

## УДК 614.84

*В. С. Макаренко, ад'юнкт (ORCID 0000-0001-5629-1159)*  
*О. О. Кірсев, д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0002-8819-3999)*  
*Є. Д. Слепуженіков, к.т.н., заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-5449-3512)*  
*М. А. Чиркіна, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-2060-9142)*  
*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОРОШКІВ НА ВОГНЕГАСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БІНАРНИХ ШАРІВ ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

Досліджено вплив дисперсних порошоків на гасіння легкозаймистих рідин за допомогою використання бінарних шарів легких пористих матеріалів. Обґрунтовано вибір гранульованого піноскла в якості матеріалу нижнього шару бінарної системи. Для верхнього шару, який виявляє підвищені ізолюючі властивості обрано спучені перліт та вермікуліт. Запропоновано наносити на верхній шар бінарної вогнегасної системи порошоків: піску, меленого тальку, пустотілих скляних мікросфер. Також досліджено використання наступних легкоплавких порошоків кристалогідратів середньої ступені дисперсності: сульфату алюмінію, ацетату натрію, гідрофосфату натрію, натрій-калій винокислого, сульфату цинку та тіосульфату натрію. При цьому зменшується об'єм порожнин цього шару, що призведе до підвищення ізолюючих властивостей вогнегасної системи. Для обраних матеріалів вогнегасної системи визначені: насипна щільність, плавучість, вологоутримання та здатності до заповнення порожнин шару матеріалу, що лежить нижче. Найбільшу плавучість і найменшу насипну щільність бінарної вогнегасної системи забезпечує використання в якості нижнього шару подрібненого піноскла. Найбільше вологоутримання і найменшу здатність до просипання порошоків крізь верхній шар вогнегасної системи забезпечує використання спученого перліту з розміром гранул  $1,2 \pm 0,2$  мм і пластинчастого вермікуліту з розміром пластинок  $2 \times 2,5$  і  $2 \times 5$  мм. На основі дослідження впливу дрібнодисперсних порошоків легкоплавких кристалогідратів на вогнегасні характеристики бінарних шарів легких пористих матеріалів встановлено, що найкращі результати забезпечують застосування кристалогідратів ацетату натрію ( $1,5 \text{ кг/м}^2$ ), гідрофосфату натрію ( $0,12 \text{ кг/м}^2$ ) і сульфату цинку ( $1,3 \text{ кг/м}^2$ ). З останніх найбільш ефективним є кристалогідрат гідрофосфату натрію.

**Ключові слова:** легкозаймисті рідини, бінарна вогнегасна система, перліт, вермікуліт, піноскло, дисперсні порошки, кристалогідрати

### 1. Вступ

Гасіння пожеж класу В є однією з найскладніших задач оперативно-рятувальних підрозділів ДСНС. Цей різновид пожеж згідно зі статистичними даними залишається на високому рівні [1].

Можна виділити декілька різновидів пожеж за участю рідин [2]. До основних можна віднести горіння резервуарів з горючими рідинами, розливів рідин і нафтових фонтанів. Останній вид пожеж має багато особливостей і методи гасіння їх суттєво відрізняються від перших двох.

Цей вид пожеж в роботі не розглядається. В разі гасіння розливів рідин розрізняють два випадки: розлив на поверхню, що просочується та не просочується. У разі розливу на поверхню, що просочується горіння можливе тільки для рідин з низькою температурою кипіння. Гасіння таких пожеж значно більш простіше по зрівнянню з гасінням пожеж, у яких горить товстий шар рідини. В роботі буде розглянуто пожежі у вертикальних резервуарах, де шар рідини може складати від декількох метрів до десятків метрів.

Усі рідини здатні до горіння поділяються на легкозаймисті рідини (ЛЗР) і горючі рідини (ГР). В більшості випадків гасіння ЛЗР викликає більші труднощі, ніж гасіння (ГР). У цій роботі будуть розглянуті пожежі за участю легкозаймис-

тих рідин у резервуарах зі стаціонарним дахом і такий вид розливів, коли на поверхні утворюється товстий шар рідини. Практика пожежогасіння ЛЗР у резервуарах і розливів таких рідин вказує, що часто навіть повне виконання нормативних вимог при гасінні таких пожеж не приводить до позитивного результату [3].

Таким чином, існує проблема низької ефективності існуючих вогнегасних засобів для гасіння легкозаймистих рідин. Актуальним напрямком досліджень є розробка вогнегасних засобів з підвищеними ізолюючими властивостями, що досягається шляхом використання порошків, у тому числі, порошків легкоплавких кристалогідратів.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Не зважаючи на те, що в літературних джерелах можна знайти інформацію про можливість гасіння ЛЗР багатьма відомими засобами пожежогасіння, найбільш ефективним для цих цілей є використання вогнегасних пін [4]. Однак, вони мають ряд суттєвих недоліків, серед яких можна виділити такі: поступове руйнування пін з часом; мала стійкість пін при дії інтенсивних теплових потоків від полум'я палаючої рідини; руйнування пін при контакті з рідинами; унесення пін висхідними конвективними потоками від полум'я палаючих рідин; проблеми існують і з їх подачею на великі відстані. Всі перераховані вище фактори призводять до суттєвого збільшення витрат вогнегасних речовин.

Одним з важливіших загальних недоліків пін є потреба створити умови згасання одночасно над усією площею палаючої рідини в умовах постійного руйнування піни. Якщо над частиною поверхні рідини не забезпечені умови згасання, то над цією ділянкою горіння триває, що в подальшому призведе до поширення горіння над усією поверхнею рідини. Це означає, що для успішного гасіння таких пожеж інтенсивність подавання піни на поверхню рідини повинна перевищувати інтенсивність її руйнування.

Ще одним недоліком пінних засобів гасіння пожеж є наявність у складі піноутворювачів токсичних екологічно небезпечних компонентів [5].

Крім цього висока вартість піноутворювачів знижує їх економічні параметри. В цілому можна зробити висновок, що існуючі технології гасіння пожеж у резервуарах з ЛЗР мають ряд суттєвих недоліків, що вимагає розробки нових більш досконалих методів гасіння пожеж класу В.

Серед нових засобів пожежогасіння горючих рідин можна виділити використання сипучих матеріалів низької щільності, на поверхню яких наноситься шар гелю [6]. В якості сипучого легкого матеріалу було запропоновано використовувати подрібнене піноскло (ПС). Його шар забезпечує плавучість системи піноскло + гель. Для створення на поверхні ПС ізолюючого шару гелю була обрана гелеутворююча система  $\text{CaCl}_2 \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ .

Запропонована вогнегасна система показала кращі результати, ніж пінні засоби пожежогасіння. Перевага запропонованої вогнегасної системи порівняно з пінами обумовлена високою стійкістю шарів піноскла і гелю. Недоліками вогнегасних систем піноскло + гелевий шар є потреба у використанні трьох окремих вогнегасних речовин і трьох окремих засобів їх подачі, а також низькі ізолюючі властивості шару піноскла по відношенню до випарів ЛЗР.

У роботі [7] показано, що для горючих рідин з високою температурою кипіння достатньо використовувати тільки шар піноскла без додаткового нанесення

шару гелю. У разі вуглеводневих ЛЗР гасіння ПС без нанесення шару гелю досягається тільки при великих товщах шару піноскла (~50 см) і гасіння доцільно проводити з додатковим нанесенням шару гелю.

Недоліком запропонованого методу можна вважати, що в цьому випадку гасіння відбувається в разі загальної товщі шару піноскла не меншої 12 см і питомої витрати гелю  $0,2 \text{ г/см}^2$ , що відповідає товщі шару піноскла, що знаходиться вище рівня рідини на 6 см і питомої витрати гелю  $0,2 \text{ г/см}^2$ .

Раніше для гасіння вуглеводневих ЛЗР було запропоновано використовувати бінарні шари піноскла + інший сипучий матеріал [8]. У цій роботі було змінено методику проведення експерименту по зрівнянню з роботами в яких використовувався гелю. Результати з висот вогнегасного шару приводяться для тієї частини шару, що знаходиться вище рівня рідини.

Надалі всі результати будуть наводитися для товщі шару сипучого матеріалу, що знаходиться вище рівня рідини. Перерахунок на загальну товщу шару можна зробити на основі знання плавучості. Результати роботи [8] можна коротко сформулювати таким чином: у випадку використання в якості іншого сипучого матеріалу замість піноскла спучених перліту та вермикуліту висота вогнегасного шару при гасінні бензину зменшується на 4 см. У разі використання змочених сипучих матеріалів ця висота зменшується ще на 1–1,5 см.

Такий ефект пояснюється двома факторами. Перший – пов'язаний з частковим заповненням порожнин у шарі піноскла іншим більш дрібним сипучим матеріалом. Другий фактор – це використання сипучих матеріалів з більшою щільністю укладання [9]. Заповнення порожнин нижнього шару відбувається в разі використання в якості верхнього шару більш дрібного матеріалу, ніж матеріал нижнього шару. Для заповнення порожнин верхнього шару можна використати ще більш дрібний матеріал, ніж матеріал верхнього шару.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є потреба у пошуку сипучих матеріалів, які можна наносити на верхній шар, які за рахунок заповнення порожнин в цьому шарі підвищать його ізолюючі властивості. Такі матеріали повинні бути дрібнодисперсними для того, щоб просипатись в порожнини верхнього шару.

### 3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є експериментальне дослідження впливу нанесення порошоків на верхній шар бінарної вогнегасної системи, яка складається з двох шарів: нижній шар складається з матеріалу, який забезпечує плавучість всієї системи, другий шар з легких сипучих матеріалів, які забезпечують високі ізолюючі властивості. Для цього необхідно вирішити наступні завдання:

1. Обрати сипучі матеріали, що здатні забезпечити високі ізолюючі властивості вогнегасного шару.

2. Провести експериментальне визначення насипної щільності, плавучості, вологоутримання та здатності до заповнення порожнин верхнього шару бінарної вогнегасної системи дисперсними порошками.

3. Експериментально визначити вплив дрібнодисперсних порошоків на вогнегасні характеристики бінарних шарів легких пористих матеріалів. На основі цього провести вибір легких сипучих матеріалів з найкращими вогнегасними властивостями.

#### 4. Вибір сипучих матеріалів, які забезпечують підвищення ізолюючих властивостей

Раніш для одержання вогнегасної системи на основі легких сипучих матеріалів було запропоновано використовувати в якості матеріалу, що забезпечує його плавучість, подрібнене піноскло [8]. Інші матеріали для утворення такого шару не розглядалися. Основною вимогою до матеріалу такого шару є його висока плавучість в ЛЗР. Ця характеристика в більшості випадків не відома і для її визначення потрібне проведення експериментальних досліджень. Але для оцінки плавучості можна використати величину щільності матеріалу і долі відкритих пор у разі використання пористих матеріалів.

Серед матеріалів з малою щільністю розглянемо великотоннажні продукти, що випускаються в державах пострадянського простору: подрібнене піноскло, спучений перліт, спучений вермикуліт, пустотілі скляні мікросфери.

Піноскло (спінене скло, пористе скло) являє собою застиглу спінену скломасу. Його виготовляють шляхом нагрівання силікатних стекол в суміші з газоутворювачем близько 1000 °С. У вигляді блоків використовується в якості теплоізоляційного матеріалу в будівництві, в подрібненому вигляді для отримання легких бетонів. Щільність піноскла 100-600 кг/м<sup>3</sup>, насипна щільність 60-400 кг/м<sup>3</sup>, теплопровідність 0,04-0,08 Вт/(м·К), водопоглинання 0-5 %, температура розм'якшення вище 450 °С.

Піноскло хімічно інертне, має високу екологічну безпечність, є негорючим матеріалом, при тепловому впливі не виділяє дим і токсичні речовини.

Подрібнене піноскло (піноскляний гравій) (рис.1а) зазвичай отримують з бракованих піноскляних блоків. Його гранули мають неправильну форму і розміри від 1 см до 10 см. У даній роботі використовувалося піноскло з двома розмірами гранул (1-1,5) см і (1,5-2,5) см. Особливістю подрібненого піноскла є наявність відкритих пор в зовнішньому шарі і закритих пор у внутрішніх шарах. Це забезпечує його плавучість і суттєве вологоутримання за рахунок проникнення рідини в зовнішні пори. Насипна щільність піноскла залежить від фракційного складу та потребує експериментального визначення.



Рис. 1. Зовнішній вигляд: а) подрібнене піноскло; б) спучений перліт; в) спучений вермикуліт

Спучений перліт (рис.1б) – легкий, сипучий, пористий, вогнестійкий матеріал (до 900 °С). Має високі теплоізоляційні властивості, велику вбираючу здатність. Спучений перліт біологічно стійкий, екологічно безпечний матеріал. Використовується як компонент при виготовленні теплоізоляційних виробів, теплих штукатурок, легких будівельних розчинів, фарб і сухих будівельних сумішей. Насипна щільність складає 140–190 кг/м<sup>3</sup>. До його недоліків відноситься його крихкість, яка призводить до сильного запилення при транспортуванні та засипці. У даній роботі використовувався спучений перліт з гранулами сферичної форми діаметром (1,2±0,2) мм.

Спучений (терморозширений) вермикуліт (рис.1в) – представляє найтонші лусочки, які вільно плавають на поверхні води. Насипна щільність складає 65-290 кг/м<sup>3</sup>, температура плавлення 1350 °С, він біологічно стійкий і хімічно інертний. Спучений вермикуліт використовується в рослинництві для мульчування ґрунту, нормалізації вологості ґрунту (коефіцієнт водопоглинення 400–530 %), поліпшення структури ґрунтів. Має перевагу перед перлітом як компонент теплоізоляційних матеріалів. Завдяки високій термостійкості та низькій теплопровідності він використовується в складі вогнезахисних покриттів. У роботі використовувався спучений пластинчастий вермикуліт з лінійними розмірами пластинок 2×2,5 мм (вермикуліт – 1) і 2×5 мм (вермикуліт – 2).

Пустотілі скляні мікросфери [10] являють собою легкосипкий порошок білого кольору, що складається з пустотілих скляних частинок сферичної форми. Діаметр сфер варіює від 10 до 500 мкм, товщина стінок 2–10 мкм. Насипна щільність може змінюватися в інтервалі 80–700 кг/м<sup>3</sup>, термостійкість може досягати 1000 °С. При тепловій дії не виділяють токсичних газів. Розрізняють пустотілі скляні мікросфери зол теплових електростанцій, які утворюються в топках ТЕС при високотемпературному факельному спалюванні вугілля і штучно отримані з різних видів скла. Їх недоліком є сильне запилювання при пересипанні і транспортуванні у відкритому вигляді.

Виходячи з густини всі запропоновані матеріали (подрібнене піноскло, спучений перліт, спучений вермикуліт, пустотілі скляні мікросфери) можуть бути використані для створення шару, який забезпечує плавучість запропонованої вогнегасної системи. Остаточне рішення може бути прийнято після дослідження плавучості та частки матеріалу, що потонули в ЛЗР.

Для одержання вогнегасної системи на основі сипучих речовин раніш було запропоновано використовувати в якості матеріалів, що забезпечують її високі ізолюючі властивості – спучені перліт та вермикуліт. Ці матеріали наносять на нижній шар матеріалу, який забезпечує плавучість вогнегасної системи. Вони показали більшу ізолюючу здатність по зрівнянню з подрібненим піносклом. Для таких матеріалів вимога мати невелику щільність бажана, але не обов'язкова. Основною вимогою для верхнього шару вогнегасної системи є високі ізолюючі властивості. Такими властивостями будуть володіти матеріали з малою долею порожнин, які утворюються під час засипки [9]. Крім того обов'язковою умовою є відсутність суттєвого просипання крізь нижній шар матеріалу. В якості матеріалів ізолюючого шару розглянемо спучений перліт, спучений вермикуліт, пустотілі скляні мікросфери, будівельний пісок, мелений тальк.

Будівельний пісок в сухому вигляді легкосипучий, інертний, термостійкий матеріал. Розмір піщинок варіюється від 0,1-0,25 мм (дрібнозернистий) до 1–2 мм (грубозернистий). Насипна щільність будівельного піску складає 1300–1500 кг/м<sup>3</sup>,

пористість 37–47 %. Будівельний пісок легкодоступний дешевий матеріал.

Мелений тальк (мікротальк, тальковий порошок) – білий сипучий порошок, частинки тальку мають дуже низьку твердість, середню хімічну і термічну стійкість, щільність становить 2,750 кг/м<sup>3</sup>. Виявляє високі адсорбційні властивості до полярних речовин. Відноситься до 4 класу хімічної небезпеки, використовується в якості компонента косметичних пудр, дитячих присипок, зубних порошоків та в якості харчової добавки (E553b). У разі дрібного помелу тальковий порошок сильно пилить.

Гранульовані цеоліти – природні або синтетичні матеріали підкласу каркасних силікатів здатні оборотно адсорбувати різні речовини. Ці властивості цеолітів дозволяють використовувати їх для цілей адсорбції багаторазово. У роботі було використано гранульовані цеоліти з розміром гранул (3–6) мм.

## 5. Експериментальне визначення фізико-хімічних характеристик вогнегасних матеріалів

Насипна щільність шару сипучого матеріалу визначалася ваговим методом. Для кожного матеріалу проводилось 3 досліди. Відповідні середні значення наведено в табл. 1 піноскло.

Табл. 1. Характеристики легких матеріалів: насипна щільність ( $\rho$ ) плавучість ( $\Pi$ ), частка гранул, що потонула (пот), розмір гранул ( $l$ ) обраних матеріалів і оцінка частки сипучого матеріалу, що просипається крізь шар подрібненого піноскла (просип)

Характеристика	Матеріал							
	піноскло	перліт	верм-1	верм-2	скляні мікросфери	будівельний пісок	мелений тальк	цеоліти
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	96	163	280	182	135	1591	1022	1035
$\Pi$	0,53	0,25	<0,1	0,35	*	0 <	0 <	-
пот, %	2	10	90	10	0	100	100	100
$l$ , мм	10–15	1,2±0,2	2×2,5	2×5	0,05–0,08	0,25–0,50	0,03–0,05	3–5
просип, %	0	5	0	0	64	57	48	0
$V$ , %	34	48	48	66	*	*	*	14

\* – не розраховувалось

У якості характеристики здатності не занурюватися у рідину було використано плавучість ( $\Pi$ ), яка розраховувалася як відношення висоти шару легкого матеріалу, що знаходиться вище рівня рідини ( $h \uparrow$ ) до загальної висоти шару цього матеріалу ( $h_{\text{заг}}$ ):

$$\Pi = \frac{h \uparrow}{h_{\text{заг}}} \quad (1)$$

Для експериментального визначення плавучості сипучих матеріалів в скляний стакан ємністю 2 л заливали 1 л бензину, потім засипали 1 л заздалегідь відміреного об'єму матеріалу. Висоту шару легкого матеріалу, що знаходиться нижче і вище рівня рідини, визначали візуальним методом за допомогою лінійки (рис. 2). Одержані результати наведено в табл. 1. У цьому ж досліді візуальним методом оцінювалась частка, що потонула сипучого матеріалу, яка фіксувалася через 1 годину після засипання матеріалу в рідину (табл. 1).

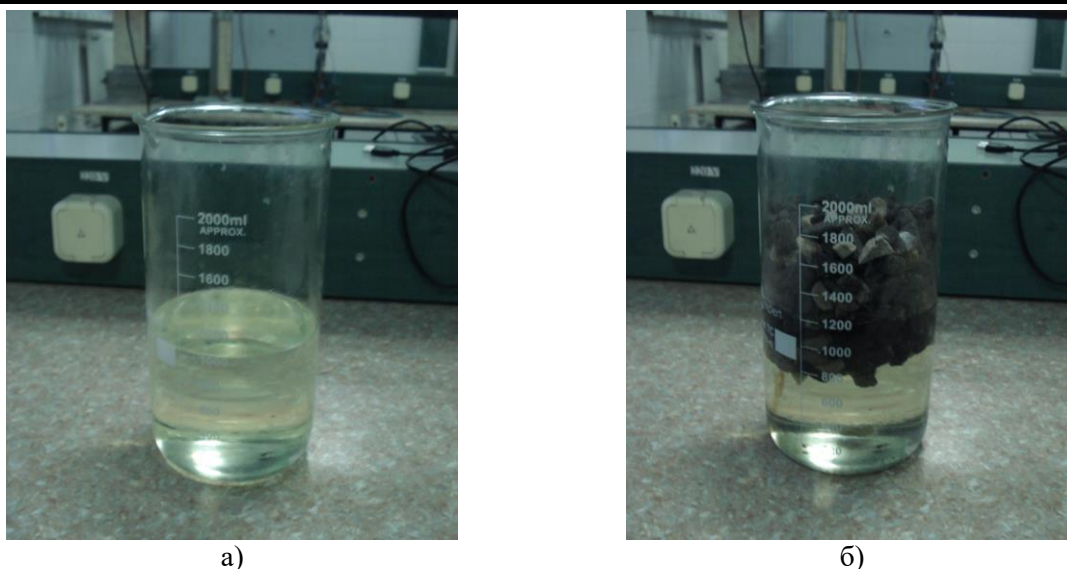


Рис. 2. Дослідження висоти шару легкого матеріалу, що знаходиться нижче і вище рівня рідини: а) стакан з бензином; б) стакан з бензином та сипучим матеріалом

Через змочування бензином всього шару порожніх скляних мікросфер до самого верху візуально встановити рівень рідини в шарі сипучого матеріалу не вдалося. Тому їх плавучість не було розраховано. Візуальні спостереження дозволили встановити, що частка порожніх скляних мікросфер, які потонули, близька до нуля. Крім того, було встановлено, що двох сантиметровий шар цих мікросфер дозволяє утримати на своїй поверхні шар вермикуліту – 1 товщиною 14 мм, а такий же шар подрібненого піноскла утримує шар вермикуліту – 1 товщиною 18 мм. Процедура визначення вологоутримання (В) наведена в роботі [6]. Відповідні результати представлені в табл. 1.

Для визначення здатності до заповнення порожнин того шару, що лежить нижче, були проведені експерименти по засипці таких матеріалів на поверхню нижнього шару. В якості матеріалу нижнього шару на першому етапі було обрано подрібнене піноскло, спучені перліт і вермикуліт. Візуальні спостереження дозволили сформулювати такі висновки: більша частина будівельного піску і скляних мікросфер просипаються крізь шар подрібненого піноскла товщиною 4 см, мелений тальк просипається в меншому ступені (частина тальку налипає на поверхню гранул піноскла), спучений перліт і обидва різновиди терморозширеного вермикуліту заповнюють верхні порожнечі між гранулами і надалі утворюють суцільний шар сипучого матеріалу. Відповідні дані наведено в табл. 1.

У разі використання в якості нижнього шару спучених перліту і вермикуліту просипання не спостерігалось для всіх обраних сипучих матеріалів. Але під вагою верхнього шару сипучого матеріалу відбувалось в 2–3 рази більше притоплення нижнього шару ніж у випадку використання в якості нижнього шару піноскла.

Заповнення порожнин нижнього шару можна здійснити двома шляхами. Перший шлях – засипання на поверхню нижнього шару матеріалу з розміром гранул трохи меншим ніж розмір порожнин в нижньому шарі. Це призведе до потрапляння більш дрібних гранул верхнього шару сипучого матеріалу в порожнини нижнього шару. Другий шлях – засипання на поверхню нижнього шару легкоплавкого матеріалу. Розмір частинок легкоплавкого матеріалу повинен бути таким, щоб не просипатися крізь шар нижнього шару. Після засипки в верхній шар легкоплавкого матеріалу, він під дією полум'я плавиться і в рідкому стані стікає в

порожнини нижнього шару. Якщо нижній шар ще не нагрівся відбувається твердіння розплаву в порожнинах. При цьому зменшується об'єм порожнин нижнього шару, що приведе до підвищення ізолюючих властивостей вогнегасної системи.

Серед легкоплавких матеріалів доцільно обрати такі, що мають невеликі температури плавлення (до 100 °С). Для забезпечення надійної кристалізації розплаву на поверхнях нижнього шару треба щоб температури кристалізації були не нижче 40 °С. Крім того, такі речовини повинні бути не горючими та мати прийнятні екологічні і економічні параметри. Серед твердих речовин таким вимогам відповідають ряд кристалогідратів. Аналіз літератури [11] дозволив обрати такі легкоплавкі кристалогідрати  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ .

## 6. Експериментальне дослідження впливу порошків на вогнегасних характеристик легких матеріалів

У якості кількісної характеристики вогнегасної здатності дрібнодисперсних порошків, було обрано поверхневу витрату цього матеріалу нанесеного на другий шар сипучого матеріалу ( $\Phi$ ), яка викликає гасіння бензину:

$$\Phi = \frac{m}{S}, \quad (2)$$

де  $m$  – маса дрібнодисперсних порошків;  $S$  – площа поверхні рідини.

Поверхнева витрата визначалась гравіметричним методом. Зважування проводились на вагах ТНВ–600, що забезпечило точність вимірювання  $\pm 0,01$  г.

У якості порошків було розглянуто: пісок, тальк, мікросфери і кристалогідрати сульфату алюмінію ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) [12], натрію оцтовокислого ( $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) [13], гідрофосфату натрію ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) [14], калій-натрію виннокислого (сегнетова сіль) ( $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) [15], сульфату цинку ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) [16], тіосульфату натрію ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) [17].

У якості лабораторного модельного вогнища пожежі класу «В» була обрана металева ємність циліндричної форми з діаметром 11,2 см ( $S=98,5$  см<sup>2</sup>) [8]. У цю ємність заливалося 110 мл бензину, що забезпечувало шар рідини в металевій ємності  $\sim 1,1$  см. Після цього бензин підпалювався. Після 3 хв. вільного горіння бензину на його поверхню наносився базовий шар піноскла товщиною 4 см. При цьому рівень рідини піднімався до  $\sim 2$  см від дна металічної ємності. Через 2 хв. горіння наносився шар легкого пористого матеріалу товщиною 0,5 см. У якості легких пористих матеріалів верхнього шару було обрано спучений перліт (пер) з розміром гранул кулеподібної форми ( $1,2 \pm 0,2$ ) мм та спучений вермикуліт у вигляді пластинок двох розмірів  $2 \times 2,5$  мм (верм – 1) і  $2 \times 5$  мм (верм – 2). Після засипки 0,5 см пористого матеріалу спостерігалось помірне горіння (згідно з якісної шкалою інтенсивності горіння [8]).

Ще через 2 хв. після засипки пористого матеріалу поступово засипався дрібнодисперсний порошок до моменту повного загасання полум'я. Маса порошку, що засипано визначалася по різниці початкової маси порошку і його маси після засипання.

Також по наведеної методики проведення експерименту було досліджено вплив сухого льоду (твердий діоксид вуглецю) на гасіння бензину. Сухий лід був у вигляді циліндричних гранул діаметром 0,5 см і довжиною 2–5 см. Візуальні



спостереження дозволили встановити, що час сублимації гранул сухого льоду з поверхні сипучого матеріалу, над поверхнею якого відбувається помірне горіння, перевищує 2 хв. При досягненні вогнегасної поверхневої витрати сухого льоду час погасання складає 1,5 хв.

Після загасання полум'я було проведено дослідження повторного займання лабораторних модельних вогнищ пожежі класу «В». Для цього після 2 хв. після загасання вогнища до поверхні верхнього шару вогнегасного шару підносився факел, що горить. При цьому відбувалась коротко часове займання, яке припинялось протягом 5–10 с. Температури плавлення та поверхневі витрати порошоків нанесених на поверхні спучених перліту і вермикулітів потрібних для гасіння бензину наведено в табл. 2.

**Табл. 2. Температури плавлення ( $T_{пл}$ ) і поверхневі витрати порошоків нанесених на поверхні спучених перліту і вермикулітів потрібних для гасіння бензину**

Кристалогідрат	$T_{пл}$ , °C	Поверхнева витрата порошку, $\Phi$ кг/м <sup>2</sup>		
		Вермикуліт-1	Вермикуліт-2	Перліт
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	86	1,862	2,732	3,003
$NaCH_3COO \cdot 3H_2O$	58	1,35	0,555	1,508
$Na_2HPO_4 \cdot 2H_2O$	60	0,533	0,178	0,118
$KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$	75	2,825	1,33	2,662
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	39	1,236	1,037	1,3
$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	49	2,479	1,023	1,121
Пісок	-	12,692	10	8
Тальк	-	3	2,4	2,2
Мікросфери	-	-	-	1,313
Сухий лід*	-78,5	2,9	2,6	2,7
Перліт**		-	-	2,45
Вермикуліт -1**		4,20	-	-
Вермикуліт -2**		-	2,7	-

\* – температура сублимації

\*\* – гранульовані матеріали нанесені на базовий шар піноскла +0,5 см перліту або вермикуліту без дрібнодисперсного порошку.

## 7. Обговорення результатів дослідження фізико-хімічних і вогнегасних характеристик вогнегасних матеріалів

Аналіз наведених даних дозволяє підтвердити очевидний факт відсутності плавучості будівельного піску і меленого тальку у бензині. Однак, дані за насипною густиною цих матеріалів будуть необхідні при виборі матеріалу верхнього ізолюючого шару бінарної системи.

Найбільшу плавучість бінарної вогнегасної системи забезпечує використання в якості нижнього шару подрібненого піноскла. В такому випадку в якості матеріалу верхнього шару можна використовувати спучений перліт з розміром гранул  $1,2 \pm 0,2$  мм і пластинчастий вермикуліт з розміром пластинок  $2 \times 2,5$  і  $2 \times 5$  мм.

Візуальні спостереження також дозволяють зробити висновок, що просипання сипучого матеріалу крізь інший сипучий матеріал відбувається в разі, якщо розмір порожнин між гранулами матеріалу нижнього шару значно більше ніж розмір частинок верхнього шару. Якщо розміри гранул верхнього шару трохи менше за розміри порожнин нижнього шару просипання не відбувається, а порожнини нижнього шару можуть заповнюватися гранулами верхнього шару. Це призведе до підвищення щільності пакування двох матеріалів.

Це в свою чергу може призвести до підвищення ізолюючих властивостей двошарового ізолюючого шару і тим самим до підвищення вогнегасних властивостей бінарного шару сипучих матеріалів при гасіння ЛЗР.

Таким чином, можна зробити висновок, що в якості нижнього шару, який забезпечує плавучість вогнегасної системи треба обрати подрібнене піноскло, а в якості верхнього ізолюючого шару доцільно використовувати спучений перліт з розміром гранул  $1,2 \pm 0,2$  мм і пластинчастий вермикуліт з розміром пластинок  $2 \times 2,5$  і  $2 \times 5$  мм. Крім того, для підвищення ізолюючих властивостей верхнього ізолюючого шару доцільно на цей шар провести засипання дрібнодисперсних порошків, в тому числі кристалогідратів з температурами плавлення в інтервалі температур 40-100 °С.

У табл. 2 наведені результати експериментальних досліджень. Поверхневі витрати дрібнодисперсних порошків відносяться до їх нанесення на базовий шар піноскла (4 см) + 0,5 см вермикуліту – 1, або вермикуліту – 2, або перліту (3–5 стовпчики табл.2).

Співставлення поверхневих витрат дрібнодисперсних на гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі класу В дозволяє констатувати, що високоплавкі дрібнодисперсні матеріали (пісок, мелений тальк, пустотілі скляні мікросфери) суттєво поступаються по вогнегасним властивостям легкоплавким кристалогідратам ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ). З високоплавких дрібнодисперсних матеріалів найгірші вогнезахисні властивості показав пісок, який має найменшу дисперсність.

Низькі вогнегасні властивості обраних високоплавких порошків пояснюються відсутністю у них інгібуючих властивостей, малим вологоутриманням, великою щільністю та високою здатністю просипатися крізь нижні шари ПС. Крім того їх охолоджуючі властивості обумовлені тільки теплоємністю складовою.

Переваги порошків кристалогідратів по зрівнянню з високоплавкими матеріалами обумовлені такими факторами:

- вони мають набагато більшу охолоджуючу здатність, яка включає такі складові, високу теплоту плавлення кристалогідрата, високу теплоємність водного розчину та високу теплоту випарування води з водного розчину;
- випарування води обумовлює флегматизуючу дію кристалогідратів;
- легкоплавкі кристалогідрати виявляють високі ізолюючі властивості, завдяки тому, що вони під дією полум'я плавляться і в рідкому стані стікають в порожнини нижнього шару, де відбувається твердіння розплаву в порожнинах, при цьому зменшується об'єм порожнин нижнього шару;
- обрані кристалогідрати вміщують у своєму складі інгібітори горіння (катиони натрію та калію і фосфат іони).

У табл. 2 також наведено розраховані на основі даних роботи [8] величини питомих витрат гранульованих матеріалів на базовий шар піноскла (4 см) + 0,5 см вермикуліту – 1 або вермикуліту – 2, або перліту (3–5 стовпчики табл. 2). Порівняння цих даних з отриманими в цій роботі дозволяє зробити висновок, що порошки кристалогідратів мають суттєву перевагу в вогнегасних властивостях перед нанесенням тільки перліту або обох вермикулітів.

Найкращі результати з усіх кристалогідратів одержані для гідрофосфату натрію, що пов'язано з наявністю в його складі двох іонів, які виявляють інгібуючі властивості (катион натрію і фосфат аніон).

Чисельні результати в цій роботі отримано на лабораторних модельних вогнищах пожежі класу «В» малого розміру потребують подальшого уточнення на

стандартних модельних вогнищах. Для цього можна обмежитись тільки вогнегасними системами, які показали найкращі результати по результатам цієї роботи.

## 8. Висновки

1. У якості сипучих матеріалів здатних підвищити ізолюючі властивості бінарного вогнегасного шару піноскло + інший гранульований матеріал обрано ряд легкоплавких кристалогідратів, дрібний пісок, мелений тальк, пустотілі скляні мікросфери та гранульований цеоліт. До сипучих матеріалів було встановлено такі вимоги: хімічна інертність, термічна стійкість, мала насипна щільність, велике вологоутримання, здатність заповнювати порожнини нижнього шару сипучого матеріалу, прийнятні економічні та екологічні характеристики. Частина цих матеріалів заповнюють порожнини нижнього шару шляхом просипання. Легкоплавкі кристалогідрати під час термічного впливу плавляться і в рідкому стані стікають в порожнини нижнього шару, де відбувається твердіння розплаву в порожнинах.

2. Для обраних порошків визначенні насипна щільність, плавучість, вологоутримання та здатності до заповнення порожнин шару того матеріалу, що лежить нижче. На основі цього можна зробити висновок, що в якості нижнього шару, який забезпечує плавучість вогнегасної системи треба обрати подрібнене піноскло, а в якості верхнього ізолюючого шару доцільно використовувати спучений перліт з розміром гранул  $1,2 \pm 0,2$  мм і пластинчастий вермикуліт з розміром пластинок  $2 \times 2,5$  і  $2 \times 5$  мм. Для підвищення охолоджуючих властивостей верхнього шару бінарної системи на основі пористих матеріалів доцільно проводити змочування спученого перліту і вермикуліту.

3. Експериментально визначено вплив порошків на вогнегасні характеристики бінарних шарів легких пористих матеріалів. На основі цього зроблено висновок, що порошки високоплавких матеріалів слабо впливають на вогнегасні характеристики. Порошки кристалогідратів з температурою плавлення ( $39-76$ ) °C підвищують вогнегасні властивості бінарних шарів пористих матеріалів від 1,5 до 35 разів. Найбільше підвищення вогнегасних характеристик бінарних шарів сипучих матеріалів забезпечує використання кристалогідратів натрію оцтовокислого, гідрофосфату натрію, калій-натрій виннокислого. З останніх найбільш ефективним є гідрофосфат натрію, який забезпечує підвищення вогнегасних властивостей до 35 разів.

## 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. Tauseef S. M., Ramyapriya Ramesh, Tasneem Abbasi, Abbasi S. A. Models for assessing the spread of flammable liquid spills 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)

4. Lang X.-q., Liu Q.-z., Gong H. Study of Fire Fighting System to Extinguish Fire Safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-35-22

Full Surface Fire of Large Scale Floating Roof Tanks. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 11. P. 189–195. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811008344>

5. Olkowska E., Polkowska Z., Namieśnik J. Analytics of surfactants in the environment: problems and challenges. *Chem. Rev.* 2011. Vol. 111. № 9. P. 5667–5700. doi: 10.1021/cr100107g

6. Дадашов І. Ф., Трегубов Д. Г., Сенчихін Ю. М., Кіреєв О. О. Напрямки вдосконалення гасіння пожеж нафтопродуктів. *Науковий вісник будівництва*. 2018. Т. 94. № 4. С. 238–249. URL: <https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol28/4dadashev.pdf>

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

8. 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. URL: <http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/33/18.pdf>

9. 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: 10.15407/fm25.04.1

10. Chen Z., Huang Z. X., Jiang B. Y. Syntactic Foam Prepared with Glass Hollow Spheres of Designed Size and Wall Thickness Ratio. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1061–1062. P. 129–132. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1061-1062.129

11. 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: 10.1007/978-3-030-13888-2\_100

12. Kahlenberg V., Braun D. E., Krüger H., Schmidmair D., Orlova M. Temperature and moisture-dependent studies on alunogen and the crystal structure of meta-alunogen determined from laboratory powder diffraction data. *Physics and Chemistry of Minerals*. 2016. Vol. 44. № 2. P. 95–107. doi: 10.1007/s00269-016-0840-7

13. Beaupere N., Soupremanien U., Zaleski L. Influence of Water Addition on the Latent Heat Degradation of Sodium Acetate Trihydrate. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. № 2. P. 484. doi: 10.3390/app11020484

14. Dannemand M., Johansen J. B., Furbo S. Solidification behavior and thermal conductivity of bulk sodium acetate trihydrate composites with thickening agents and graphite. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016. Vol. 145. P. 287–295. doi: 10.1016/j.solmat.2015.10.038

15. High solubility crystalline hydrates of Na and K furosemide salts / U. B. Rao Khandavilli et al. *CrystEngComm*. 2014. Vol. 16. № 22. P. 4842–4852. doi: 10.1039/C3CE42347F

16. Saha J., Podder J. Crystallization Of Zinc Sulphate Single Crystals And Its Structural, Thermal And Optical Characterization. *Journal of Bangladesh Academy of Sciences*. 2012. № 35(2). P. 203–210. doi: 10.3329/jbas.v35i2.9426

17. Safety data sheet. Sodium Thiosulfate, 5-hydrate, Crystal, USP/EP/BPJP. Columbus Chemical Industries. 2018. URL: <https://www.columbuschemical.com/MSD-S/SDS/Sodium%20Thiosulfate,%205-hydrate,%20Crystal,%20USP%20EP%20BP%20JP%205471.pdf>

*V. Makarenko, Adjunct*

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

*E. Slepuzhnikov, PhD, Deputy Head of Department*

*M. Chirkina, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*

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

## INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF POWDERS ON FIRE EXTINGUISHING CHARACTERISTICS OF BINARY LAYERS OF POROUS MATERIALS

The influence of dispersed powders on quenching of flammable liquids by means of use of binary layers of light porous materials is investigated. The choice of granular foam glass as a material of the lower layer of the binary system is substantiated. Exfoliated perlite and vermiculite were chosen for the upper layer, which exhibits increased insulating properties. It is proposed to apply powders on the upper layer of the binary fire extinguishing system: sand, ground talc, hollow glass microspheres. The use of the following low-melting powders of crystal hydrates of medium degree of dispersion was also investigated: aluminum sulfate, sodium acetate, sodium hydrogen phosphate, sodium potassium acid, zinc sulfate and sodium thiosulfate. This reduces the volume of the cavities of this layer, which will increase the insulating properties of the fire extinguishing system. For the selected materials of the fire extinguishing system are defined: bulk density, buoyancy, moisture retention and ability to fill the cavities of the layer of material below. The highest buoyancy and the lowest bulk density of the binary fire extinguishing system is provided by the use of crushed foam glass as the bottom layer. The use of expanded perlite with a granule size of  $1,2 \pm 0,2$  mm and lamellar vermiculite with a plate size of  $2 \times 2,5$  and  $2 \times 5$  mm ensures the highest moisture content and the lowest ability to spill powders through the upper layer of the fire extinguishing system. Based on the study of the effect of fine powders of low-melting crystal hydrates on the fire-extinguishing characteristics of binary layers of light porous materials, it was found that the best results provide the use of crystal hydrates of sodium acetate ( $1,5 \text{ kg/m}^2$ ), sodium hydrogen phosphate ( $0,12 \text{ kg/m}^2$ ) and zinc sulfate ( $1,3 \text{ kg/m}^2$ ). Of the latter, sodium hydrogen phosphate crystal hydrate is the most effective.

**Keywords:** flammable liquids, binary fire extinguishing system, perlite, vermiculite, foam glass, dispersed powders, crystal hydrates

### References

1. Campbell, R. (2014). Fires at Outside Storage Tanks. National fire protection association. <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Data-research-and-tools/Building-and-Life-Safety/Fires-at-Outside-Storage-Tanks>
2. Hylton, J. G., Stein, G. P. (2017). U.S. Fire Department Profile. National Fire Protection Association. <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics/Fire-service/osfdprofile.pdf>
3. Tauseef, S. M., Ramyapriya, R., Tasneem, A., Abbasi, S. A. (2017). Models for assessing the spread of flammable liquid spills and their burning. International Journal of Engineering, Science and Mathematics, 6(8), 154–184. [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)
4. 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. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811008344>
5. Olkowska, E., Polkowska, Z., Namieśnik, J. (2011). Analytics of surfactants in the environment: problems and challenges. Chem. Rev., 111(9), 5667–5700. <https://doi.org/10.1021/cr100107g>
6. Dadashov, I. F., Trehubov, D. H., Senchykhin, Y. M., Kiryeyev, O. O. (2018). Napryamky vdoskonalennya hasinnya pozhezh naftoproduktiv. Naukovyy visnyk budivnytstva, 94(4), 238–249. <https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol28/4dadashev.pdf>

7. Dadashov, I. F. (2018). Doslidzhennya vlastyivostey vohnehasnoyi systemy na osnovi pinoskla. Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy, 2(28), 39–56. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/8905>
8. Makarenko, V. S., Kiryeyev, O. O., Tregubov, D. G., Chyrkina, M. A. (2021). Doslidzhennya vohnehasnykh vlastyivostey binarnykh shariv lehkykh porystykh materialiv. Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy, 1(33), 235–245. <http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/33/18.pdf>
9. 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>
10. Chen, Z., Huang, Z. X., Jiang, B. Y. (2014). Syntactic for prepared with glass hollow spheres of designed size and wall thickness ratio. Advanced Materials Research, 1061–1062, 129–132. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1061-1062.129>
11. 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. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-13888-2\\_100](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13888-2_100)
12. Kahlenberg, V., Braun, D. E., Krüger, H., Schmidmair, D., Orlova, M. (2016). Temperature- and moisture-dependent studies on alunogen and the crystal structure of meta-alunogen determined from laboratory powder diffraction data. Physics and Chemistry of Minerals, 44(2), 95–107. <https://doi.org/10.1007/s00269-016-0840-7>
13. Beaupere, N., Soupremanien, U., Zalewski, L. (2021). Influence of Water Addition on the Latent Heat Degradation of Sodium Acetate Trihydrate. Applied Sciences, 11(2), 484. <https://doi.org/10.3390/app11020484>
14. Dannemand, M., Johansen, J. B., Furbo, S. (2016). Solidification behavior and thermal conductivity of bulk sodium acetate trihydrate composites with thickening agents and graphite. Solar Energy Materials and Solar Cells, 145, 287–295. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.10.038>
15. Rao, Khandavilli, U. B., Gangavaram, S., Rajesh Goud, N., Cherukuvada, S., Raghavender, S., Nangia, A., Manjunatha, S. G., Nambiar, S., Pal, S. (2014). High solubility crystalline hydrates of Na and K furosemide salts. CrystEngComm, 16(22), 4842–4852. <https://doi.org/10.1039/C3CE42347F>
16. Saha, J., Podder, J. (2012). Crystallization Of Zinc Sulphate Single Crystals And Its Structural, Thermal And Optical Characterization. Journal of Bangladesh Academy of Sciences, 35(2), 203–210. <https://doi.org/10.3329/jbas.v35i2.9426>
17. Safety data sheet. (2018). Sodium Thiosulfate, 5-hydrate, Crystal, USP/EP/BPJP. Columbus Chemical Industries.

Надійшла до редколегії: 19.04.2022

Прийнята до друку: 15.06.2022