

Р. А. Петухов, ад'юнкт ад'юнктури (ORCID 0000-0002-0414-2546)
О. О. Кіреєв, д.т.н., доцент, проф. каф. (ORCID 0000-0002-8819-3999)
Є. Д. Слепужніков, к.т.н., викл. каф. (ORCID 0000-0002-5449-3512)
О. В. Савченко, к.т.н., с.н.с., заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-1305-7415)
С. М. Шевченко, викл. каф. (ORCID 0000-0002-6740-9252)
В. В. Дейнека, к.т.н., доц. каф. (ORCID 0000-0002-5781-7092)
 Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЧАСУ ІСНУВАННЯ ПІН ШВИДКОГО ТВЕРДНЕННЯ

Проведено дослідження часу існування пін швидкого тверднення (ПШТ) отриманих на основі гелеутворюючої системи $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ (9 % р-н) + NaHCO_3 (9 % р-н). Встановлено шляхи підвищення стійкості піни. Експериментальним шляхом визначено тип додаткових хімічних сполук які підвищують характеристики стійкості піни швидкого тверднення. Встановлено, що додавання таких речовин як гліцерин, полівініловий спирт та карбоксиметилцелюлоза (КМЦ) призводить до часткового або значного підвищення часу існування пін швидкого тверднення. В ході експериментальних досліджень встановлено склад гелеутворюючої системи для отримання піни швидкого тверднення з високим часом існування. Такою системою є $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ (9 % р-н) + NaHCO_3 (9 % р-н) + КМЦ (0,5% об.) + піноутворювач «Морський» (6% об.) Встановлено, що підвищення концентрації КМЦ негативно впливає на рухомість піни швидкого тверднення та її кратність. Так, в системі без КМЦ кратність отриманої піни була близько 14, а в системі з додаванням 0,5 % КМЦ кратність різко зменшилась приблизно в 2,5 рази та стала дорівнювати 6. Додавання 1 % КМЦ призводить до утворення піни кратністю 3. При спробі отримати піну з розчинів в яких масова частка КМЦ була 1,5 та 2 % відбувалось утворення низьократною піни (< 2) неоднорідної структури. При цьому знижувалась рухомість піни, що призводило багатократного зниження її здатності до розтікання по поверхні рідини. Експериментально встановлено, що підвищення стійкості ПШТ шляхом додавання до складу піноутворюючої системи водорозчинного плівкоутворювача (КМЦ) призводить до утворення твердої плівки яка забезпечує підвищення міцності твердого каркасу гелю. Одночасно тверда плівка може забезпечити підвищення ізолюючих властивостей піни.

Ключові слова: піна швидкого тверднення, карбоксиметилцелюлоза, гелеутворення, час існування піни, гелеутворююча система, гелеутворювач, каталізатор гелеутворення

1. Вступ

Усього в Україні функціонує понад 1810 об'єктів промисловості, на яких зберігається або використовується у виробничій діяльності більше 283 тис. тонн небезпечних хімічних речовин (НХР).

Ці об'єкти розподілені за ступенями хімічної небезпеки:

- 1 ступеню хімічної небезпеки (у зонах можливого хімічного зараження від кожного з них мешкає більше 75 тис. осіб) – 76 об'єктів;
- 2 ступеню хімічної небезпеки (у зонах можливого хімічного зараження від кожного з них мешкає від 40 до 75 тис. осіб) – 60 одиниць;
- 3 ступеню хімічної небезпеки (у зонах можливого хімічного зараження від кожного з них мешкає менше 40 тис. осіб) – 1134 одиниць;
- 4 ступеню хімічної небезпеки (зони можливого хімічного зараження від кожного з них не виходять за межі об'єкту) – 540 одиниць.

Всього у зонах можливого хімічного зараження від цих об'єктів мешкає близько 17 млн. осіб (40,5% від всього населення країни) [1].

Майже на кожному третьому підприємстві у тій чи іншій мірі порушуються правила складування та зберігання НХР. Основними недоліками, які спостерігаються на цих підприємствах, є відсутність або пошкодження обвалування навколо резервуарів та ресиверів, відсутність резервних ємностей, відсутність або несправність аварійних насосів, незахищеність ємностей від блискавки та прямої дії сонячних променів [1].

Більшість НХР складають рідини. Обороти деяких з них складає тисячі тон (бензол, толуол, метанол та ін.) [2]. Досить часто виникають аварійні ситуації які призводять до розливу рідких НХР. На початковому етапі таких аварій основну небезпеку представляють пари таких рідин.

В зв'язку з вище наведеним, актуальною проблемою є удосконалення засобів ізоляції поверхні пролітої НХР.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Процес випаровування токсичних рідин призводить до забруднення атмосфери і навколишнього середовища та створює небезпечну ситуацію. Існує декілька методів уповільнення випаровування з поверхні розливої НХР [3]. Основним способом є використання повітряно-механічних пін (ПМП)[4]. Основні недоліки використання ПМП це низька стійкість та слабка ізолююча здатність [5]. Про це також свідчать результати досліджень проведених в роботі [6]. Дослідження показали, що стійкість ПМП дорівнює 20 ± 5 хв. Це говорить про те, що під час локалізації надзвичайної ситуації (НС) необхідна буде не однократна повторна подача ПМП на поверхню пролітої НХР.

Як альтернатива ПМП, в якості ізолюючого засобу запропоновано використовувати піни швидкого тверднення (ПШТ). В літературі зустрічається багато прикладів щодо дослідження ПШТ та пропонування їх як в якості перспективного ізолюючого засобу так і засобу для пожежогасіння [8]. Для отримання піни автори в якості гелеутворювача використовують рідке скло $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ як каталізатор гелеутворення використовують агресивні та небезпечні хімічні речовини такі як оцтова кислота (CH_3COOH), соляна кислота (HCl) або амонію хлорид (NH_4Cl), які безпосередньо або продукти реакції яких відносяться до 3-го класу небезпеки [9]. Також на відміну від ізолюючих матеріалів, для цілі пожежогасіння вирішальними є інші критерії, такі як здатність піни розтікатися по поверхні горючої рідини, охолоджуючий ефект та ін. Автори [7] пропонують застосовувати ПШТ як засіб ізоляції поверхні токсичної рідини від випаровування. Для 15 НХР різної токсичності, в лабораторних умовах було досліджено процес випаровування через шар ПШТ. Недоліком розглянутого методу є використання у складі компонентів системи агресивних хімічних сполук та багатокомпонентність системи.

В [5] було досліджено стійкість ПШТ в часі на основі шести ГУС (табл. 1).

Табл. 1. Стійкість піни швидкого тверднення з концентраціями компонентів гелеутворюючих систем (ω_1) і (ω_2)

№	Перший компонент	Другий компонент	ω_1 , %	ω_2 , %	Стійкість ПШТ, год
1	$\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$	NaHCO_3	9	9	15
2	$\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	6	7,5	12
3	$\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$	NH_4Cl	6	5	5
4	$\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$	NaH_2PO_4	6	5	10
5	$\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	6	5,5	8
6	$\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$	$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	6	16	9

У всіх розглянутих випадках втрата текучості відбувалась за рахунок утворення силікагелю в плівках піни, протягом 0,5-1,5 хвилин. Такий час втрати є прийнятним для практичного утворення та подавання піни на поверхню рідини.

Процес руйнування ПШТ відрізняється від відповідного процесу для ПМП. Для останніх руйнування відбувається в основному за рахунок поступового потоншення плівок піни за рахунок стікання води під дією гравітаційних сил. В ПШТ

руйнування відбувається за рахунок випарування води з гелевих шарів. Це призводить до сушіння гелю та усадки гелевих шарів, що призводить до їх розтріскування та обсипання. Останній процес відбувається набагато повільніше ніж процес стікання рідини з плівок піни. В якості кількісної характеристики стійкості ПШТ було прийнято час до утворення наскрізних тріщин для пін товщиною 5 см. Дослідження показали, що ПШТ отримана з компонентів системи №1 виявляє найбільшу стійкість. Час до перших ознак руйнування такої піни складав 5-6 годин. Утворення наскрізних тріщин у піні відбувалось через 15 годин.

Проте в деяких випадках даної стійкості може бути недостатньо для забезпечення тривалої ізоляції пролітої НХР, тому невирішеною частиною проблеми є покращення характеристик стійкості піни швидкого тверднення.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є розробка рецептур для утворення пін швидкого твердіння з підвищеним часом існування.

Для досягнення поставленої мети потребують вирішення наступні завдання:

1. Розробка рецептури для утворення пін швидкого тверднення з підвищеним часом існування.
2. Експериментально дослідити кількісні характеристики стійкості запропонованих рецептур для утворення пін швидкого тверднення.

4. Матеріали та методи дослідження піни швидкого тверднення

Раніше було запропоновано використовувати ПШТ для ізоляції від випарування НХР [5]. Після проведених дослідів було зроблено висновок про ефективність використання ПШТ в якості ізолюючого засобу. Час існування таких матеріалів можна варіювати в межах від декількох годин до декількох діб в залежності від компонентів системи та товщини шару піни. Також в процесі дослідження часу існування ПШТ з'ясувалося, що час їх існування можливо збільшити шляхом додавання хімічних сполук до системи. Відомо, що для підвищення часу існування повітряно-механічних пін до складу піноутворювача додають водорозчинні полімери [11]. Такі полімери суттєво підвищують в'язкість робочих розчинів піноутворювачів, що призводить до зменшення швидкості стікання рідини з плівок піни. Це, в свою чергу, забезпечує підвищення часу існування піни.

У випадку запропонованих ПШТ цей механізм підвищення стійкості піни не є суттєвим, тому що рідина в пінних плівках утримується твердим каркасом гелю. Руйнування ПШТ відбувається за рахунок випарування води. В результаті сушки піни відбувається її усадка яка призводить до розтріскування піни. Для підвищення стійкості ПШТ можна запропонувати два шляхи. Один з них додавання до складу піноутворюючої системи гіроскопічної малолетучої речовини. З урахування сумісності компонентів піноутворюючої системи в якості такої речовини було запропоновано гліцерин. Другий шлях підвищення стійкості ПШТ додавання до складу піноутворюючої системи водорозчинного плівкоутворювача. В разі висихання така речовина може утворити тверду плівку яка забезпечить підвищення міцності твердого каркасу гелю. Одночасно тверда плівка може забезпечити підвищення ізолюючих властивостей піни. Серед таких водорозчинних плівкоутворювачів було розглянуто карбоксиметилцелюлозу (КМЦ) та полівініловий спирт.

5. Розробка рецептури пін швидкого тверднення з підвищеним часом існування

Попередні досліди вказали на те, що додавання гліцерину, КМЦ і полівінілового спирту підвищує стійкість ПШТ. В найбільшій ступені стійкість ПШТ пі-

двищує додавання КМЦ. Тому наступні лабораторні дослідження були обмежені системою $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + \text{NaHCO}_3 + \text{КМЦ}$.

Карбоксиметилцелюлоза (КМЦ) – похідна целюлози, в якій карбоксиметильна група ($-\text{CH}_2-\text{COOH}$) з'єднується гідроксильними групами глюкозних мономерів [12].

До системи $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + \text{NaHCO}_3$ додавали КМЦ в кількостях, що забезпечують її масовий вміст в системі в межах від 0 до 2 % з інтервалом 0,5 %. Таким чином було отримано 5 систем з якими були проведені лабораторні дослідження.

Робочі розчини гелеутворювача та каталізатора гелеутворення готувалися об'ємним методом. Додавання КМЦ до системи проводилося наступним чином. Спочатку були приготовлені робочі розчини, а потім в обидва розчини додавали КМЦ так щоб масова частка її в розчині була 2 %. Так як розчинення КМЦ це тривалий процес робочі розчини залишили на 2 доби та періодично їх помішували. Після повного розчинення КМЦ шляхом розбавлення готували 1,5, 1 та 0,5 % розчини КМЦ.

Результати дослідів показали що додавання 0,5 та 1 % КМЦ до системи $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + \text{NaHCO}_3$ призводить до значного загущення та збільшення в'язкості компонентів системи. А додавання 1,5 та 2 % КМЦ призводить до утворення дуже в'язкої та майже не текучої системи, що ускладнює та навіть унеможлиблює процес формування ПШТ.

Зі всіма зразками були проведені подальші дослідження. Було приготовлено вихідні розчини компонентів системи $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2(9\%) + \text{NaHCO}_3(9\%)$ з додаванням піноутворювача «Морський» (6%) та КМЦ (0-2 %). Описаним в попередніх роботах способом [6] було отримано ПШТ яку подано на плоску горизонтальну тверду поверхню. Далі проводили спостереження за поведінкою ПШТ у часі. Результати спостережень представлені на рис. 1.

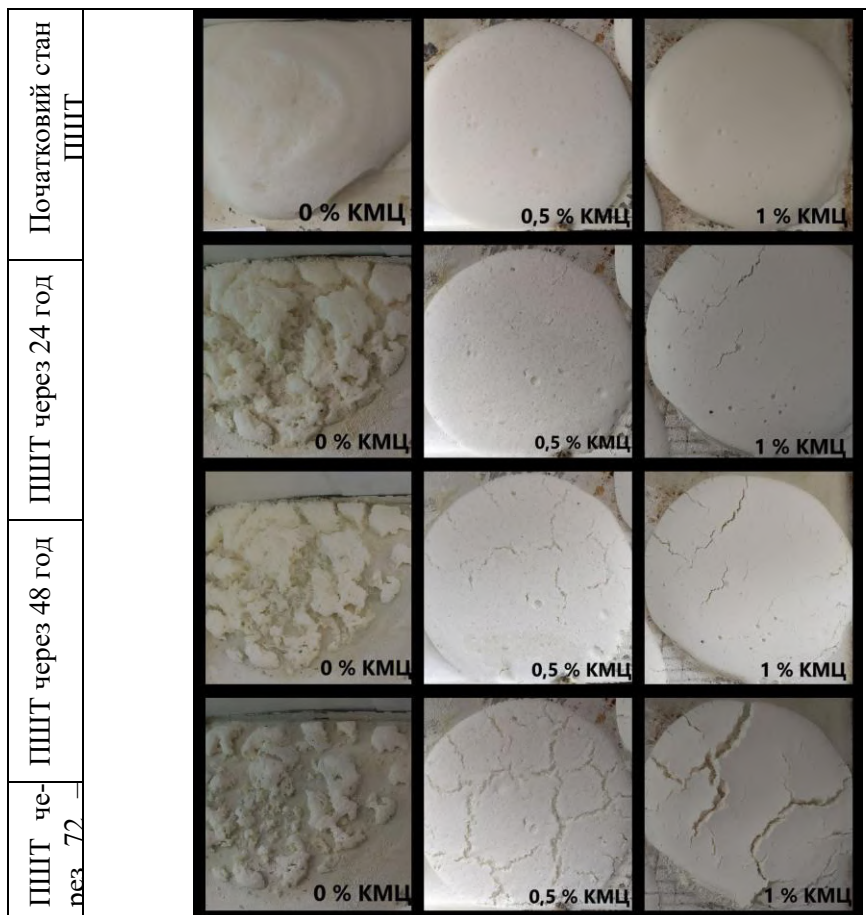


Рис. 1. Результати досліджень стійкості ПШТ

6. Дослідження кількісних характеристик стійкості запропонованих рецептур пін швидкого тверднення

Проведені дослідження показали, що зі збільшенням концентрації КМЦ у системі кратність піни значно зменшувалась. Так в системі без КМЦ кратність отриманої піни була близько 14, а в системі з додаванням 0,5 % КМЦ кратність різко зменшилась приблизно в 2,5 рази та стала дорівнювати 6, додавання 1 % КМЦ призводить до утворення піни кратністю 3, а при спробі отримати піну з розчинів в яких масова частка КМЦ була 1,5 та 2 % відбувалось утворення низьократною піни (< 2) неоднорідної структури. Кратність піни – це відношення об'єму піни до об'єму рідини, з якого вона отримана [10]. Кратність розраховувалася за допомогою стандартної методики наступним шляхом. Вихідні розчини готувались таким чином щоб їх загальний об'єм дорівнював 100 см³. Вихідні сполуки поміщалися до подрібнювача тканин РТ-1 та відбувалось їх спінювання шляхом увімкнення приладу на 30 с. Після чого проводилася фіксація висоти отриманої піни.

Далі проводилися спостереження за поведінкою ПШТ у часі. Результати вимірювань представлені в табл. 2.

Табл. 2. Характеристика піни швидкого тверднення з додаванням КМЦ

	Масовий вміст КМЦ у ПШТ (ω , %)				
	0	0,5	1	1,5	2
К	14	6	3	< 2	< 2
τ_1 , год	5	16	20	26	32
τ_2 , год	8	30	24	31	37
τ_3 , год	15	96	48	42	40
τ_4 , год	24	120	82	72	68
D, %	30	1<	5	10	15

де К – кратність піни; τ_1 – час появи перших ознак руйнування поверхневого шару піни; τ_2 – час появи неглибоких тріщин при поверхневому шарі піни; τ_3 – час появи перших тріщин на всю глибину; τ_4 – час після якого не відбувається зміна стану піни; D – доля відкритої поверхні на кінцевій стадії руйнування.

Також були проведені дослідження утворення звичайної повітряно-механічної піни із вмістом 0,5 і 1,0 % КМЦ. Дослідження показали, що час існування таких пін дещо підвищується у порівнянні зі звичайною повітряно-механічною піною, а саме у 2-3 рази, але через 3-4 години така піна повністю руйнується.

7. Обговорення результатів дослідження піни швидкого тверднення

Досліджено додавання до піноутворюючої системи додаткової речовини яка за своїми фізико-хімічними характеристиками здатна підвищити стійкість ПШТ. В першому випадку такою речовиною було обрано гігроскопічну малолетучу речовину – гліцерин (C₃H₈O₃). Додавання її до системи дало незначний позитивний результат. Стійкість ПШТ зросла у 1,5-2 рази порівняно з ПШТ без додавання гліцерину. Наступні речовини, обрані в якості додаткового компоненту піноутворюючої системи, та які виступають в якості водорозчинного плівкоутворювача – карбоксиметилцелюлоза (КМЦ) та полівініловий спирт (C₂H₄O)_x. Додавання полівінілового спирту до ПУС також незначно підвищує стійкість ПШТ – в 1,5-2 рази. У разі додавання КМЦ до ПУС стійкість ПШТ зросла на порядок, тому з цією речовиною було проведено більш детальні дослідження.

Дослідження показали, що з п'яти досліджуваних ПШТ найкращий результат показала система з додаванням 0,5 % КМЦ. Зміна стану піни спостерігалася протягом 4-6 діб, далі змін не відбувалося. Тривалість існування такої піни складала більше 5 тижнів що майже на порядок більше ніж ПШТ без додавання КМЦ.

Збільшення концентрації КМЦ у системі призводить до зменшення кратності піни та ускладнює процес її отримання через значну в'язкість вихідних речовин. Важливо відмітити, що зі збільшенням концентрації КМЦ до 1,0 % піна що утворилася на початковому етапі проявляє найкращі результати стійкості але через деякий час починає стрімко втрачати характеристики стійкості, про що свідчать утворення розривів та тріщин через весь шар піни у той час коли піна з меншою концентрацією КМЦ (0,5 %) має тріщини лише на поверхневому шарі.

Піна без КМЦ вже через 24 години пронизана глибокими тріщинами по всій площі в той же час піна з 0,5 та 1 % КМЦ має лише початкові ознаки руйнування поверхневого шару (висихання поверхні піни та дрібні тріщини).

Після остаточного висихання доля відкритої поверхні піни без КМЦ складає 30 % а через 1-2 доби 80-90 % за рахунок розсіпання залишків піни. На відміну від першої піни з додаванням КМЦ остаточно висихає через 2-3 доби а потім її поверхня не потерпає змін. Відповідно доля відкритої поверхні залишається постійною і складає 0-15 %. Цей факт дає змогу зробити висновок, що така піна матиме кращі ізолюючі властивості так як інтенсивність випаровування залежить від площі відкритої поверхні рідини.

8. Висновки

1. Розроблено рецептуру для утворення пін швидкого тверднення з підвищеним часом існування. Встановлено, що для підвищення стійкості ПШТ можна запропонувати два шляхи. Один з них додавання до складу піноутворюючої системи гігроскопічної малолетучої речовини. З урахування сумісності компонентів піноутворюючої системи в якості такої речовини було запропоновано гліцерин ($C_3H_8O_3$). Додавання гліцерину до ПУС незначно вплинуло на час існування ПШТ, а саме стійкість піни збільшилась у 1,5-2 рази. Другий шлях підвищення стійкості ПШТ – додавання до складу піноутворюючої системи водорозчинного плівкоутворювача. В разі висихання така речовина утворює тверду плівку яка забезпечить підвищення міцності твердого каркасу гелю. Одночасно тверда плівка може забезпечити підвищення ізолюючих властивостей піни. Серед таких водорозчинних плівкоутворювачів було розглянуто карбоксиметилцелюлозу та полівініловий спирт. Додавання полівінілового спирту до ПУС також незначно підвищує стійкість ПШТ – в 1,5-2 рази. Серед всіх запропонованих речовин найкращі характеристики стійкості піни показала КМЦ. Стійкість ПШТ зросла більше ніж на порядок порівняно з ПШТ без додавання КМЦ.

2. Експериментально досліджено кількісні характеристики стійкості запропонованих рецептур для утворення пін швидкого тверднення. Дослідження піноутворюючих систем показало, що додавання 0,5 % КМЦ призводить до утворення ПШТ з найбільшою стійкістю. Таким чином встановлено оптимальну піноутворюючу систему: $Na_2O \cdot nSiO_2$ (9 % р-н) + $NaHCO_3$ (9 % р-н) + КМЦ (0,5% об.) + піноутворювач «Морський» (6% об.). Зміни в такій піні відбувалися на протязі 3-4 діб, після чого змін не спостерігалось. Доля відкритої поверхні після остаточного висихання піни складає менше 1 %, що свідчить про збільшення міцності каркасу піни за рахунок утворення плівки на поверхні каркасу гелю. Час існування такої піни перевищує 5 тижнів. Цей показник на порядок більше ніж у ПШТ без додавання КМЦ. Таким чином дослідження показали, що система $Na_2O \cdot nSiO_2$ (9 % р-н) + $NaHCO_3$ (9 % р-н) + піноутворювач «Морський» (6% об.) може застосовуватися для локалізації НС де час ізоляції обмежується однією добою. Система $Na_2O \cdot nSiO_2$ (9 % р-н) + $NaHCO_3$ (9 % р-н) + КМЦ (0,5% об.) + піноутворювач «Морський» (6% об.) можна застосовувати для ізоляції пролітої НХР від 5 діб.

Література

1. Козаченко Т. І. Геоінформаційне картографування техногенних загроз від потенційно небезпечних об'єктів. Вісник геодезії та картографії, 2012. №1(76). 14–25.
2. Jiang-hua ZHAN, GabLai-jun ZHAO, Risk Analysis of Dangerous Chemicals Transportation // Systems Engineering - Theory & Practice, 2007. №27. P. 117–122.
3. Peter I. Kawamura, Donald Mackay. The evaporation of volatile liquids // Journal of Hazardous Materials, 1987. №15. P. 343–364.
4. Defence Standard 42–40, Foam Liquids, Fire Extinguishing (Concentrates, Foam, Fire Extinguishing), UK Ministry of Defence, 2002. №2.
5. Pietukhov R., Kireev A., Slepuzhnikov E., Chyrkina M., Savchenko A. Lifetime research of rapid-hardening foams // Problems of emergency situations, 2020. № 31. P. 226–233.
6. Петухов Р. А., Кіреєв О. О., Слепужніков Є. Д. Дослідження часу втрати текучості гелеутворюючих систем $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,5\text{SiO}_2 + \text{NH}_4\text{Cl}$ та $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,5\text{SiO}_2 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, які запропоновано використовувати для одержання ізолюючих пін // Проблеми надзвичайних ситуацій, 2019. № 30. С. 155–163.
7. Gennady N. Kuprin, Denis S. Kuprin. Fast-Hardening Foam: Fire and Explosion Prevention at Facilities with Hazardous Chemicals // Journal of Materials Science Research, 2017.V ol. 6. № 4. P. 56–61.
8. Denis S. Kuprin. Physical–chemical explanation of fire-fighting efficiency of FHF (fast-hardening foam) based on structured silica particles // Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2017. № 81. P. 36–41.
9. Hazard Classification Guidance for Manufacturers, Importers, and Employers. Occupational Safety and Health Administration U.S. Department of Labor // OSHA 3844-02. 2016. P. 406–419.
10. Vladimir Moskvitin, Dmitry Moskvitin, Natalia Emelyanova, Optimization of the foam generation regime in a cylindrical channel // International Scientific Conference “Investment, Construction, Real Estate: New Technologies and Special-purpose Development Priorities”, 2018. № 212. P. 1–8.
11. Youjie Sheng, Shouxiang Lu, Ning Jiang, Xiujuan Wu, Changhai Li. Drainage of aqueous film-forming foam stabilized by different foam stabilizers // Journal of Dispersion Science and Technology, 2018. № 39. P. 1266–1273.
12. Maryam Karimi, M. R. Naimi-Jamal. Carboxymethyl cellulose as a green and biodegradable catalyst for the solvent-free synthesis of benzimidazoloquinazolinone derivatives // Journal of Saudi Chemical Society, 2019. № 23. P. 182–187.

R. Pietukhov, Cadet

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

E. Slepuzhnikov, PhD, Lecturer of the Department

A. Savchenko, PhD, Senior Researcher, Deputy Head of Department

S. Shevchenko, Lecturer of the Department

V. Deineka, PhD, Associate Professor of the Department

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

INCREASING LIFETIME OF THE RAPID-HARDENING FOAM

A study of the lifetime of rapid-hardening foams (RHF) obtained on the basis of the gel-forming system $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ (9% solution) + NaHCO_3 (9% solution) was performed. Ways to increase the stability of the foam have been identified. The type of additional chemical compounds that increase the stability characteristics of the rapid-hardening foams has been determined experimentally. It was found that the addition of substances such as glycerin, polyvinyl alcohol and carboxymethylcellulose (CMC) leads to a partial or significant increase in the lifetime of rapid-hardening foams. In the course of experimental studies, the composition of the gelling system for obtaining rapid-hardening foams with a high lifetime was established. Such a system is $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$

(9 % solution) + NaHCO₃ (9 % solution) + CMC (0,5% vol.) + foaming agent «Morskoy» (6% vol.). It was found that increasing the concentration of CMC negatively affects the mobility of rapid-hardening foams and its multiplicity. Thus, in the system without CMC the multiplicity of the obtained foam was about 14, and in the system with the addition of 0.5% CMC the multiplicity sharply decreased by about 2,5 times and became equal to 6. The addition of 1% CMC leads to the formation of foam multiplicity 3. When trying to obtain foam from solutions in which the mass fraction of CMC was 1,5 and 2%, the formation of low multiplicity foam (<2) of inhomogeneous structure. At the same time, the mobility of the foam decreased, which led to a multiple decrease in its ability to spread on the surface of the liquid. It has been experimentally established that increasing the stability of RHF by adding a water-soluble film former (CMC) to the foaming system leads to the formation of a solid film which increases the strength of the solid gel framework. At the same time, the hard film can increase the insulating properties of the foam.

Keywords: rapid-hardening foam, carboxymethylcellulose, gel formation, foam lifetime, gel-forming system, gel-forming agent, gel-forming catalyst

References

1. Kozachenko, T. I. (2012). Geoinformacijne kartografuvannya tekhnogennih zagroz vid potencijno nebezpechnih objektiv. *Visnik geodezii ta kartografiji*, 1 (76), 14–25.
2. Jiang-hua ZHAN, GabLai-jun ZHAO. (2007). Risk Analysis of Dangerous Chemicals Transportation. *Systems Engineering – Theory & Practice*, 27, 117–122.
3. Peter, I. Kawamura, Donald Mackay. (1987). The evaporation of volatile liquids // *Journal of Hazardous Materials*, 15, 343–364.
4. Defence Standard 42–40. (2002). Foam Liquids, Fire Extinguishing (Concentrates, Foam, Fire Extinguishing), UK Ministry of Defence, 2.
5. Pietukhov, R., Kireev, A., Slepuzhnikov, E., Chyrkina, M., Savchenko. A. (2020). Lifetime research of rapid-hardening foams // *Problems of emergency situations*, 31, 226–233.
6. Pietukhov, R. A., Kireev, O. O., Slepuzhnikov, E. D. (2020). Doslidzhennya chasu vtrati tekuchosti geleutvoryuyuchikh sistem Na₂O · 2,5SiO₂ + NH₄Cl ta Na₂O 2,5SiO₂ + (NH₄)₂SO₄, yaki zaproponovano vikoristovuvati dlya oderzhannya izolyuyuchikh pin. *Problemi nadzvichaynih situatsiy*, 30, 155–163.
7. Gennady, N. Kuprin, Denis, S. Kuprin. (2017). Fast-Hardening Foam: Fire and Explosion Prevention at Facilities with Hazardous Chemicals. *Journal of Materials Science Research*, 6, 56–61.
8. Denis, S. Kuprin. (2017). Physical–chemical explanation of fire-fighting efficiency of FHF (fast-hardening foam) based on structured silica particles. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 81, 36–41.
9. Hazard Classification Guidance for Manufacturers, Importers, and Employers. Occupational Safety and Health Administration U.S. Department of Labor. (2016). OSHA 3844-02, 406–419.
10. Vladimir Moskvitin, Dmitry Moskvitin, Natalia Emelyanova. (2018). Optimization of the foam generation regime in a cylindrical channel // *International Scientific Conference “Investment, Construction, Real Estate: New Technologies and Special-Purpose Development Priorities”*, 212, 1–8.
11. Youjie Sheng, Shouxiang Lu, Ning Jiang, Xiujian Wu, Changhai Li. (2018). Drainage of aqueous film-forming foam stabilized by different foam stabilizers // *Journal of Dispersion Science and Technology*, 39, 1266–1273.
12. Maryam Karimi, M. R. Naimi-Jamal. (2019). Carboxymethyl cellulose as a green and biodegradable catalyst for the solvent-free synthesis of benzimidazoloquinazolinone derivatives // *Journal of Saudi Chemical Society*, 23, 182–187.

Надійшла до редколегії: 13.04.2020

Прийнята до друку: 22.04.2020