забезпечує плавучість, обрано ППС з розміром гранул (10–15) мм. Для верхнього шару сипкого матеріалу обрано спучений перліт з розміром гранул

1–1,5 мм та два різновиди спученого пластинчатого вермікуліту з розміром  $1 \times 2$  мм і  $2 \times 5$  мм. Також запропоновано використання інгібіторів процесу горіння. Було обрано мінеральні добрива у гранульованому вигляді, які виробляються промисловістю у великих кількостях. Крім того в якості інгібітору було досліджено вогнегасні властивості гідрокарбонату натрію ( $\text{NaHCO}_3$ ) у вигляді гранул неправильної форми розміром 5–10 мм і дрібнодисперсного кристалогідрату  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ .

При виборі ПЛЗР було прийнято до уваги наступне. До полярних рідин відносяться ряд одноатомних спиртів (метанол, етанол, пропанол, бутанол); кетони (ацетон, метилетилкетон), початкові члени гомологічних рядів альдегідів, простих та складних ефірів, а також ряд карбонових кислот, амінів та нітросполук. З цих рідин найбільші складності викликає гасіння легкозаймистих рідин. Гасіння високіплячих рідин відбувається легко за допомогою сухого ППС [15]. З легкозаймистих рідин найбільш поширеною є етанол (етиловий спирт). Великі кількості етанолу використовуються у хімічній промисловості. Він застосовується як розчинник, а також у виробництві товарів побутової хімії, у медицині та харчовій промисловості. Багато етанолу використовують у виробництві алкогольних напоїв. Етанол та його суміші використовуються як паливо, та як компонент палива (бензаетанол). В даній роботі використовувався спирт-ректифікат, що містить 4,4 % води.

Визначення вогнегасних характеристик різних засобів пожежогасіння потребує фіксації умов гасіння. У випадку гасіння горючих і легкозаймистих рідин використовують модельні вогнища пожежі класу «В». Такі вогнища призначено для моделювання пожеж та умов їх гасіння. У випадку коли розмір, конфігурація і матеріал вогнища визначені стандартами такі осередки пожежі називають «стандартним модельним вогнищем пожежі». Для гасіння пожеж класу «В» існує стандартне модельне вогнище яке розроблено для випадку гасіння таких пожеж пінними засобами. Пряме використання такого вогнища пожежі для гасіння іншими засобами у багатьох випадках непридатне. Тому розробка методики дослідження вогнегасних характеристик засобів на основі легких сипких матеріалів є однією з задач дослідження.

## **5. Результати дослідження вогнегасних характеристик систем на основі сипких матеріалів**

### **5.1. Розробка експериментальної методики дослідження вогнегасних характеристик систем із сипких матеріалів**

З економічних міркувань на початковому етапі дослідження вогнегасних характеристик засобів на основі легких сипких матеріалів доцільно використовувати вогнища малих розмірів. В даній роботі таке вогнище будемо називати «лабораторним модельним вогнищем пожежі». За основу було взято методику та вогнище пожежі класу «В», що було запропоновано в роботі [18]. Для наближення умов горіння і гасіння до реальних пожеж було внесено такі зміни:

- об'єм легкозаймистої рідини збільшено до 150 мл,
- час вільного горіння обрано рівним 2 хвилини,
- час на дослідження можливості повторного займання збільшено до 5 хвилин.

Збільшення об'єму горючої рідини зі 100 до 150 мл обумовлене потребою збереження рівня етанолу у металічній ємності рівною  $\sim 2$  см на момент гасіння лабораторного модельного вогнища. З тих же міркувань час вільного горіння обрано рівним 2 хвилини.

Збільшено часу на дослідження можливості повторного займання до 5 хвилин пов'язано з тим, що пари полярних рідин поглинаються водою і з часом концентрація ПЛЗР у приповерхневому шарі може збільшуватися.

В досліджах з сухими сипкими матеріалами в якості кількісної характеристики інтенсивності горіння використовувалась масова швидкість вигорання етанолу ( $V_m$ ):

$$V_m = \frac{\Delta m}{\tau \cdot S}, \text{ г/(м}^2\text{с)}, \quad (1)$$

де  $\Delta m$  – зміна маси рідини, г;  $\tau$  – час горіння або випаровування рідини, с;  $S$  – площа поверхні рідини, м<sup>2</sup>.

Зміна маси під час горіння визначалась гравіметричним методом як у роботі [15] визначалась швидкість випарування.

У випадку використання води як компонента вогнегасної системи для оцінки інтенсивності горіння була використана шкала запропонована в роботі [15] (табл. 1).

**Табл. 1. Якісна шкала характеру горіння рідин**

Бали	Характеристика горіння	Висота полум'я
5	Дуже сильне горіння	Близька до висоти полум'я без шару легкого матеріалу
4	Сильне горіння	Близька до 1/2 висоти полум'я без шару легкого матеріалу
3	Помірне горіння	Близька до 1/10 висоти полум'я без шару легкого матеріалу
2	Слабке горіння	Менше 1/10 висоти полум'я без шару легкого матеріалу
1	Дуже слабке горіння	Менше 1/10 висоти полум'я без шару легкого матеріалу, полум'я охоплює менш 1/2 поверхні
0	Загасання полум'я	Нема полум'я, відсутнє повторне займання

В роботах [10, 15] було встановлено, що змочування сипких матеріалів водою або водними розчинами суттєво підвищує їх вогнегасні властивості. Але в попередніх досліджах було встановлено що гранули сипких матеріалів крім ППС злипаються і утворюють грудки. Це ускладнює їх подавання у вогнище пожежі та не дає можливості сформувати рівномірний суцільний шар на поверхні ППС. Для виключення цього недоліку, за методикою першим здійснювалась подача сухого сипкого матеріалу з наступним змочуванням його, шляхом подавання розпиленої води.

## 5.2. Експериментальне визначення вогнегасних характеристик систем на основі легких сипких матеріалів

Проведення досліджень відбувалось наступним чином. Спочатку у тонкостінну металеву циліндричну ємність з внутрішнім діаметром 11,2 см ( $S=98,5 \text{ см}^2$ ) і висотою 11 см було залито 150 мл етанолу. При цьому висота шару етанолу складала 1,5 см. Далі етанол підпалювався і горів протягом 2 хв. Після цього протягом 1 хв. гравіметричним методом визначалась масова швидкість вигорання етанолу. Далі в ємність з етанолом, що горить засипалась така кількість ППС, яка відповідає висоті шару сипкого матеріалу 4 см. Назвемо цей шар «базовим шаром». При цьому він досягав дна ємності та його рівень не змінювався в подальшому. Рівень спирту в циліндричній ємності в ході експерименту поступово зменшувався і к моменту гасіння складав 2–2,2 см. При цьому висота шару ППС яка знаходиться вище рівня етанолу складала 1,8–2 см.

Через 2 хв. проводилась візуальна оцінка інтенсивності горіння в балах або

проводили гравіметричні вимірювання втрати маси етанолу за 1 хв. горіння. Після чого засипався наступний шар сипкого матеріалу висотою 0,5 см. Через 2 хв. знов проводилась оцінка інтенсивності горіння етанолу або визначалась масова швидкість його вигорання. Ця процедура продовжувалась до тих пір поки не відбувалось гасіння етанолу. Після цього проводився тест на повторне займання. Для цього до поверхні верхнього шару сипкого матеріалу підносився палик. Якщо відбувалось займання, яке продовжувалось більше 5 сек., наносився додатковий шар сипкого матеріалу висотою 0,5 см з подальшим дослідом на повторне займання. Якщо у разі піднесення палика до верхнього шару сипкого матеріалу не виникало займання або воно припинялось за час менше 5 сек. фіксувалось гасіння лабораторного модельного вогнища. Дослід на повторне займання проводився протягом 5 хв. з інтервалом 1 хв. Для кожної вогнегасної системи дослідження гасіння лабораторного модельного вогнища проводився 3 рази. Якщо результати припинення горіння в трьох незалежних дослідах не співпадали, то приймався найгірший результат.

У випадку вогнегасних систем в яких міститься вода алгоритм експерименту був наступний. Після формування базового шару (4 см) на поверхню етанолу, що горить, наносився сипкий матеріал висотою 0,5 см. Такими матеріалами були перліт та два різновиду вермікуліту. Після чого за допомогою побутового розпилювача на верхній шар подавалось  $\sim 10$  г води, що відповідає питомої поверхневої витраті води  $1 \text{ кг/м}^2$ . Така кількість води близька до вологоутримання обраних сипких матеріалів. У разі загасання етанолу проводився дослід на можливість повторного займання як вказано вище. В усіх дослідах початок експерименту був однаковий. Спочатку визначались характеристики горіння етанолу без нанесення вогнегасного шару і з нанесенням базового шару (4 см). Середні значення всіх дослідів масовій швидкості вигорання етанолу з вільної поверхні та після нанесення базового шару ППС склали –  $9,8$  і  $2,2 \text{ г/(с}\cdot\text{м}^2)$  відповідно. Візуально було оцінено інтенсивність горіння за прийнятою шкалою в 5 балів (дуже сильне горіння) для вільної поверхні етанолу і 3 бали (помірне горіння) у випадку нанесення базового шару ППС.

Результати масових швидкостей вигорання етанолу після нанесення на базовий шар додаткової кількості ППС та оціночні значення інтенсивності горіння наведено в табл. 2.

**Табл. 2. Показники горіння у разі нанесення на базовий шар додаткових шарів сухого ППС**

Показник горіння	Висота шару ППС h, см			
	1	2	3	4
Питома поверхнева витрата $\Phi$ , $\text{кг/м}^2$	1,02	2,01	3,09	4,11
Масова швидкість вигорання $v$ , $\text{г/(с}\cdot\text{м}^2)$	1,21	0,56	0,26	0,16*
Інтенсивності горіння етанолу I, (бали)	3	2	1	0

\* – масова швидкість випарування.

Результати дослідів для випадку послідовного нанесення додаткових шарів інших сипких матеріалів наведено в табл. 3.

В усіх дослідах з додатковим подаванням води з питомою поверхневою витратою  $1 \text{ кг/м}^2$  на верхній шар перліту і двох різновидів вермікуліту висотою 0,5 см, відбувалось гасіння лабораторного модельного вогнища. При цьому протягом 5 хв. не спостерігалось повторне займання під впливом палика.

Також з використанням додаткового подавання води було проведено досліді з гасіння шарів ППС різної висоти. Використання тільки базового шару ППС ви-

сотою 4 см та подачі 10 г води призводило до гасіння вогнища пожежі, але через 1 хв. відбувалось повторене займання.

**Табл. 3. Показники горіння у разі нанесення на базовий шар ППС додаткових шарів різних сипких матеріалів**

Сипкий матеріал	Висота шарів сипкого матеріалів h, см	Питома поверхнева витрата $\Phi$ , кг/м <sup>2</sup>	Масова швидкість вигорання $\nu$ , г/(с·м <sup>2</sup> )	Інтенсивність горіння етанолу I, бали
Амофос	0,5	4,67	0,30	1
	1,0	9,32	0,18	0
Калійна сіль	0,5	5,52	0,51	1
	1,0	10,98	0,16	1
	1,5	16,75	0,13	0
Вуглеамонійна сіль*	0,5	4,39	-	1
	1,0	8,83	-	1
	1,5	13,26	-	0
NaHCO <sub>3</sub> *	0,5	3,14	-	2
	1,0	6,29	-	1
	1,5	9,57	-	1
	2,0	12,63	-	0
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O**	0,1	0,60	0,19	1
	0,2	1,22	0,11	0
Перліт	0,5	0,82	0,17	1
	1,0	1,63	0,08	0
Вермікуліт-1	0,5	1,38	0,19	1
	1,0	2,86	0,12	0
Вермікуліт-2	0,5	0,97	0,22	1
	1,0	1,92	0,14	0

\* – солі частково розкладаються під дією полум'я,

\*\* – кристалогідрат плавиться під дією полум'я.

У разі додаткового нанесення 0,5 см і 1,0 см ППС і подавання 10 г води повторне займання також відбувалось. Надійне гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі досягалося у разі нанесення на базовий шар додаткового шару ППС висотою 1,5 см з наступним подаванням 10 г води. При цьому загальна висота ППС над рідиною складала 3,5 см.

### 5.3. Визначення економічно ефективної системи на основі сипких легких матеріалів

Враховуючи, що дослідження проводилось з використанням лабораторного модельного вогнища пожежі класу «В», результати одержані для умови коли нижній шар ППС осів на дно ємності. При цьому в рідину занурено тільки шар ППС висотою 2 см. Вище цього рівня знаходиться шар ППС висотою 2 см і додатковий шар сухого або змоченого сипкого матеріалу. В реальних умовах шар ППС повинен бути таким щоб утримувати верхній шар вогнегасної системи. Для визначення висоти нижнього шару ППС, який здатен утримувати верхній шар вогнегасної системи можна використати дані отриманні при досліджуванні плавучості ППС в етанолі. В роботі [9] плавучість (П) була визначена через висоти шарів сипучого матеріалу, які знаходяться над рівнем рідини ( $h_{\uparrow}$ ) і нижче рівня рідини ( $h_{\downarrow}$ ):

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

З цього співвідношення отримуємо:

$$h \uparrow = \frac{h \downarrow \cdot \Pi}{1 - \Pi}. \quad (3)$$

Робимо висновок, що шар ППС висотою 1 см занурений в етанол може утримувати верхній ППС висотою 0,89 см. Враховуючи, що насипна густина ППС дорівнює 104 кг/м<sup>3</sup> можна встановити, що шар ППС товщиною 1 см і площею 1 м<sup>2</sup> може утримувати вище своєї поверхні масу сипкого матеріалу рівною 0,93 кг. При цьому треба прийняти до уваги, що шар сипкого матеріалу, який знаходиться вище рівня етанолу і виконує ізолюючі функції буде включати шар ППС висотою 2 см. Масова витрата ППС на 1 м<sup>2</sup> цієї частини шару складе 2,08 кг. Результати (табл. 3) вказують на те, що обрані інгібітори горіння у гранульованому вигляді можна виключити з подальшого розгляду, тому що вони мають на порядок більшу питому поверхневу витрату ніж інші сипкі матеріали.

Для інших сухих сипких матеріалів питомі поверхневі витрати для різних частин загального шару потрібних для гасіння етанолу наведено в табл. 4. Після сумування маси шару ППС висотою 2 см і питомої поверхневої витрати інших сипких матеріалів верхнього шару було розраховано загальну масу всього вогнегасного шару, що знаходиться вище рівня рідини. А виходячи з того, що шар ППС товщиною 1 см і площею 1 м<sup>2</sup> може утримувати вище своєї поверхні масу сипкого матеріалу рівною 0,93 кг також було розраховано питому масову витрату ППС на нижній шар вогнегасної системи та загальні витрати всіх сипких матеріалів на обидва шари (табл. 4).

**Табл. 4. Показники поверхневих витрат сипких матеріалів для гасіння етанолу**

Питомі поверхневі витрати	Сухий сипкий матеріал				
	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> · 12H <sub>2</sub> O	Перліт	Вермікуліт-1	Вермікуліт-2	ППС
На верхній шар Ф↑, кг/ м <sup>2</sup>	1,22	1,63	2,86	1,92	5,16
На верхній шар ППС Ф↑(ППС), кг/ м <sup>2</sup>	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
Загальні витрати на верхній шар Ф↑(заг), кг/ м <sup>2</sup>	3,30	3,71	4,94	4,00	7,24
Витрати ППС на нижній шар Ф↓(ППС), кг/ м <sup>2</sup>	3,69	4,15	5,52	4,47	8,09
Загальні витрати на обидва шари Ф(заг), кг/ м <sup>2</sup>	6,99	7,86	10,46	8,47	15,33

Аналогічні розрахунки було проведено для випадку гасіння етанолу з додатковим подаванням на поверхню води с поверховою питомою витратою 1 кг/м<sup>2</sup>(табл. 5).

Одним з важливіших факторів під час вибору вогнегасної системи є економічний фактор. Розглянемо одну із складових цього фактору – вартість вогнегасних речовин. Для розрахунків були обрані мінімальні оптові ціни відповідних матеріалів в Україні станом на січень 2023 року.



**Табл. 5. Показники поверхневих витрат сипких матеріалів для гасіння етанолу з додатковою подачею води**

Питоми поверхневі витрати	Матеріал			
	Перліт	Вермікуліт-1	Вермікуліт-2	ППС
Змочених сипких матеріалів на верхній шар $\Phi \uparrow$ , кг/м <sup>2</sup>	0,82	1,38	0,97	1,56
На верхній шар ППС $\Phi \uparrow$ (ППС), кг/м <sup>2</sup>	2,08	2,08	2,08	2,08
На воду $\Phi \uparrow$ (H <sub>2</sub> O), кг/м <sup>2</sup>	1,0	1,0	1,0	1,0
Загальні на верхній шар $\Phi \uparrow$ (заг), кг/м <sup>2</sup>	3,90	4,46	4,05	4,64
На нижній шар ППС $\Phi \downarrow$ (ППС), кг/м <sup>2</sup>	4,36	4,99	4,53	5,19
Загальні на обидва шари $\Phi$ (заг), кг/м <sup>2</sup>	8,26	9,45	8,58	9,83

Витрати на воду не враховувались.

Нижче наведена вартість із розрахунку на 1 кг матеріалу:

- Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> · 12H<sub>2</sub>O (хімічна класифікація «чистий для аналізу») – 135 грн;
- перліт – 20,71 грн;
- вермікуліт-1 – 44,37 грн;
- вермікуліт-2 – 60,32 грн;
- ППС (скляна пінокрихта, Шостка) – 13,7 грн/кг.

Результати розрахунків фінансових витрат на досліджені матеріали наведено в табл. 6. Треба звернути увагу на те, що у всіх випадках є нижній шар, що складається із ППС різної висоти.

**Табл. 6. Фінансові витрати на вогнегасні матеріали**

Фінансові витрати, грн./м <sup>2</sup>	Матеріали				
	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> · 12H <sub>2</sub> O	Перліт	Вермікуліт-1	Вермікуліт-2	ППС
На сухі матеріали	244	119	231	206	210
На змочені матеріали	*	133	314	399	100

\* – розчиняється у воді.

Аналіз отриманих даних (табл. 6) свідчить, що найкраще співвідношення забезпечує система на основі змоченого подрібненого піноскла, вартість такої системи складає 100 грн/м<sup>2</sup>.

## 6. Обговорення результатів дослідження вогнегасних характеристик легких сипких матеріалів гасіння етанолу

Дослідження вогнегасних характеристик системи на основі сипких легких матеріалів призначених для гасіння полярних легкозаймистих рідин призвело до таких результатів. Встановлено, що процес горіння етанолу припиняється за такої висоти верхнього вогнегасного шару сухих сипких матеріалів, коли масова швидкість вигорання етанолу стає менше 0,3 г/(с·м<sup>2</sup>) (табл. 2–3). При цьому швидкість потрапляння парів етанолу у повітря становиться меншим за швидкість їх дифузії у зовнішній простір.

За масовою витратою сухих матеріалів перевагу за вогнегасними властивостями має система за участю кристалогідрату Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> · 12H<sub>2</sub>O – 6,99 кг/м<sup>2</sup> (табл. 4). Це пояснюється високими інгібуючими властивостями обраного кристалогідрату. Найгірші результати показала система з моношаром сухого ППС.

Аналіз показників поверхневих витрат сипких матеріалів для гасіння етанолу з додатковою подачею води показав, що у разі змочування верхнього шару

суттєво збільшуються вогнегасні властивості систем на основі сипких матеріалів. Це обумовлене збільшенням ізолюючих властивостей шарів дрібних сипких матеріалів за рахунок заповнення водою порожнин між їх гранулами. На відміну від гранульованого піноскла ці сипучі матеріали складаються з гранул малого розміру і їх порожнечі мають малі розміри. Гранули перліту та вермікулиту гідрофільні, що призводить до перекривання поверхневих шарів води, що змочує ці матеріали.

Гранули ППС мають більші розміри і в цьому матеріалі не відбувається перекривання шарів води, що змочують його поверхню. Це призводить до того, що порожнини між гранулами ППС залишаються не заповненими. Одночасно треба відмітити що, ППС має на поверхні відкриті пори, що забезпечує утримання ним великої кількості води. Наявність води у верхньому шарі призводить до зменшення концентрації парів етанолу у приповерхневому шарі за рахунок їх абсорбції водою. Саме завдяки абсорбції змочування ППС призводить до суттєвого збільшення вогнегасних властивостей при гасінні етанолу.

За показником ціни вогнегасних матеріалів суттєву перевагу має система з ППС на поверхню якого подано воду – 100 грн./м<sup>2</sup> (табл. 6). Крім того, ця система має суттєву перевагу в простоті технічної реалізації. Так, для формування на поверхні етанолу вогнегасного шару необхідно використання одного засобу подавання сипкого матеріалу з відносно великим розміром гранул. Крім того гранули ППС можна подавати в змоченому вигляді, тому що вони не злипаються. Це в свою чергу дозволяє виключити з технології гасіння стадію подавання розпиленої води.

Експериментальні дослідження було проведено на лабораторних модельних вогнищах пожежі класу «В» малих розмірів. Відомо, що умови горіння та пожежогасіння модельного вогнища істотно залежать від його розмірів. Тому визначені експериментально на лабораторних малорозмірних модельних вогнищах кількісні характеристики вогнегасної здатності вимагають уточнення на модельних вогнищах великих розмірів. Для впровадження в практику пожежогасіння легкозаймистих полярних рідин запропонованого засобу потрібно проведення додаткових досліджень для інших полярних рідин.

## 7. Висновки

1. Розроблено експериментальну методику визначення вогнегасних властивостей системи на основі легких сипких матеріалів інгібітору горіння і води, яка забезпечує рівномірний розподіл змоченого матеріалу по поверхні базового шару. Раніше використану методику було модернізовано для наближення умов горіння і гасіння до реальних пожеж. При цьому збільшено об'єм горючої рідини зі 100 мл до 150 мл, час вільного горіння обрано рівним 2 хв. та час на визначення можливості повторного займання з 1 хв. до 5 хв.

2. Експериментально визначено масові швидкості вигорання, витрати легкого сипкого матеріалу, маси води та інгібітору горіння які забезпечують гасіння етанолу. Аналіз отриманих результатів дозволяє констатувати, що процес горіння етанолу припиняється за такої висоти верхнього вогнегасного шару сухих сипких матеріалів, коли масові швидкості вигорання етанолу стає менше 0,3 г/(с·м<sup>2</sup>). Експериментально визначено масову витрату подрібненого піноскла (15,33 кг/м<sup>2</sup>), перліту (7,86 кг/м<sup>2</sup>), вермікулиту 1 (10,46 кг/м<sup>2</sup>), вермікулиту 2 (8,47 кг/м<sup>2</sup>), кристалогідрату гідрофосфату натрію (6,99 кг/м<sup>2</sup>) і води для гасіння етанолу в лабораторному модельному вогнищі пожежі класу «В». Встановлено, що змочування верхнього шару сипкого матеріалу призводить до підвищення вогнегасної здатності запропоно-

ваних систем до 50 % (за загальною питомою поверхневою витратою для подрібненого піноскла змочуваного водою). Цей факт пояснюється збільшенням ізолюючих властивостей дрібних сипких матеріалів верхнього шару двошарової системи з одночасним зменшенням тиску парів етанолу за рахунок їх адсорбції водою.

3. Обрано системи на основі легких сипких матеріалів, які найбільш ефективні для гасіння легкозаймистих полярних рідин за економічними показниками. На основі отриманих на лабораторному модельному вогнищі експериментальних даних і економічного аналізу встановлено, що за параметром результат – вартість найкраще співвідношення забезпечує система на основі змоченого подрібненого піноскла. Для гасіння етанолу потрібно забезпечити питому поверхневу витрату подрібненого піноскла не менше  $8,83 \text{ кг/м}^2$  і води  $1,00 \text{ кг/м}^2$ , а вартість такої системи складає  $100 \text{ грн/м}^2$ . Позитивним є те, що система не потребує складних технічних рішень завдяки необхідності подачі тільки одного сипкого матеріалу.

### 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.

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.

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

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

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

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

7. Dadashov I., Loboichenko V., Kireev A. Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. Pollution Research. 2018. Vol. 37. № 1. P. 63–77. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85062144705&partnerID=40&md5=36a1aa2ad65f6325a5bac590a1deb977>

8. 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

9. 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>

10. 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

11. 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

12. Chernukha A., Teslenko A., Kovaliov P., Bezuglov O. Mathematical modeling of fire-proof efficiency of coatings based on silicate composition. *Materials Science Forum*. 2020. 1006 MSF. P. 70–75. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85090288706&doi=10.4028%2fwww.scientific.net%2fMSF.1006.70&partn>

13. 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/mateconf/201823002036

14. 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: <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99>

15. Дадашов І. Ф., Кіреєв О. О., Трегубов Д. Г., Тарахно О. В. Гасіння горючих рідин твердими пористими матеріалами та гелеутворюючими системами. Харків.: ФОП Бровін, 2021. 240 с. ISBN 978-617-8009-60-1. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14033>

16. 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

17. Бабашов І. Б., Дадашов І. Ф., Кіреєв О. О., Савченко О. В. Вибір сипких матеріалів для гасіння полярних легкозаймистих рідин. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. Вип. 1(35). С. 304–311. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/16031>

18. 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

*I. Babashov<sup>1</sup>, Vice rector*

*I. Dadashov<sup>1</sup>, DSc, Head of the Faculty*

*O. Kireev<sup>2</sup>, DSc, Professor, Professor of the Department*

*O. Savchenko<sup>2</sup>, PhD, Senior Researcher, Deputy Head Department*

*M. Musayev<sup>3</sup>, Adjunct*

<sup>1</sup>*Academy of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan*

<sup>2</sup>*National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

<sup>3</sup>*Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan*

## RESULTS OF THE DETERMINATION OF THE FIRE EXTINGUISHING CHARACTERISTICS OF LIGHT FLUID MATERIALS WHEN EXTINGUISHING ETHANOL

Experimental studies of the previously proposed method of extinguishing polar liquids with the help of fire extinguishing agents based on light loose porous materials have been continued. An experimental method for determining the fire-extinguishing properties of a system based on light loose materials based on a laboratory model fire of class "B" has been developed. On its basis, the thicknesses of

the layers of light loose materials, which lead to the extinguishing of ethanol and its mass burning rate at different layer thicknesses, are determined. Obtained results for dry and wetted materials. As a layer that ensures the buoyancy of the fire extinguishing system, crushed foam glass with a granule size of 1–1,5 cm was used. It was established that to ensure increased insulating properties, it is advisable to use expanded perlite with a granule size of  $1,2 \pm 0,2$  mm as the top layer and expanded lamellar vermiculite with  $2 \times 2,5$  mm and  $2 \times 5$  mm plates. It was established that wetting the upper layer of loose materials by supplying sprayed water leads to an increase in their fire-extinguishing properties. It is shown that water reduces the concentration of ethanol vapors above the layer of loose materials due to their adsorption. In order to increase the insulating and inhibitory properties, it was used to apply low-melting crystalline hydrate  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$  to the surface of crushed foam glass. This fire extinguishing system provided the lowest mass consumption of ethanol extinguishing of  $6,99 \text{ kg/m}^2$ . An assessment of the financial costs of fire extinguishing agents for the proposed systems was carried out. A conclusion was made about the significant economic advantage of the system with crushed foam glass on the surface of which water was sprayed. Financial costs when applying this system are UAH  $100 \text{ grn/m}^2$ . It is noted that such a system has a significant advantage in the simplicity of technical implementation due to the need to feed only one loose material.

**Keywords:** ethanol, loose materials, foamglass, expanded perlite, expanded vermiculite, fireextinguishing properties

### 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.
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.
3. EN 1568-3:2018. Foam concentrates. Part 3: Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids /European standard.
4. Borovikov, V. O., Chepovskiy, V. O., Slutska, O. M. Rekomendats, I. Yi. (2009). Schodo gasinnya pozhezh u spirtoshovichah, scho mistyatet iloviy spirt. MNS UkraYini. K.:UkrNDIPB, 76.
5. Ivanković, T. (2010). Surfactants in the environment. Arh. Hig. Rad. Toksikol, 61, 1, 95–110. doi: 10.2478/10004-1254-61-2010-1943
6. Olkowska, E. (2011). Analytics of surfactants in the environment: problems and challenges. Chem. Rev, 111, 9, 5667–5700. doi: 10.1021/ cr100107g
7. Dadashov, I., Loboichenko, V., Kireev, A. (2018). Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. Pollution Research, 37, 1, 63–77. Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85062144705&partnerID=40&md5=36a1aa2ad65f6325a5bac590a1deb977>
8. 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
9. 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), 3, 655–664. Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84938701022&partnerID=40&md5=7bb1aef5a447873de21f8e81c67eedd0>
10. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2018).

Improving the installation for fire extinguishing with finelydispersed water. *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*, 2, 10–92, 38–43. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127865

11. 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

12. Chernukha, A., Teslenko, A., Kovaliov, P., Bezuglov, O. Mathematical modeling of fire-proof efficiency of coatings based on silicate composition. (2020). *Materials Science Forum*, 1006, 70–75. Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85090288706&doi=10.4028%2fwww.scientific.net%2fMSF.1006.70&partn>

13. Vasilchenko, A., Otrosh, Yu., 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

14. 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

15. Dadashov, I. F., Kirieiev, O. O., Trehubov, D. H., Tarakhno, O. V. (2021). *Hasinnia horiuchykh ridyn porystymy materialamy ta helevtoriuuichymy systemamy*. Kharkiv: FOP Brovin, 240. ISBN 978-617-8009-60-1. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14033>

16. Makarenko, V. S., Kirieiev, O. O., Trehubov, D. H., Chyrkina, M. A. (2018). *Doslidzhennia vohnehasnykh vlastyvostei binarnykh shariv lehkykh porystykh materialiv*, 1(33), 235–245. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-18

17. Babashov, I. B., Dadashov, I. F., Kirieiev, O. O., Savchenko, O. V. (2022). *Vybir sypkykh materialiv dlia hasinnia poliarnykh lehkozaimystykh ridyn*, 1(35), 311–324. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/16031>

18. Makarenko, V. S., Kirieiev, O. O., Slepuzhnikov, Ye. D., Chyrkina, M. A. (2022). *Doslidzhennia vplyvu poroshkiv na vohnehasni kharakterystyky binarnykh shariv porystykh materialiv*, 1(35), 297–310. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-22

Надійшла до редколегії: 02.03.2023

Прийнята до друку: 14.04.2023