

УДК 614.84

*В. С. Макаренко, ад'юнкт (ORCID 0000-0001-5629-1159)**Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

## ПІДВИЩЕННЯ ВОГНЕГАСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ШЛЯХОМ ВВЕДЕННЯ КРИСТАЛОГІДРАТІВ

Встановлено суттєве підвищення вогнегасних властивостей бінарних шарів легких сипких матеріалів у разі введення до складу засобу гасіння кристалогідратів. Введення кристалогідратів було запропоновано для підвищення охолоджуючої здатності, ізолюючої, флегматизуючої та інгібуючої дії вогнегасного засобу на основі сипких матеріалів. Для забезпечення підвищення ізолюючої дії було обґрунтовано вибір кристалогідратів з малими температурами плавлення. Це дозволило забезпечити плавлення кристалогідрату та заповнення порожнин між гранулами сипких матеріалів. Для забезпечення підвищення інгібуючої дії обрано кристалогідрати, які мають у своєму складі іони-інгібітори. Запропоновано три шляхи введення кристалогідратів до складу вогнегасної системи: насипання кристалогідрату в порошкоподібному стані на верхній шар бінарної вогнегасної системи на основі сипких матеріалів; його введення шляхом просочення сипкого матеріалу насиченим водним розчином кристалогідрату та покриття сипкого матеріалу тонким шаром кристалічного кристалогідрату. В якості нижнього шару, який забезпечує плавучість системи, використано подрібнене піноскло. В якості верхнього шару з підвищеними ізолюючими властивостями обґрунтовано використання спученого перліту з розміром гранул  $1,2 \pm 0,2$  мм і пластинчатого вермикуліту з розміром пластинок  $1 \times 2$  і  $2 \times 5$  мм. На основі експериментальних досліджень впливу низки кристалогідратів на вогнегасні характеристики бінарних шарів легких пористих матеріалів встановлено, що у найбільшій ступені вогнегасні властивості підвищують змочений насиченим розчином гідрофосфату натрію перліт (0,35 см) та змочені цим же розчином вермикуліти (0,3 см та 0,5 см відповідно). Аналіз одержаних даних дозволяє зробити висновок, що основний внесок у підвищення вогнегасних характеристик за рахунок введення кристалогідрату  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  в двошарову вогнегасну систему обумовлений інгібуванням процесу горіння бензину.

**Ключові слова:** легкозаймисті рідини, бінарна вогнегасна система, вогнегасні властивості, перліт, вермикуліт, піноскло, кристалогідрати

### 1. Вступ

Згідно зі статистикою [1] кількість пожеж за участю рідин залишається на високому рівні. Такі пожежі класифікуються як пожежі класу «В». Існує декілька видів таких пожеж: горіння резервуарів з горючими рідинами, розливів рідин і нафтових фонтанів [2]. У зв'язку зі зрощенням нафти та нафтопродуктів відповідно зростають економічні збитки від таких пожеж. Найбільші труднощі виникають при гасінні легкозаймистих рідин (ЛЗР) в резервуарах великої місткості. Найбільш ефективними засобами гасіння ЛЗР вважаються різні різновиди вогнегасних пін. Але вони мають ряд недоліків. Основними з них є мала стійкість пін, невеликі екологічні та економічні параметри пінного пожежогасіння. Саме тому актуальною проблемою є розробка нових методів гасіння пожеж класу «В».

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У нормативних вимогах більшості країн світу вогнегасні піни відмічаються як основний засіб гасіння горючих рідин (ГР) [3]. Але такий засіб має низьку ефективність. Вогнегасні піни з часом самовільно руйнуються. Крім того, руйнування пін прискорюється в разі «жорсткої» подачі, при дії інтенсивних теплових потоків від полум'я палаючої рідини, а також при контакті з рідинами, особливо полярними. Також існує проблема подачі піни на великі відстані. Одним з

суттєвих недоліків пін є наявність в їх складі екологічно небезпечних речовин [4]. Також відмічається висока вартість багатьох сучасних піноутворювачів [5]. Для успішного гасіння пожеж класу «В» є потреба створення умов погасання ГР одразу над усією поверхнею рідини, що горить. Якщо не створені такі умови над якоюсь ділянкою, то горіння пошириться на всю поверхню рідин після руйнування піни. Умов загасання ГР одночасно над усією її поверхнею можна досягнути, якщо інтенсивність подавання піни буде перевищувати інтенсивність її руйнування. В разі великих площ горіння це потребує забезпечити великі інтенсивності подавання піни. Остання вимога потребує використання більшої кількості засобів подавання піни або підвищення їх продуктивності.

Більшості відмічених недоліків позбавлені вогнегасні засоби на основі легких сипких матеріалів [6]. У цих роботах у якості такого матеріалу було обґрунтовано використання гранульованого або подрібненого піноскла (ППС). ППС має високу плавучість у всіх ГР. Такий матеріал наноситься на поверхню ГР. При формуванні деякої товщини шару ППС на поверхні рідини, що горить, може відбутися припинення горіння. Для легкозаймистих рідин (ЛЗР) вогнегасна товщина шару ППС може перевищувати 50 см. Для ГР з високими температурами спалаху вогнегасна товщина шару ППС складає декілька сантиметрів. Тобто недоліком ППС, як вогнегасної речовини, є його високі витрати на гасіння ЛЗР.

Для суттєвого зменшення вогнегасної товщини шару ППС у цій роботі було запропоновано додаткове нанесення на поверхню ППС шару гелю. Такий спосіб гасіння ГР має деякі переваги по зрівнянню з використанням повітряно-механічних пін як в економічному, так і в екологічному плані. Однак такий спосіб гасіння має свої недоліки. Він потребує використання трьох окремих вогнегасних речовин: легкого сипкого матеріалу, розчинів гелеутворювача і каталізатора гелеутворення. Це в свою чергу вимагає використання трьох окремих засобів подавання, що ускладнює весь процес гасіння.

У разі гасіння рідин з температурами спалаху вище 100 °С відсутня потреба подавання компонентів гелеутворюючої системи. Якщо проводять гасіння ЛЗР потреба у використанні компонентів гелеутворюючої системи залишається. З цього можна зробити висновок, що існуючі технології гасіння ЛЗР мають суттєві недоліки, тому для цього випадку доцільно розробити більш кращі методи гасіння.

У роботі [7] для спрощення технології гасіння ЛЗР запропоновано наносити на шар ППС інший сипкий матеріал з більшими ізолюючими властивостями, ніж у шару ППС. Для такого сипкого матеріалу не обов'язковою є вимога високої плавучості в рідинах. У якості таких матеріалів було обґрунтовано використання спучених перліту та вермикуліту. В запропонованій технології гасіння можна використовувати тільки один засіб подавання сипкого матеріалу, тому що формування двох шарів сипких матеріалів проводиться не одночасно, а послідовно. Це дозволяє за допомогою одного засобу послідовно подавати спочатку ППС, а потім інший сипкий матеріал. Результати експериментальних досліджень вогнегасних властивостей бінарних шарів легких сипких матеріалів показали, що для гасіння бензину потрібно сформувати на його поверхні (вище рівня рідини) шар ППС товщиною 2 см на поверхню якого нанесено (1–1,5) см спучених перліту або вермикуліту. В разі використання змочених перліту або вермикуліту верхній шар легкого сипкого матеріалу можна зменшити на (0,5–1) см. Порівняння з гасінням шляхом нанесення шару гелю показує, що масові

питомі витрати спучених перліту і вермикуліту в перерахунку на сухий матеріал близькі до відповідних витрат гелю.

Також в роботі [8] було досліджено вплив нанесення порошків неорганічних речовин на поверхню бінарних шар легких сипких матеріалів на їх вогнегасні властивості. Найкращі результати було отримано для порошків ряду кристалогідратів. Було запропоновано пояснення такого ефекту наступними факторами:

- кристалогідрати мають високу охолоджуючу здатність;
- випарування води з розплаву кристалогідрату обумовлює їх флегматизуючу дію;
- легкоплавкі кристалогідрати виявляють здатність підвищувати ізолюючі властивості верхнього шару сипкого матеріалу, завдяки тому, що вони під дією полум'я плавляться і в рідкому стані стікають в порожнини нижнього шару, де відбувається твердіння розплаву;
- деякі кристалогідрати містять у своєму складі інгібітори горіння (катиони натрію та калію, і фосфат іони).

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є вибір кристалогідрату та способу його введення в систему, призначену для гасіння легкозаймистих рідин на основі легких сипких матеріалів.

### 3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є експериментальне дослідження впливу легкоплавких кристалогідратів на вогнегасні властивості систем призначених для гасіння легкозаймистих рідин на основі легких сипких матеріалів.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

1. Обґрунтувати вибір кристалогідратів, які забезпечать підвищення вогнегасних властивостей бінарних шарів сипких матеріалів за рахунок високої охолоджуючої флегматизуючої та інгібуючої здатності, а також прийнятні температури плавлення.
2. Розробити шляхи введення кристалогідратів до складу вогнегасної системи.
3. Експериментально визначити вогнегасні властивості систем на основі бінарних шарів легких сипких матеріалів і кристалогідратів та вибір на цій основі вогнегасного засобу з найкращими характеристиками.

### 4. Матеріали та методи дослідження

У якості матеріалу нижнього шару вогнегасної системи раніш було обґрунтовано [7–8] ППС з розміром гранул (1,0–1,5) см. У якості верхнього шару, як і раніше, були використані спучений перліт з гранулами сферичної форми діаметром (1–1,5) мм, та спучений лускатий вермикуліт з лінійними розмірами лусочок 1×2 мм та 2×5 мм. Всі ці матеріали мають кваліфікацію «технічний».

Обрані для дослідження вогнегасних властивостей кристалогідрати мали хімічні кваліфікації чистоти «чистий для аналізу» і «хімічно чистий». Вміст основної речовини був не менше 99,7 %. У разі використання індивідуальних кристалогідратів їх витримували в ексикаторі при відповідній вологості та температурі. У якості ЛЗР було обрано автомобільний бензин А-92 з температурою спалаху мінус 32 °С.

У якості лабораторного модельного вогнища пожежі класу «В» була обрана металева ємність циліндричної форми з діаметром 11,2 см ( $S=98,5 \text{ см}^2$ ). У цю Fire Safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-36-12

ємність заливалося 110 мл бензину, що забезпечувало шар рідини в металевій ємності  $\sim 1,1$  см. Після чого він підпалювався. На його поверхню через 2 хвилини вільного горіння наносився базовий шар піноскла товщиною 4 см. При цьому рівень рідини піднімався до  $\sim 2$  см від дна металевої ємності. Через 2 хвилини горіння послідовно наносилися шари легкого пористого матеріалу товщиною по 0,5 см. Маса речовин визначалась за допомогою ваг безперервного зважування ТНВ-600 з точністю  $\pm 0,01$  г. Об'єми рідких речовин відмірялися за допомогою мірних циліндрів.

## **5. Дослідження впливу легкоплавких кристалогідратів на вогнегасні властивості легких сипких матеріалів**

### **5.1. Обґрунтування вибору кристалогідратів для вогнегасних систем**

Кристалогідрати – кристалічні речовини, що містять хімічно зв'язані молекули води. Вони утворюються, якщо в кристалічній решітці іони утворюють більш міцний зв'язок з молекулами води, ніж зв'язок між катіонами і аніонами в кристалі безводної солі. Під час нагрівання деякі кристалогідрати плавляться без зміни складу. Кристалогідрати – порівняно стійкі гідрати, які можна виділити з розчину у твердому стані. Деякі з них поступово розкладаються вже при звичайній температурі. В багатьох випадках кристалогідрати можуть втрачати або приєднувати молекули води в залежності від вологості і температури повітря.

Кристалогідрати солей виявляють багатопланову охолоджуючу дію. Частина тепла поглинається на плавлення кристалогідрату. При цьому утворюється водний розчин який поглинає тепло під час свого нагрівання. Одночасно починається випарування води з такого розчину. Цей процес потребує велику кількість тепла, тому що вода має аномально високу теплоту випарування. Вода, що випарувалась з розчину, потрапляє в газову фазу, викликає зменшення концентрації парів ГР і кисню над поверхнею верхнього шару сипкого матеріалу. Таким чином кристалогідрати солей проявляють механізм розбавлення для припинення горіння.

Кристалогідрати, особливо легкоплавкі, також здатні підвищити ізолюючі властивості шару сипкого матеріалу. Так у разі нанесення їх на верхній шар сипкого матеріалу, вони під дією полум'я плавляться і стікають вниз. Нижні шари сипкого матеріалу мають меншу температуру, що призведе до кристалізації кристалогідратів. Це, в свою чергу, може призвести до часткового або повного заповнення порожнин між гранулами сипкого матеріалу. Це призведе до зменшення частки об'єму порожнин, що викликає підвищення ізолюючих властивостей шару сипкого матеріалу [8].

Крім того, на вогнегасні властивості кристалогідратів може вплинути наявність в їх складі іонів інгібіторів. З розглянутих в попередніх дослідженнях [9] кристалогідратів (сульфат алюмінію ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ), натрій оцтовокислий ( $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), гідрофосфат натрію ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), калій-натрію виннокислий (сегнетова сіль) ( $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), сульфат цинку ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), тіосульфат натрію ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )) до таких іонів можна віднести катіони натрію та калію, а з аніонів – гідрофосфатіони.

Крім раніш обраних кристалогідратів, у цій роботі приймемо до розгляду ще один кристалогідрат  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , який не було розглянуто в попередніх дослідженнях. В табл. 1 наведено температури плавлення, масовий вміст води та

наявність іонів-інгібіторів в обраних кристалогідратах.

Охолоджуюча і розбавляюча дія кристалогідратів збільшується зі зростанням масового вмісту води. По цим параметрам перевагу має  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . Плавлення кристалогідратів починається тим раніше, чим менша температура плавлення. Це вказує також на перевагу цього кристалогідрату. За наявності іонів-інгібіторів три кристалогідрати  $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  і  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  мають перевагу перед іншими. Таким чином найбільш перспективним кристалогідратом можна визнати  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . Його вплив на вогнегасні властивості систем на основі бінарних шарів легких сипких матеріалів потребують подальшого експериментального дослідження.

**Табл. 1. Температури плавлення ( $T_{\text{пл}}$ ), масовий вміст води ( $\omega$ ), та наявність іонів-інгібіторів в кристалогідратах**

Кристалогідрат	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$\omega$ , мас. %	Іони-інгібітори
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	86	48,6	-
$\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	58	39,7	$\text{Na}^+$
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	60	26,1	$\text{Na}^+$ , $\text{HPO}_4^{2-}$
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	38	60,3	$\text{Na}^+$ , $\text{HPO}_4^{2-}$
$\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	75	25,5	$\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	39	43,9	-
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	49	36,3	$\text{Na}^+$

Гідрат  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (натрій фосфорнокислий двозаміщений) – безбарвні прозорі призматичні кристали моноклінної системи, швидко вивітрюванні на повітрі. Густина  $1,52 \text{ г/см}^3$ . При температурі  $38^\circ\text{C}$  плавляться у кристалізаційній воді. При температурі  $100^\circ\text{C}$  гідрат втрачає кристалізаційну воду, при  $250^\circ\text{C}$  розпадається з утворенням  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ . При обережному висушуванні, при температурі декілька нижче точки плавлення утворюється дигідрат  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Це білий порошок, стійкий у повітрі, з відносною вологістю нижче 50 %. Густина  $2,066 \text{ г/см}^3$ . Натрійгідрофосфат – нетоксичний, негорючий, не має канцерогенної дії. Відноситься до 4 класу небезпеки.

## **5.2. Розроблення шляхів введення кристалогідратів до складу вогнегасної системи**

В попередніх дослідженнях [9] кристалогідрати в порошкоподібному стані насипалися на верхній шар бінарної вогнегасної системи на основі сипких матеріалів. При цьому не розглядався спосіб нанесення порошку кристалогідрату безпосередньо на шар ППС за відсутності верхнього шару сипкого матеріалу. Цей спосіб використання кристалогідратів розглянуто в цій роботі. Крім того, буде розглянуто метод введення гідрофосфату натрію шляхом просочення сипкого матеріалу його насиченим водним розчином. У такому випадку за сприятливих умов в результаті випарування води на поверхні сипкого матеріалу можливе утворення шару твердого кристалогідрату. Розчинність гідрофосфату натрію у воді за температури  $20^\circ\text{C}$  складає 7,2 мас. %. За температури нижче  $30^\circ\text{C}$  випадає  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . Водні розчини мають слабо лужну реакцію через гідроліз по аніону.

Процедура змочування сипких матеріалів виконувалась таким чином.

Гранульований матеріал спочатку зважувався, заливався насиченим розчином гідрофосфату натрію і притоплювався на 5 хвилин важкою пластиною. Потім висипався на металічну сітку і протягом 1 хвилини стряхувався. Після цього змочений сипкий матеріал висипався в лабораторне модельне вогнище пожежі класу «В».

Ще одним методом введення  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  у вогнегасну систему є покриття сипкого матеріалу кристалічним гідрофосфатом натрію. Як у випадку змочування сипкого матеріалу він заливався насиченим розчином гідрофосфату натрію і пресувався на 5 хвилин важкою пластиною. Після чого висипався на металічну сітку і висушувався при періодичному перемішуванні. В такому випадку, в разі температури навколишнього середовища нижче  $30\text{ }^\circ\text{C}$  і вологості повітря вище 70 %, на поверхні сипкого матеріалу утворювався тонкий шар кристалогідрату, який в подальшому можна було зберігати в ізольованій ємності без зміну складу кристалогідрату.

Різниця між використанням сипкого матеріалу змоченого розчином гідрофосфату натрію і покритого тонким шаром кристалогідрату полягає в тому, що в останньому випадку гарантовано утворюється  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . У випадку використання розчину насиченого гідрофосфату натрію умови випарування у вогнищі пожежі можуть відрізнятися від тих, що потрібні для утворення  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ .

### 5.3. Експериментальне визначення вогнегасних властивостей систем на основі бінарних шарів і кристалогідратів

У якості легкозаймистої рідини було використано бензин. Подрібнене піноскло з розміром гранул (10–15) мм було обрано у якості шару, що забезпечує плавучість. Спучений перліт у вигляді гранул кулеподібної форми (1–1,5) мм та спучений вермикуліт у вигляді пластинок двох розмірів 1–2 мм (вермикуліт – 1) і 2–5 мм (вермикуліт – 2) було обрано у якості верхнього ізолюючого шару.

У лабораторне модельне вогнище заливалося 110 мл бензину. Після чого він підпалювався. На його поверхню через 2 хвилини вільного горіння наносився базовий шар піноскла товщиною 4 см. При цьому рівень рідини піднімався до ~2 см від дна металевої ємності. Через 2 хвилини горіння додатково наносився шар легкого пористого матеріалу товщиною 0,5 см. Після засипки 0,5 см пористого матеріалу спостерігалось помірне горіння (табл. 2) [7].

Табл. 2. Якісна шкала інтенсивності горіння

Бали	Характеристика полум'я	Висота полум'я
5	дуже сильне горіння	близька до висоти полум'я без шару легкого матеріалу
4	сильне горіння	близька до $\frac{1}{2}$ висоти полум'я без шару легкого матеріалу
3	помірне горіння	близька до $\frac{1}{10}$ висоти полум'я без шару легкого матеріалу
2	слабке горіння	менше $\frac{1}{10}$ висоти полум'я без шару легкого матеріалу
1	дуже слабке горіння	менше $\frac{1}{10}$ висоти полум'я без шару легкого матеріалу, полум'я охоплює менш $\frac{1}{2}$ поверхні
0	повне загасання полум'я	припинення горіння

Через 2 хвилини поступово засипався порошкоподібний кристалогідрат до моменту повного загасання. Маса гідрофосфату натрію, що засипана, визначалася по різниці початкової маси і його маси після засипання. Основні етапи експерименту ілюстровані на рис. 1.

Після припинення горіння було проведено дослід на повторне займання. Для цього через 1 хвилину після загасання вогнища до поверхні верхнього шару вогнегасного шару підносився факел, що горить. У всіх випадках при цьому спостерігалось тимчасове займання, яке припинялось протягом 5–10 с.

На основі отриманих результатів було розраховано поверхневу вогнегасну витрату ( $\Phi$ ) кристалогідрату гідрофосфату натрію, яка забезпечує гасіння бензину:

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

де  $m$  – маса дрібнодисперсного кристалогідрату гідрофосфату натрію;  $S$  – площа поверхні рідини.

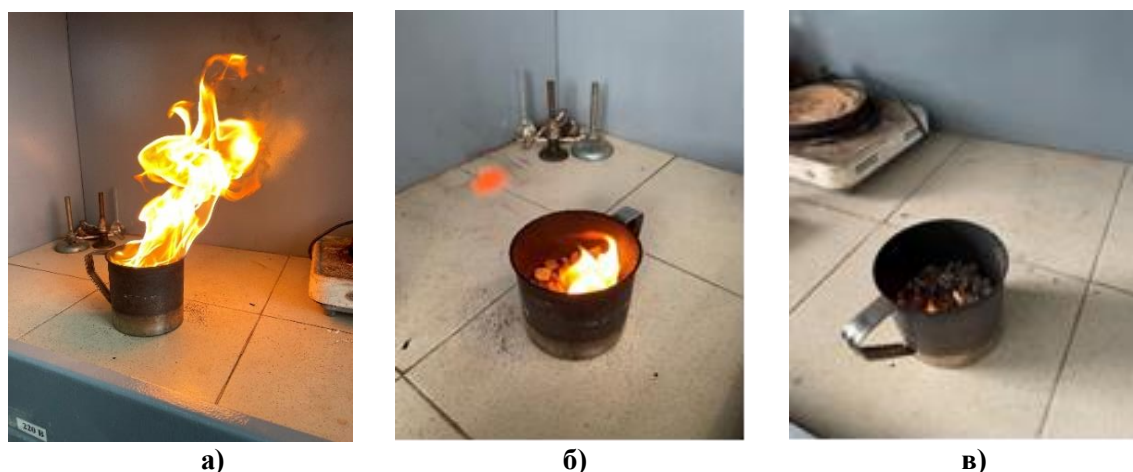


Рис. 1. Етапи проведення експерименту: а) горіння бензину без вогнегасного шару; б) помірне горіння після засипки базового шару піноскла+ 0,5 см перліту; в) поступове загасання після засипання кристалогідрату

Поверхневі витрати порошку гідрофосфату натрію нанесеного на поверхні піноскла, спучених перліту і вермикулітів наведено в табл. 3. Для порівняння наведено результати для інших кристалогідратів [9].

Табл. 3. Поверхневі витрати ( $\Phi$ ) кристалогідратів нанесених на поверхні піноскла, спучених перліту і вермикулітів потрібних для гасіння бензину

Кристалогідрат	Поверхнева витрата порошку, $\Phi$ кг/м <sup>2</sup>			
	Піноскло	Вермикуліт-1	Вермикуліт-2	Перліт
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	0,514	0,304	0,174	0,115
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-	0,533	0,178	0,118
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	-	1,862	2,732	3,003
$\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	-	1,35	0,555	1,508
$\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-	2,825	1,33	2,662
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-	1,236	1,037	1,3
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	-	2,479	1,023	1,121

(-) – гасіння не відбувалось завдяки просипанню порошку крізь шар ППС.

Початковий етап досліджень вогнегасних характеристик двохшарових систем з додатковим нанесенням сипких матеріалів змочених розчином гідрофосфату натрію та покритих тонким шаром кристалогідрату  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  співпадає з відповідними процедурами при нанесенні порошку кристалогідрату. В ємність заливалося 110 мл бензину, який підпалювався. На його поверхню через 2 хвилини вільного горіння наносився базовий шар ППС товщиною 4 см. Після чого через 2 хвилини вільного горіння додатково наносився шар змоченого розчином гідрофосфату натрію або покритого тонким шаром кристалогідрату  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  сипкого матеріалу. Насипання таких матеріалів проводили до моменту припинення горіння бензину. Для кожного матеріалу дослід проводився по три рази. Якщо результати не співпадали, то обирався найбільш гірший результат.

Результати експериментів з додатковим нанесенням сипких матеріалів змочених розчином гідрофосфату натрію та покритих тонким шаром кристалогідрату  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  наведені у табл. 4. Також в таблиці наведені вогнегасні товщини сухих та змочених водою матеріалів [10].

**Табл. 4. Висоти (h), питомі масові витрати гідрофосфату натрію в складі змочених сипких матеріалів і покритих шаром кристалогідратів (Ф) для одержання вогнегасного шару, який нанесено на базовий шар ППС, та відповідні результати для змочених водою і сухих матеріалів**

Сипучі матеріали	Висота, h см	Ф, кг/м <sup>2</sup>
Перліт змочений розчином	0,35	0,049
Перліт покритий	1,1	0,14
Перліт	2	-
Перліт змочений водою	1	-
Вермикуліт-1 змочений розчином	0,3	0,059
Вермикуліт-1 покритий	1,0	0,22
Вермикуліт-1	2	-
Вермикуліт-1 змочений водою	1,5	-
Вермикуліт-2 змочений розчином	0,5	0,066
Вермикуліт-2 покритий	1,2	0,18
Вермикуліт-2	2	-
Вермикуліт-2 змочений водою	1	-

Після погасання бензину досліджувалась можливість повторного займання. Підпалений факел підносився через 1 хвилину після погасання лабораторного модельного вогнища на відстані ~1 см від поверхні верхнього вогнегасного шару легкого матеріалу. У всіх випадках відбувався спалах, але полум'я протягом не більше 10 °С у випадку змочених матеріалів загасало. Якщо порівнювати з результатами сухих матеріалів, то полум'я загасало за однаковий час, а саме не більше 10 сек. Але є виключення змочений у розчині перліт згас за 50–55 сек.

## **6. Обговорення впливу кристалогідратів на вогнегасні властивості бінарних шарів пористих матеріалів**

Під час розгляду результатів експерименту треба прийняти до уваги наступне. Базовий шар на який наноситься сипкий матеріал у всіх випадках однаковий – 4 см ППС. Вогнегасна висота шару сипкого матеріалу, який наноситься на базовий шар різна.

У попередній роботі [9] було встановлено, що введення до складу



вогнегасної системи ряду кристалогідратів шляхом насипання їх порошоків на поверхню легкого сипкого матеріалу суттєво підвищує вогнегасні властивості бінарних шарів пористих матеріалів. Найкращі результати забезпечило використання кристалогідрату  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . За такої самої методикою в теперішній роботі було досліджено кристалогідрат  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . Для нього було отримані трохи кращі по зрівнянню з двоводним кристалогідратом результати (табл. 3).

В цілому можна відмітити, що найменшу вогнегасну здатність проявляють сухі сипкі матеріали. Для всіх досліджених сухих матеріалів верхнього шару для гасіння потрібно нанесення 2 см відповідного матеріалу. Сипкі матеріали, які покриті тонким шаром кристалогідрату і змочені водою показали близькі вогнегасні характеристики. Їх вогнегасні товщини знаходяться в інтервалі 1–1,5 см, що на 0,5–1,0 см краще ніж у сухих зразків. Найкращі результати показали сипкі матеріали змочені розчином гідрофосфату натрію. Їх перевага по зрівнянню зі змоченими водою складає 0,5–0,7 см, а по зрівнянню з сухими матеріалами 1,5–1,7 см.

Якщо порівняти вогнегасні товщини всіх розглянутих матеріалів можна констатувати, що найменшу вогнегасну товщину забезпечує використання вермикуліту-1 змоченого розчином гідрофосфату натрію (0,3 см). Але доцільно розглянути не висоти вогнегасних шарів, а маси вогнегасних речовин. В нашому випадку відсутня проста залежність маси матеріалу від його об'єму, тому що різні сипкі матеріали мають різні насипні щільності та різне вологоутримання. Порівняння мас гідрофосфату натрію, які забезпечили гасіння бензину в разі змочування сипких матеріалів водними розчинами цієї солі, вказують (табл. 4) на найменшу витрату в разі використання в якості сипкого матеріалу спученого перліту. Однак, треба відмітити недолік перліту – частина перліту (~5%) на відміну від двох видів вермикуліту просипається крізь нижній шар ППС.

Більш низькі вогнегасні властивості по зрівнянню зі змоченими сипкими матеріалами показали сипкі матеріали покриті тонким рівномірним шаром  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . Візуальні спостереження вказують, що причиною цього може бути часткове обсіпання кристалогідрату на нижній шар ППС.

Порівняння отриманих результатів з вогнегасними системами в яких кристалогідрат насипався в порошкоподібному стані поверх верхнього шару бінарної вогнегасної системи на основі сипких матеріалів дозволяє зробити висновок, що останній спосіб введення гідрофосфату натрію дає найгірший результат. Цей факт можна пояснити, тим, що такий спосіб подавання не забезпечує рівномірного розподілу гідрофосфату натрію по поверхні верхнього шару сипкого матеріалу. Але треба відмітити недолік способу нанесення просоченого насиченим водним розчином сипкого матеріалу. В такому випадку частинки сипкого матеріалу частково злипаються, що призведе до нерівномірності розподілу його по поверхні.

Візуальні спостереження верхніх шарів сипкого матеріалу після процесу гасіння не вказує на суттєве заповнення порожнин між гранулами в сипких матеріалах кристалогідратом. Це, в свою чергу, дозволяє зробити висновок, що введення кристалогідрату в двошарову вогнегасну систему не призведе до суттєвого збільшення ізолюючих властивостей таких систем. Це вказує на те, що введення гідрофосфату натрію до складу вогнегасної системи приводе до

суттєвого інгібування процесу горіння бензину.

Проведені експериментальні дослідження було проведено на лабораторних модельних вогнищах пожежі класу «В» малих розмірів. Однак 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. Одночасно перехід на більш великі за розміром модельні вогнища потребує розробки інших засобів подавання вогнегасних речовин.

## 7. Висновки

1. Обґрунтовано вибір кристалогідрату  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  у якості сипкого матеріалів, який виявляє високу охолоджуючу здатність, велику флегматизуючу дію, прийнятні температури плавлення та мають в своєму складі іони-інгібітори горіння.

2. Розроблені наступні шляхи введення гідрофосфату натрію до складу вогнегасної системи:

– насипання кристалогідрату  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  в порошкоподібному стані на верхній шар бінарної вогнегасної системи на основі сипких матеріалів;

– введення гідрофосфату натрію шляхом просочення сипкого матеріалу його насиченим водним розчином;

– введення  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  у вогнегасну систему шляхом покриття поверхні сипкого матеріалу тонким шаром кристалічним гідрофосфатом натрію.

3. Експериментально визначено вогнегасні властивості систем на основі бінарних шарів легких сипких матеріалів і гідрофосфату натрію. Найкращі вогнегасні властивості забезпечує просочення спученого перліту у вигляді гранул кулеподібної форми діаметром (1–1,5) мм та спучений вермикуліт у вигляді пластинок двох розмірів 1–2 і 2–5 мм насиченим розчином гідрофосфату натрію. Їх перевага по зрівнянню зі змоченими водою сипкими матеріалами складає 0,5–0,7 см, а по зрівнянню з сухими матеріалами 1,5–1,7 см.

## 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/osflammableorCombustibleLiquidtankStorageFacilities.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. Tauseef S. M., Ramyapriya R., Abbasi T., Abbasi S. A. Models for assessing the spread of flammable liquid spill and their burning. International Journal of Engineering, Science and Mathematics. 2017. Vol. 6. № 8. P. 154–184. URL: [https://www.researchgate.net/publication/322117150\\_Models\\_for\\_assessing\\_the\\_spread\\_of\\_flammable\\_liquid\\_spills\\_and\\_their\\_burning](https://www.researchgate.net/publication/322117150_Models_for_assessing_the_spread_of_flammable_liquid_spills_and_their_burning)

5. Olkowska E., Polkowska Z., Namieśnik J. Analytic sofsur factantsin the

environment: problems and challenges. Chem. Rev. 2011. Vol. 111. № 9. P. 5667–5700. doi: <https://doi.org/10.1021/cr100107g>

6. Дадашов І. Ф. Дослідження властивостей вогнегасної системи на основі піноскла. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2018. Вип. 2(28). С. 39–56. URL: <http://repositcs.nuczu.edu.ua/handle/123456789/8905>

7. 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: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2021-33-18>

8. 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: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-35-22>

9. Szczepaniak R., Woroniak G., Rudzki R. Analysis of Energy Storage Capabilities in Hydrated Sodium Acetate Using the Phase Transitions of the First Kind. Springer Proceedings in Energy. Cham, 2019. P. 1043–1055. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-13888-2\\_100](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13888-2_100)

10. Dadashov I., Kireev A., Kirichenko I., Kovalev A., Sharshanov A. Simulation of the properties two-layer material. Functional Materials. 2018. Vol. 25. № 4. P. 774–779. doi: <https://doi.org/10.15407/fm25.04.1>

*V. Makarenko, Adjunct*

*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

## STUDY OF THE INFLUENCE OF CRYSTAL HYDRATES ON THE FIRE EXTINGUISHING PROPERTIES OF BINARY LAYERS OF POROUS MATERIALS

The effect of crystal hydrates on the extinguishing of flammable liquids using binary layers of light porous materials was studied.  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  was selected as a crystal hydrate that exhibits high cooling capacity, great phlegmatizing effect, acceptable melting temperatures and contains combustion inhibitor ions. Three ways of introducing sodium hydrogen phosphate into the composition of the fire-extinguishing system are proposed: pouring  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  crystalline hydrate in a powdery state on the top layer of a binary fire-extinguishing system based on loose materials; introduction of sodium hydrogen phosphate by impregnation of loose material with its saturated aqueous solution; introduction of  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  into the fire extinguishing system by covering the loose material with a thin layer of crystalline sodium hydrogen phosphate. Crushed foam glass is used as the bottom layer, which ensures the buoyancy of the system. The use of expanded perlite with a granule size of  $1,2 \pm 0,2$  mm and plate vermiculite with a plate size of  $1 \times 2$  and  $2 \times 5$  mm is justified as the top layer with increased insulating properties. On the basis of experimental studies of the influence of sodium hydrogen phosphate on the fire-extinguishing characteristics of binary layers of light porous materials, it was established that the best results were shown by perlite (0,35 cm) soaked in a saturated solution of sodium hydrogen phosphate and vermiculites soaked in the same solution (0,3 cm and 0,5 cm, respectively). Visual observation of the upper layers of the loose material after the quenching process does not indicate significant filling of the cavities between the granules in the loose material with crystal hydrate. This allows us to conclude that the introduction of crystal hydrate into a two-layer fire extinguishing system does not lead to a significant increase in the insulating properties of such systems. Based on this, it was concluded that the introduction of sodium hydrogen phosphate into the composition of the fire extinguishing system leads to a significant inhibition of the process of burning gasoline.

**Keywords:** flammable liquids, binary fireextinguishing system, perlite, vermiculite, foamglass, crystalhydrates

### References

1. Campbell, R. (2014). Fires at Outside Storage Tanks. National fire protection Fire Safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-36-12

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. Tauseef, S. M., Ramyapriya, R., Tasneem, A., Abbasi, S. A. (2017). Models for assessing the spread of flammable liquid spill and their burning. *International Journal of Engineering, Science and Mathematics*, 6(8), 154–184. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/322117150\\_Models\\_for\\_assessing\\_the\\_spread\\_of\\_flammable\\_liquid\\_spills\\_and\\_their\\_burning](https://www.researchgate.net/publication/322117150_Models_for_assessing_the_spread_of_flammable_liquid_spills_and_their_burning)

5. Olkowska, E., Polkowska, Z., Namieśnik, J. (2011). Analytic surfactants in the environment: problems and challenges. *Chem. Rev*, 111(9), 5667–5700. <https://doi.org/10.1021/cr100107g>

6. Dadashov, I. F. (2018). Doslidzhennya vlastyvostry vohnehasnoyi systemy na osnovi pinoskla. *Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy*, 2(28), 39–56. Available at: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/8905>

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

8. Makarenko, V., Kireev, O., Slepuzhnikov, E., Chyrkina, M. (2022). Doslidzhennya vplyvu poroshkiv na vohnehasni kharakterystyky binarnykh shariv porystykh materialiv. *Problems of Emergency Situations*, 1(35), 297–310. <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-35-22>

9. Szczepaniak, R., Woroniak, G., Rudzki, R. (2019). Analysis of Energy Storage Capabilities in Hydrated Sodium Acetate Using the Phase Transitions of the First Kind. *Springer Proceedings in Energy*, 1043–1055. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-13888-2\\_100](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13888-2_100)

10. Dadashov, I., Kireev, A., Kirichenko, I., Kovalev, A. & Sharshanov, A. (2018). Simulation of the properties two-layer material. *Functional Materials*, (25, 4), 774–779. <https://doi.org/10.15407/fm25.04.1>

Надійшла до редколегії: 21.10.2022

Прийнята до друку: 17.11.2022