

*І.Ф. Дадашов, к.т.н., доцент (ORCID 0000-0002-1533-1094)
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОГНЕГАСНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ПІНОСКЛА

Досліджено вогнегасні властивості засобу гасіння пожеж класу «В» на основі піноскла, порівняно з використанням вогнегасних пін. Показано, що ефективно пожежогасіння пінами досягається лише у разі застосування перфторованих піноутворювачів. Акцентовано увагу, що такі піноутворювачі відносяться до жорстких та заборонені для широкого використання. Запропоновано вимоги до сучасного засобу гасіння пожеж класу В: плавучість на горючих рідинах, негорючість, висока ізолююча здатність, екологічна безпека, стійкість до розкладання на пожежі, інертність до рідини, що горить. Показано, що таким вимогам відповідає вогнегасна система з плавучого шару піноскла та ізолюючого шару негорючого гелю, але властивості цієї системи вивчено не достатньо. Комплексно розглянуто ізолюючі, охолоджуючі та пов'язані з ними властивості піноскла та гелю. Доведено, що вогнегасні властивості даної системи базуються на плавучості піноскла. Визначено, що краще співвідношення між плавучістю, ізолюючою та несучою здатністю піноскла реалізується для фракції 1-1,5 см. Встановлено, що у рідинах ряду алканів плавучість піноскла у сухому стані становить 0,36–0,58, у вологому – 0,21–0,4. Показано, що за допомогою піноскла в означеній системі можна реалізувати три режими гасіння: моношаром піноскла (для гасіння бензину товщина шару – 50 см); достатнім шаром піноскла, який витримує ізолюючий шар гелю 0,7 мм (для гасіння бензину товщина шару – 15 см); мінімальним шаром піноскла – 12 см, який дозволяє завершити гасіння мінімальною витратою подачі гелеутворюючої системи – 0,2 г/см². Отримані результати дозволяють регулювати процес гасіння пожеж класу «В1» за допомогою вогнегасних систем на основі піноскла та забезпечують ефективний результат гасіння та відсутність негативного впливу на навколишнє середовище.

Ключові слова: пожежа класу В, горюча рідина, бензин, пожежогасіння, піна, піноскло, неорганічний гель, моношар, бінарний шар, витрата, ізоляція

1. Вступ

Пожежа є неконтрольованим процесом горіння, який створює небезпечні фактори для людського життя, матеріальних цінностей та екологічного стану навколишнього середовища. Гасіння пожеж є складним багатофакторним процесом. Значні проблеми на теперішній час виникають при пожежогасінні рідин. Однією з невирішених проблем використання, транспортування та зберігання горючих рідин є відсутність надійних та екологічних засобів гасіння. За умови необхідності гасіння пожеж класу «В» в залежності від водорозчинності рідини, що горить, виникає потреба вирішення різних питань, тому розрізняють пожежі класів «В1» та «В2» (водонерозчинні та водорозчинні, відповідно). Особливості пожеж класу «В1» (у першу чергу нафтопродуктів) визначають більшу увагу, яка приділяється у сфері пожежогасіння до вирішення цієї проблеми. До основних факторів, які формують такий стан питання, можна віднести велику теплоту згоряння нафтопродуктів та великі обсяги обертання у виробничому циклі й громадському використанні. Пожежі класу «В1» часто характеризуються катастрофічними наслідками внаслідок важких умов для пожежогасіння, що призводить до найбільшої тривалості серед пожеж, що не поширюються, не зважаючи на залучення великої кількості сил та засобів для пожежогасіння. Таке становище викликає великі матеріальні та екологічні збитки і може призводити до загибелі людей. Більша частина номенклатури нафтопродуктів належить до класу легкозаймистих рідин з температурою спалаху до 61 °С [1]. Рідкі нафтопродукти є складною багатокомпонент-

ною колоїдною системою. При цьому можна зауважити, що навіть незначна домішка легкозаймистих рідин до горючих (температура спалаху більша за 61 °С), значно зменшує температуру спалаху суміші. Тобто, пожежна нафтопродуктів визначається вмістом легких фракцій.

На будь-якому етапі обертання горючих рідин у технологічних процесах ймовірно виникнення пожежі. Для гасіння пожеж класу «В» розроблені методики використання різних видів вогнегасних засобів: інгібіруючих, охолоджуючих, розбавлюючих та ізолюючих [2]. подача розпорошеної води в об'єм полум'я реалізує охолоджуючий механізм пожежогасіння. подача вогнегасних порошоків загального призначення, аерозольних засобів та хладонів в об'єм полум'я при горінні рідин створює ефект інгібірування. подача твердої вуглекислоти реалізує комбінований механізм припинення горіння, який полягає в охолоджуючій дії на першому етапі та розбавлюючій – на другому. Але на практиці описані методи гасіння пожеж класу «В» забезпечують ефективний результат лише для відносно малих значень площі горіння. Таке становище визначається тим, що для реалізації пожежогасіння необхідно створити вогнегасну концентрацію (порошку, аерозолю, хладону, розпорошеної води або негорючого газу) водночас над всією поверхнею, що горить, інакше після припинення подачі вогнегасного засобу горіння майже відразу встановлюється на тій самій площі, що і до початку гасіння. Для великих значень «дзеркала» рідини таку умову досягти важко, що реалізується лише за надвеликої інтенсивності подачі вогнегасного засобу, яка повинна. Більш того, вогнегасну концентрацію необхідно підтримувати протягом часу, необхідного для охолодження поверхні рідини й огорожуючих конструкцій з метою попередження повторного запалювання пароповітряної суміші. Тобто поверхню рідини необхідно охолодити до температури меншої за температуру спалаху, полум'я – до температури меншої за температуру погасання, металеві конструкції – до температури меншої за температуру самоспалахування. Дану умову реалізувати на практиці важко, особливо для низькокиплячих рідин (пентан, ацетон, діметиловий ефір та інші). Таким чином, наведені вище методи пожежогасіння можна застосовувати лише для висококиплячих рідин, малих площ пожежі або на початковій стадії пожежі.

На сучасному етапі розвитку засобів гасіння пожеж класу «В» доведено, що найбільшу ефективність застосування мають повітряно-механічні піни [2]. Такі піни у разі накопичення ізолюючого шару знижують концентрацію пари рідини у повітряній суміші за рахунок дифузійних ускладнень до безпечних значень. До останнього часу застосування пін для масштабних пожеж класу «В» також було малоефективним [3, 4]. Так, за умови подачі піни за допомогою пінних стволів та піногенераторів спостерігається багато труднощів при спробі подачі на поверхню рідин, що визначається віднесенням конвекційними потоками та руйнуванням під дією різних факторів [5, 6]. Розташування будь-яких технічних засобів для рішення цих проблем у межах зони можливого вибуху або розвинутого полум'я характеризується низькою надійністю.

Сучасні розробки у напрямку гасіння пожеж класу «В» спрямовані на зниження руйнування пін. Результатом таких робіт стало створення плівкоутворюючих систем на основі перфторованих сполук, що дозволяє припинити горіння рідин у більшості випадків [7]. Перфторовані піноутворювачі характеризуються низьким поверхневим натягом, що зумовлює можливість подачі у вигляді піни як «зверху», так і крізь шар рідини без змішування та утримувати на поверхні ізолюючий шар «легкої води» [8]. Шар «легкої води» ізолює надійніше за саму піну.

Але під дією полум'я руйнуються й випаровують і такі засоби, що гальмує процес гасіння на великій площі. Недоліками підшарової подачі перфорованих пін також є емульгування піноутворювача, що заважає виходу на поверхню і збільшує час гасіння [9] та необхідність застосування підвищених тисків до 1 МПа.

На підставі наведених даних впливає, що підвищення ефективності та екологічності гасіння пожеж класу В є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Гасіння пожеж класу В досліджене з застосуванням більшості охолоджуючих, ізолюючих, розбавлюючих та інгібіруючих засобів, але доведено, що ефективне гасіння, особливо для великих площ горіння, досягається лише за умови застосування вогнегасних пін [2].

Але для усіх пінних засобів пожежогасіння можна відмітити наступні загальні недоліки гасіння пожеж класу «В» [10]: деструкція пін під дією випромінювання полум'я та внаслідок контакту з горючими рідинами або конструктивними елементами; необхідність охолодження вільних бортів резервуара компактними струменями води; екологічна небезпека багатьох компонентів піноутворювачів; необхідність очищення рідин після гасіння від піноутворювача. Саме токсичність, не екологічність та стійкість до мікробіологічного розкладання перфторвмісних піноутворювачів обмежує широке використання за сучасних вимог, які дозволяють використовувати лише біологічно «м'які» піноутворювачі 3-4 класу небезпеки [11]. Спроби адаптації перфторвмісних піноутворювачів до даних вимог не ліквідують повною мірою означену небезпеку та знижують ефективність пожежогасіння. Спроби створення нових екологічних й ефективних піноутворювачів поки не дали істотних результатів [12], і питання гасіння пожеж класу В залишається не вирішеним.

Як показано, основне протиріччя для існуючих пінних засобів пожежогасіння, яке потребує вирішення, полягає між екологічними й вогнегасними властивостями. З проведеного аналізу випливає, що існує вільна область щодо розробок вогнегасного засобу для гасіння пожеж рідин, який повинен мати водночас високу ефективність та добрі екологічні характеристики. Тим не менш можна стверджувати, що ізоляція поверхні випаровування є найбільш ефективним прийомом гасіння пожеж класу «В». Узагальнюючи позитивні риси пінних засобів пожежогасіння можна відмітити, що у будь-якому випадку піни створюють плавучий ізолюючий шар на поверхні рідини, який зменшує концентрацію пари у повітрі до значення меншого за нижню концентраційну межу поширення полум'я [1].

Означене становище дозволяє сформулювати завдання на розробку нового засобу гасіння пожеж рідин: засіб для гасіння рідин повинен бути плавучим, негорючим, добре ізолюючим, екологічно безпечним, стійким до розкладання в часі, при контакті з конструктивними елементами, за умови дії агресивних речовин та теплового впливу, та повинен не змішуватись з рідиною, що горить.

Відомі дослідження ізолюючих властивостей шару крупнодисперсного піноскла, а також шару неорганічного гелю, стосовно гальмування процесів випаровування та горіння рідин [13-16]. Пошук речовин з бажаними властивостями виявив декілька твердих матеріалів, які, в першу чергу, мають плавучість та негорючість [13]. Враховувалось, що зернистий твердий матеріал погано ізолює, тому він повинен утримувати на зовнішній поверхні масу певного ізолюючого шару, наприклад гелю. В даній роботі показано, що з точки зору достатньої плавучості твердого матеріалу на легкокиплячих рідинах з врахуванням його несучої спро-

можності, уявна густина плавучого матеріалу повинна бути меншою за $286 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$. Проаналізовано властивості спученого перліту та вермікуліту, піноскла, пемзи, керамзиту, газо- та пінобетону. Найкращу плавучість у воді в часі серед них (і, відповідно, наявність закритих пор) показали керамзит та піноскло. В роботі визначено, що керамзит має густину ($\approx 500 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$) більшу за рекомендовану ($286 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$), тому найкращим плавучим матеріалом виявилось піноскло ($\approx 120 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$).

Ізолюючі властивості піноскла по відношенню до горючих та легкозаймистих рідин досліджені в роботі [14]. Так, шар піноскла товщиною 4,5 см сповільнює інтенсивність випаровування бензину (легкозаймиста рідина) в 1,4 рази, 13,5 см – в 5,6 разів. Частина піноскла, яка занурюється в рідину, охолоджує поверхню, що також гальмує горіння. Крім того, піноскло екранує прогрів рідини від випромінювання полум'я, що посилює означений ефект. Попередні дослідження виявили, що найбільшу ізолюючу здатність за умови горіння горючих рідин має піноскло фракції 1–1,5 см [15].

Відоме застосування гелю, як ізолюючого засобу для гальмування випаровування рідин. Наприклад, за умови одночасної подачі двох водних розчинів, які реагують з утворенням осаду, може утворитися гель, після чого на твердих поверхнях закріплюється гелевий шар неорганічного складу [16]. В даній роботі встановлено, що за шар гелю товщиною 1,4 мм, який сформовано на сітці над рідиною, гальмує випаровування горючих та легкозаймистих рідин у 30 разів, за наявності вітру цей ефект в декілька разів більший.

Оскільки за дослідними даними і піноскло, і неорганічний гель має ізолюючі властивості по відношенню до парів горючих та легкозаймистих рідин, існує можливість завершення гасіння пожежі класу В шляхом подачі на піноскло гелеутворюючої системи та утворення ізолюючого вогнегасного шару. Можливість пожежогасіння рідин такою системою доведено в роботі [17]. На лабораторному осередку пожежі класу "В" (металева ємність з діаметром 11,2 см та $S_{\text{гор}}=98,5 \text{ см}^2$) отримано ефект припинення горіння бензину.

Однак процес випаровування, вигорання рідин й гасіння такої пожежі залежать від співвідношення розмірів резервуара. Аналітичну залежність впливу розмірів резервуару на випаровування рідин отримано в роботі [18]. Наприклад, масова швидкість вигорання бензину зростає за умови збільшення діаметру резервуару до 1,2 м, а далі залишається майже незмінною. Також, швидкість вигорання залежить від розміру вільного борта.

Проведений аналіз показав, що у напрямку підвищення ефективності та екологічності гасіння пожеж класу В за допомогою вогнегасних систем на основі піноскла існує ряд не вирішених питань: перевірка даних, отриманих на лабораторному осередку, в умовах стандартних модельних осередків більших розмірів. Також на даний момент не визначено ряд важливих питань щодо мінімально достатніх умов для гасіння пожеж класу В з використанням вогнегасних систем на основі піноскла, а саме: режими гасіння пожеж особливо небезпечних легкозаймистих рідин (які мають температуру спалаху менше $28 \text{ }^\circ\text{C}$ [1]) лише за рахунок піноскла; режими гасіння пожеж класу В бінарним вогнегасним шаром з піноскла та гелю. Спільне використання гелю та піноскла може оптимізувати витрату для досягнення повного припинення горіння.

Таким чином, не вирішеною частиною проблеми гасіння пожеж класу В є відсутність даних щодо загальної ізолюючої здатності вогнегасної системи на основі піноскла з використанням негорючих гелів.

3. Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є визначення ізолюючих характеристик вогнегасної системи, яка складається з піноскла та негорючого гелю, для гасіння пожеж класу В. Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

експериментально дослідити процес припинення горіння за рахунок ізоляції моношаром піноскла поверхні випаровування легкозаймистих та горючих рідин; дослідити ефективність пожежогасіння бінарною вогнегасною системою на основі піноскла.

4. Матеріали та методи дослідження ізолюючих властивостей вогнегасної системи на основі піноскла

Піноскло широко відоме, як теплоізоляційний матеріал [19-21]. Серед теплоізоляційних матеріалів піноскло є найбільш ефективним за сукупністю технічних характеристик, оскільки має низьку теплопровідність $0,04\div 0,05 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{К}^{-1}$, відносно високу міцність – до 1 МПа, інертність до води, луг, кислот, незначну уявну густину, негорючість та необмежений термін служби, екологічну й гігієнічну безпеку [22]. Виробляють формоване, гранульоване піноскло та крихту. Для цілей гасіння пожеж класу «В» доцільно використовувати гранульоване піноскло або крихту. Перше з них має гарантовано закриті зовнішні пори, але має більшу густину ніж крихта. Тому саме крихта піноскла, як відхід виробництва, використана нами для дослідів з пожежогасіння. Типові властивості піноскла: густина – $120 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, кислотостійкість > 99 %, термічна стійкість (початок розм'якшення) – $400\div 450 \text{ }^\circ\text{C}$, відкрита пористість ~ 50 %, розміри пор $0,5\div 3,5 \text{ мм}$, водопоглинання ~ 40 % [23].

У літературі відсутні дані по плавучості та рідинопоглинанню піноскла для горючих рідин. Прямий розрахунок плавучості за густиною рідин та піноскла неможливий, оскільки крихта піноскла має відкриті зовнішні пори, заповнення яких рідинами важко врахувати. Тому у якості кількісної характеристики плавучості (П) було обране відношення висоти шару піноскла, що перебуває над рівнем рідини до загальної висоти шару піноскла

$$П = \frac{h_{із}}{h_{заг}} = \frac{h_{із}}{h_{із} + h_{ох}}, \text{ м}, \quad (1)$$

де $h_{із}$ – висота шару піноскла над рівнем рідини (ізолюючий шар), м; $h_{заг}$ – загальна товщина шару піноскла, м; $h_{ох}$ – висота шару піноскла під рівнем рідини (охолоджуючий шар), м.

Для дослідження ефективності гасіння пожежі горючих рідин шляхом подачі піноскла використані описані нижче методика й технічні засоби.

Технічні засоби, використані при проведенні досліджень:

- ємність круглого перетину діаметром 300 мм із висотою борта 200 мм, площа пожежі $0,07 \text{ м}^2$; скляний циліндр місткістю 2 дм^3 ;
- горюча рідина об'ємом 2 дм^3 на дослід; вода – 4 дм^3 на дослід;
- ваги ТС5, до 100 кг, точність $\pm 10 \text{ гр}$;
- піноскло різних фракцій; наприклад – $1,0\text{-}1,5 \text{ см}$ з об'ємом зернистого матеріалу $1,6 \text{ дм}^3$, що відповідає масі піноскла $\approx 0,19 \text{ кг}$ та шару $\approx 2 \text{ см}$; запас даної фракції піноскла в кількості 35 порцій для можливості гасіння різних рідин;
- металевий жолоб на системі «гойдалка» для подачі піноскла;
- секундомір механічний СОСпр-2б-2-000, 2-й клас точності, інтервал виміру часу $0\text{-}60 \text{ хв}$;

- компоненти гелеутворюючої системи: гелеутворювач (рідке скло) и каталізатор гелеутворювання (розчин хлористого кальцію);
- установка подачі гелеутворюючої системи;
- системи нарощування висоти борта для створення модифікованого стандартного осередку пожежі класу «В» 25 см (з висотою загальною борту 45 або 70 см).

Методика проведення досліду з пожежогасіння на стандартному та модифікованому модельному осередку 2В [17]:

- установити лист на відкритій горизонтальній площі з вільним доступом;
- підготувати передбачувані установки й засоби пожежогасіння, забезпечити операторами пожежогасіння;
- розташувати на металевий жолоб порцію піноскла з розрахунку на очікуваний вогнегасний шар, відповідно до температури спалаху даної рідини, з кількістю піноскла, яка відповідає очікуваному шару у ємності;
- налити в ємність води (для стандартного досліду – 4 дм³);
- налити в ємність на воду горючу рідину (для стандартного досліду – 2 дм³);
- розпалити модельний осередок факелом, почати відлік часу вільного горіння;
- через 60 с вільного горіння почати подачу піноскла за допомогою лабораторної системи "гойдалка", почати відлік часу гасіння;
- оператор пожежогасіння нахилив металевий жолоб на системі "гойдалка" і рівномірно розподіляє потік піноскла по поверхні горючої рідини;
- подати гелеутворюючу систему (для відповідних дослідів);
- зафіксувати час гасіння, проконтролювати відсутність повторного запалювання;
- за необхідності – повторити дослід у модифікованому осередку з нарощеним бортом.

5. Результати досліджень ізолюючих властивостей моношару піноскла в процесі припинення горіння рідин

Основою вогнегасної дії піноскла є його плавучість, тобто частка шару піноскла, яка залишилася над рівнем поверхні рідини. Даний параметр та значення заглибленого шару піноскла визначають ізолюючу та охолоджуючу властивості даної вогнегасної системи. Тому на першому етапі досліджень було з'ясовано плавучість крихти піноскла у різних рідинах, що належать до класу алканів або технічних сумішей вуглеводнів.



а)



б)

Рис. 1. Дослідження плавучості піноскла у горючих рідинах:

а) циліндр із горючою рідиною; б) циліндр із горючою рідиною та піносклом

Визначення плавучості сухого піноскла $\Pi_{\text{сух}}$ проводили у скляному циліндрі місткістю 2 дм^3 , де розташовували 1 дм^3 горючої рідини (рис. 1, а). Після цього в ньому розташовували 1 дм^3 крихти піноскла до змочування (рис. 1, б). Далі візуальним методом за допомогою лінійки вимірювали висоту шару піноскла, яке занурене у рідину та яке перебуває над рівнем рідини.

Оскільки більшу охолоджуючу здатність має змочене водою піноскло, визначено плавучість і для такої вогнегасної системи. Піноскло для змочування занурювали у воду на 1 хв., після чого висипали на сітку й до завершення стікання води протягом 5 хв. Відповідні експериментальні дані, перераховані за формулою 1, щодо плавучості сухого ($\Pi_{\text{сух}}$) та змоченого ($\Pi_{\text{зм}}$) піноскла із різним розміром гранул у різних рідинах класу алканів та технічних сумішей вуглеводнів наведені в табл. 1.

Табл. 1. Плавучість подрібненої крихти піноскла на різних горючих рідинах

Рідина	Густина рідини, ρ , кг/м^3	Плавучість піноскла для фракції					
		1–1,5 см		1,5–2,5 см		2,5–4,0 см	
		$\Pi_{\text{сух}}$	$\Pi_{\text{зм}}$	$\Pi_{\text{сух}}$	$\Pi_{\text{зм}}$	$\Pi_{\text{сух}}$	$\Pi_{\text{зм}}$
Пентан	620	0,36	*	-	-	-	-
Гептан	660	0,39	*	-	-	-	-
Октан	680	0,42	0,21	-	-	-	-
Декан	730	0,45	0,27	-	-	-	-
Додекан	750	0,48	0,31	-	-	-	-
Петролейний ефір	630	0,42	0,20	-	-	-	-
Бензин	710	0,52	0,29	0,55	0,32	0,57	0,34
Уайт-спірит	760	0,52	0,30	0,56	0,32	0,57	0,34
Керосин	780	0,57	0,36	0,59	0,47	0,62	0,48
Дизельне пальне	800	0,57	0,38	0,62	0,51	0,64	0,55
Машинне масло (I-20)	910	0,58	0,40	0,62	0,52	0,64	0,55

«*» – частина гранул потонуло; «-» – не досліджувалось

Дані табл. 1 дозволяють зробити наступні висновки щодо плавучості піноскла: при зростанні розміру гранул плавучість сухого піноскла збільшується, оскільки зі зростанням розміру гранул відносна кількість відкритих пор зменшується; плавучість змоченого піноскла в 1,5–2 рази менша за плавучість сухого; плавучість сухого піноскла у рідких вуглеводнях дозволяє створювати несучий шар для утримання певного ізолюючого шару.

Виходячи з залежності (1) можна за результатами дослідів визначити висоту ізолюючого шару піноскла (над рівнем рідини) за значенням загального шару

$$h_{\text{із}} = h_{\text{зар}} \Pi, \text{ м.} \quad (2)$$

Попередні дослідження на лабораторному осередку виявили можливість припинення горіння лише за рахунок подачі піноскла на поверхню рідин, що горять [24], див. рис. 2. Не зважаючи на гіршу плавучість, найкращу ізолюючу здатність має піноскло фракції 1,0-1,5 см. Для гасіння алканів з температурою спалаху 180°C ізолюючий шар такого піноскла склав 4 см, з температурою спалаху 70°C – 6 см, з температурою спалаху 30°C – 10 см, з температурою спалаху 10°C – 12 см. Для більш легкозаймистих рідин (гексан, пентан) необхідний більший шар піноскла, що потребує уточнення.

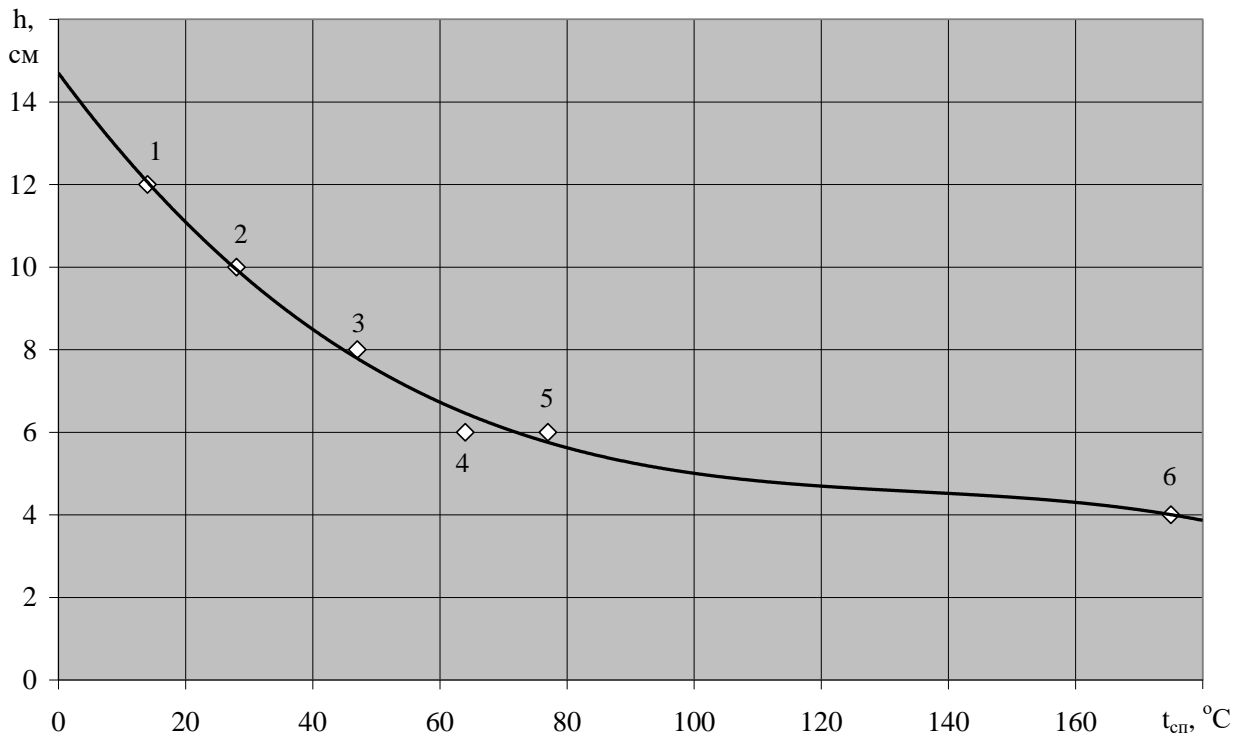


Рис. 2. Відповідність шару піноскла за умови гасіння пожежі класу В температурам спалаху алканів (лабораторний осередок): 1 – октан; 2 – гас; 3 – декан; 4 – дизельне паливо; 5 – додекан; 6 – машинне масло I-20

Апроксимаційну залежність для висоти шару піноскла на лабораторному осередку, наведену на рис. 2, можна охарактеризувати наступною формулою

$$h_{\text{заг}} = 4 \cdot 10^{-8} t_{\text{сп}}^3 + 1,638 \cdot 10^{-5} t_{\text{сп}}^2 - 2,23 \cdot 10^{-3} t_{\text{сп}} + 0,151, \text{ м}, \quad (3)$$

з достовірністю апроксимації – $R^2 = 0,9931$.

Перевірка попередніх експериментальних даних з гасіння пожежі класу В, отриманих на лабораторному осередку пожежі, проводилася сухим та змоченим піносклом для технічних алканвмісних рідин на стандартному та модифікованому стандартному модельному осередку пожежі 2В (див. рис. 3 та 4) без використання гелеутворюючих систем. Відповідно до методики, експеримент складався з етапів: вільне горіння – до 60 с; підготовка кількості піноскла, що на $1,6 \text{ дм}^3$ є меншим за очікувану ізолюючу кількість піноскла; повільне засипання піноскла; додавання за необхідності піноскла порціями по $1,6 \text{ дм}^3$ до припинення горіння; перевірка можливості повторного спалаху; додавання за необхідності піноскла порціями по $1,6 \text{ дм}^3$ до неможливості повторного спалаху.

Необхідність модифікації стандартного осередку 2В визначається тим, що висота вільного борту 200 мм не дозволяє встановити значення товщини шару піноскла, за якого можна досягти гасіння бензину без використання гелеутворюючих систем. У дослідях встановлено, що вільний борт стандартного осередку не дозволяє наносити шар піноскла більше за 14 см. Відповідно було повторено проведені раніше дослідження [24] для горючих рідин з різною температурою спалаху на аналогу модельного осередку пожежі 2В, але зі збільшеною висотою борта від 20 см до 45 см (рис. 4).

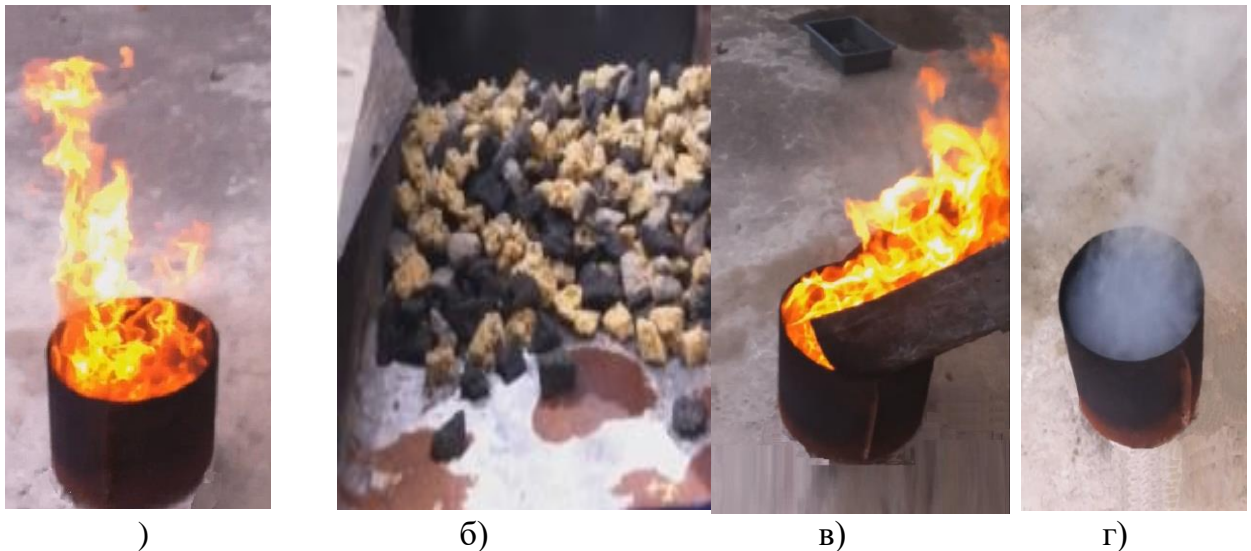


Рис. 3. Етапи гасіння стандартного осередку пожежі «2В»: а) вільне горіння модельного осередку; б) підготовка піноскла до подачі на гасіння; в) подача піноскла на гасіння; г) досягнення ефекту гасіння

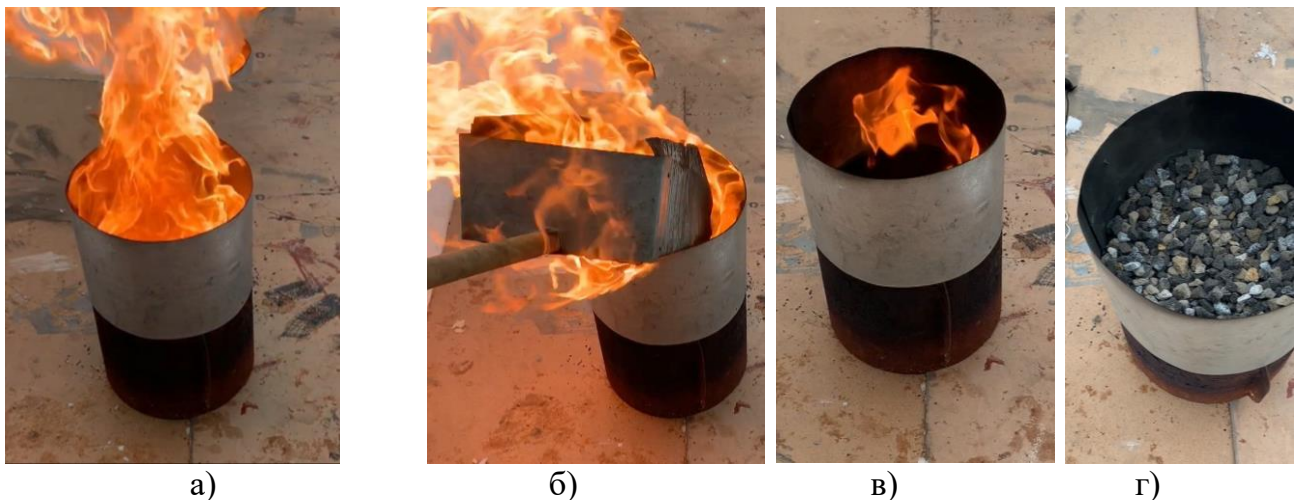


Рис. 4. Етапи гасіння модифікованого стандартного осередку пожежі «2В» з нарощеним бортом: а) вільне горіння бензину, б) засипання піноскла, в) послаблене горіння, г) погасання

Для зниження рівня наливання бензину дослід проводили без придонного шару води. На рис. 4. наведено етапи гасіння модифікованого стандартного осередку пожежі 2В з нарощеним бортом.

Встановлено, що за товщини загального шару піноскла 12 см горіння бензину зменшується до слабких проявів, які продовжуються до 45 см шару піноскла; припиняється горіння через 20-30 с після досягнення товщини шару піноскла 50 см, див. рис. 5. За такого шару піноскла не спостерігається можливість повторного запалювання з утворенням стійкого горіння.

Апроксимацію залежності $h_{\text{заг}}(t_{\text{сп}})$ у дослідженому діапазоні температур спалаху вуглеводнів (-40–180 °С) можна здійснити наступним рівнянням

$$h_{\text{заг}} = 0,2 \left(\frac{273}{t_{\text{сп}} + 273} \right)^6 + 0,045, \text{ м.} \quad (4)$$

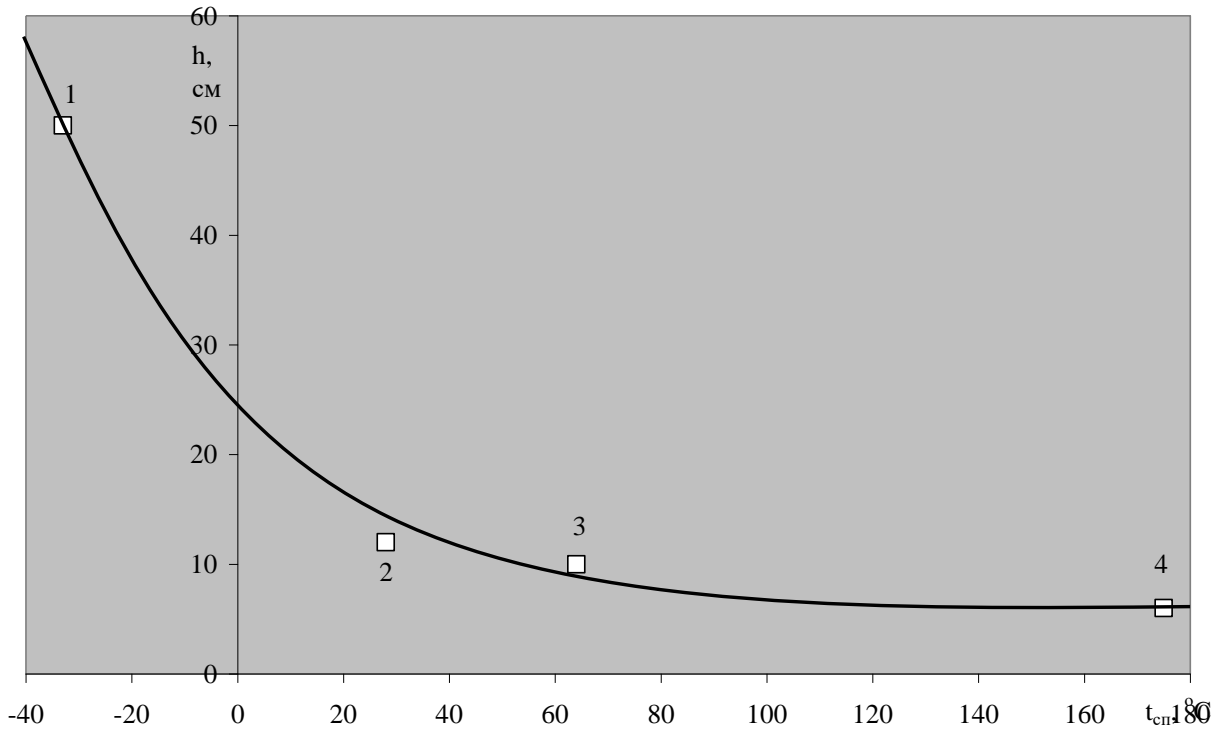


Рис. 5. Відповідність загального шару піноскла за умови гасіння пожежі класу В температурам спалаху алканів (стандартний осередок 2В): 1 – бензин; 2 – керосин; 3 – дизельне паливо; 4 – машинне масло I-20

Досліди з гасіння бензину піносклом, змоченим водою, показали, що ізолюючий шар, який припиняє горіння потребує меншого зовнішнього шару (піноскло, що знаходиться над поверхнею горючої рідини) – 19 см. Але у зв'язку з тим, що змочене піноскло має суттєво меншу плавучість (див. табл. 1) для гасіння необхідна більша загальна товщина шару піноскла (формула 1)

$$\Pi = \frac{h_{із}}{h_{заг}} = \frac{0,19}{0,29} = 0,66 \text{ см.}$$

Тобто, моношар сухого піноскла при гасінні бензину без

застосування гелеутворюючих систем має перевагу порівняно зі змоченим.

6. Результати досліджень ізолюючих властивостей бінарної вогнегасної системи на основі піноскла в процесі припинення горіння рідин

Вогнегасний шар піноскла для особливо небезпечних легкозаймистих рідин (на прикладі бензину) 50 см визначає великі витрати для гасіння. Так, для резервуару діаметром 20 м для гасіння необхідно більше за 16 м³ крихти піноскла потрібної фракції. Мінімізувати витрату піноскла можна за умови додаткової подачі гелю за меншого значення шару піноскла.

Ізолюючі властивості негорючих гелів були встановлені раніше [15]. Як показано в даних роботах, суцільний ізолюючий шар гелю, спроможний, у разі нанесення на сітку, зменшувати концентрацію парів легкозаймистих рідин до безпечного рівня, утворюється за поверхневої питомої витрати розпиленої подачі компонентів гелеутворюючої системи 0,13–0,14 г/см². За умови формування шару гелю на поверхні з крихти піноскла означена витрата не дозволяє сформувати суцільний шар гелю, оскільки не дозволяє заповнити порожнечу між частками піноскла. Таким чином, утворення суцільного ізолюючого шару гелю на крупнодисперсній поверхні з часток піноскла потребує значно більших витрат компонентів ге-

леутворюючої системи. Але нанесення шару гелю зменшує плавучість піноскла. Таке становище ставить питання про визначення можливості припинення горіння за певного співвідношення між товщинами шарів піноскла та гелю. Можна сформулювати три ефекти, які можна досягти при гасінні рідин даною системою: – гасіння досягається лише піносклом, – гасіння з імовірністю повторного запалювання досягається за мінімального шару піноскла, – гасіння досягається за рахунок утворення суцільного шару гелю на мінімально достатньому шарі піноскла. Означені системи наведені на рис. 6.



Рис. 6. Вогнегасні системи на основі піноскла для гасіння пожежі класу В: а) гасіння піносклом; б) гасіння піносклом з не суцільним шаром гелю; в) гасіння піносклом з суцільним шаром гелю

Для проведення досліджень нами були обрані три фракції крихти з розмірами 1–1,5 см; 1,5–2,5 см та 2,5–4,0 см. Масова витрата гелю на гасіння визначалась шляхом проведення дослідів з гасіння на лабораторному осередку на вагах. Питому масову витрату гелю розраховували, як масу віднесено до одиниці площі піноскла. Не суцільний шар гелю, який дозволяє припинити горіння з імовірністю повторного запалювання, утворюється за масової витрати гелю 0,18–0,21 г/см² для всіх трьох фракцій піноскла. У дослідях без горіння суцільний шар гелю, який характеризується заповненням порожнин між частками насипу піноскла, утворюється за масової витрати для фракцій піноскла: 1–1,5 см–0,7 г/см²; 1,5–2,5 см–0,9 г/см²; 2,5–4,0 см–1,3 г/см².

Процес гасіння займає не більше 1 хв., що є задовільним результатом. Експеримент показав, що час гасіння визначається часом подачі й розподілу піноскла по поверхні бензину ізольованим шаром та часом подачі компонентів гелеутворюючої системи для завершення гасіння та охолодження бортів.

Наступне питання, яке потребує вирішення – який шар та фракційний склад піноскла витримує суцільний шар гелю. Найгіршу плавучість піноскло має у бензині (серед технічних рідин). Тому його обрано для даної серії дослідів. Досліджено несучу спроможність шару піноскла 10 та 15 см для різних фракцій. Несучої спроможності шару 10 см не вистачило для утримання ізольованого шару гелю на жодній фракції. Утворити суцільний шар гелю, який дозволяє припинити горіння без можливості повторного запалювання, на шарі піноскла 15 см виявилось мож-

ливим лише для фракції піноскла 1–1,5 см з витратою $0,7 \text{ г/см}^2$. Це пояснюється тим, що за більших витрат гелю плавучості піноскла не вистачає для того, щоб утримати ізолюючий шар гелю. Тому фракції піноскла 1,5–2,5 см та 2,5–4,0 см, які потребують більших витрат гелю для утворення ізолюючого шару, не витримують сформованої маси та вогнегасна система частково занурюється у горючу рідину.

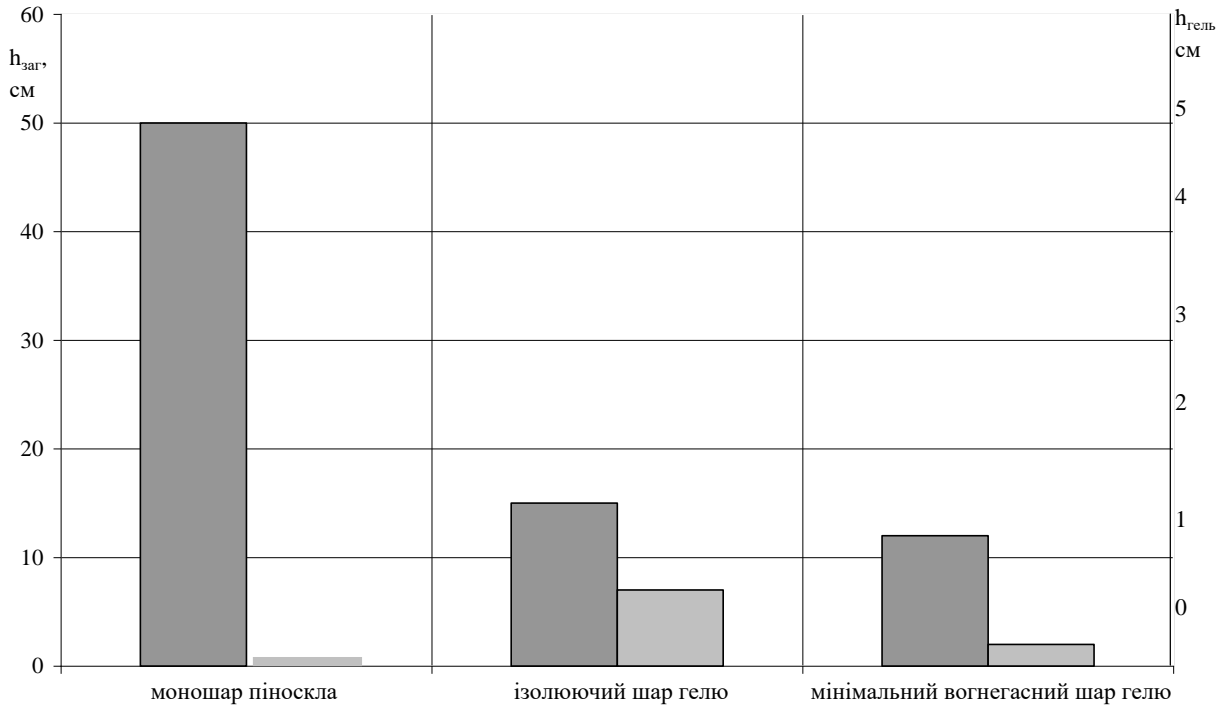


Рис. 7. Гасіння пожежі класу В вогнегасними системами на основі піноскла

Результати проведених досліджень наведені на рис. 7 (масова витрата гелю перерахована в умовний шар). Визначено значення шару піноскла, який разом з не суцільним шаром гелю ($\sim 0,2 \text{ г/см}^2$) дозволяє припинити горіння з імовірністю повторного запалювання. Шар гелю з означеною витратою подачі наносився на шари піноскла, починаючи з 15 см зі зменшенням шару піноскла у наступних дослідках. Найменший шар піноскла, який дозволяє припинити горіння, склав 12 см для фракції 1-1,5 см. Але за таких умов через деякий час над поверхнею даної вогнегасної системи утворюється пара бензину, здатна до запалювання.

7. Обговорення результатів досліджень ізолюючих властивостей вогнегасної системи із піноскла та гелю

Отримані дані дозволяють сформулювати загальні ізолюючі та охолоджуючі характеристики вогнегасної системи на основі піноскла. Основною вогнегасним параметром даної системи є значення шару піноскла, що знаходиться над поверхнею рідини. Але для різних рідин плавучість піноскла (частка загального шару над рідиною) виявилася різною: для рідин ряду алканів – 0,36–0,48, для їх технічних сумішей – 0,42–0,58. Частина шару піноскла, яка під дією його маси занурюється нижче рівня рідини, виконує охолоджуючу функцію. Посилити ефект охолодження можна шляхом подачі вологого піноскла, але отримані значення плавучості виявилася недостатніми: 0,21–0,31 для алканів, 0,2–0,4 для їх технічних сумішей, причому у рідинах з найменшою густиною ($620\text{--}660 \text{ г/м}^3$) – частина гранул потонула.

Крім охолоджуючої та ізолюючої дії, піноскло в процесі пожежогасіння повинно виконувати й несучу функцію, яка полягає у витримуванні ізолюючого шару негорючого гелю над рівнем рідини. Оскільки і піноскло, і гель має власні ізолюючу та охолоджуючу дію, виникає можливість погасити пожежу класу В або лише за рахунок піноскла, або за рахунок бінарної дії, або, головним чином, за рахунок гелю, який утримується достатнім шаром піноскла, див. рис. 6. Слід зауважити, що своєчасна подача даного вогнегасного засобу не потребує одночасного окремого охолодження стінок резервуару компактними струменями води, оскільки товстий шар піноскла частково екранує борта від прогріву випромінюванням та охолоджує поверхневий шар горючої рідини, а гель має добру адгезію до твердих поверхонь та за подачі на борта створює охолоджуючу дію.

Проведені дослідження виявили зв'язок температури спалаху рідини, плавучості та ізолюючої здатності піноскла. Не зважаючи на те, що головним фактором, який визначає кількість піноскла для пожежогасіння є плавучість у даній рідині, є опосередкована залежність і від температури спалаху. Апроксимація цієї залежності за допомогою формули (4) дає коефіцієнт кореляції 0,99. Встановлено, що для гасіння бензину сухим піносклом необхідний шар – 50 см, вологим піносклом – 66 см. Але, як показано на рис. 2. Для горючих рідин (з температурою спалаху більшою за 61 °С [1]) ізолюючий шар піноскла стає меншим за 10 см (рис. 5) і тоді дану речовину можна рекомендувати, як монозасіб для пожежогасіння.

Як показують дані, наведені на рис. 7, існує можливість вибору оптимального варіанту гасіння, що можна вирішувати для кожної рідини окремо. При цьому необхідно враховувати необхідність застосування певних технічних засобів. Так, подача піноскла за даною технологією реалізовано пневматичним способом [25], а гелеутворюючої двохкомпонентної системи – двома розпиленими струменями, що об'єднуються під час подачі в один [15]. Піноскло можна подавати з більшої відстані, гель необхідно подавати з близької відстані за зменшеної інтенсивності горіння.

Для бензину можна запропонувати варіант гасіння за відносно малих витрат піноскла та гелю. Але слід зауважити, що такий режим гасіння не створює ізолюючого шару, тому має небезпеку повторного виникнення горіння у разі дії джерела запалювання. Для усунення небезпеки повторного запалювання перегріті стінки необхідно покрити гелем.

Гасіння пожежі класу В гелем, який утримується мінімальним шаром піноскла, потребує у 5–10 разів збільшених витрат відносно дослідів з утворенням ізолюючого шару гелю на сітці [15], оскільки необхідно заповнити нещільності між частками піноскла у плавучому шарі. Для утримання такої кількості гелю необхідний збільшений шар піноскла. Оптимальною фракцією піноскла виявилася 1–1,5 см [17], оскільки менш дрібні фракції мають майже тільки відкриті пори і мають меншу плавучість; а більш крупні фракції мають більші пустоти між частками у засипці, тому гірше ізолюють та вимагають більше гелю для заповнення цих пустот, що визначає необхідність додаткової подачі піноскла для забезпечення достатньої плавучості. Але за таких умов гарантується відсутність повторного запалювання навіть у разі прямої дії відкритого полум'я.

За результатами проведених досліджень встановлено, що мінімально необхідний шар піноскла для витримування ізолюючого шару гелю, який утворюють за витрати подачі розчинів 0,7 г/см², становить 15 см. За такої кількості гелю шар піноскла занурюється у рідину майже повністю і припиняє виконувати ізолюючу функцію, але збільшується охолоджуюча дія на поверхневий шар рідини. Шар пі-

носкла 12 см суттєво знижує інтенсивність випаровування будь-якої горючої рідини, що дозволяє припинити полум'яне горіння розпиленою подачею гелеутворюючої системи з витратою $0,2 \text{ г/см}^2$ та формуванням не щільного шару гелю. За таких умов у разі дії відкритого полум'я виникає горіння з малою інтенсивністю. Позитивною рисою даного методу гасіння, між іншим, є те, що використані вогнегасні речовини (вода, піноскло, рідке скло, хлористий кальцій) є не токсичними – не більше III класу небезпеки, не забруднюють (не розчинні та не утворюють суспензій) горючу рідину, яка підлягає гасінню, а піноскло можна регенерувати для повторного використання.

Для даної вогнегасної системи, що складається з піноскла та гелю, існують наступні переваги та недоліки:

- перевагами використання плавучої вогнегасної системи на основі піноскла в порівнянні з гасінням пінами є: піноскло не руйнується в полум'ї; матеріали, що використані, є негорючими; плавучий несучий шар піноскла не руйнується на поверхні горючої рідини й не тоне з часом; шар піноскла 15 см дозволяє знизити інтенсивність горіння й проводити завершення гасіння гелеутворюючою системою з близької відстані; шар гелю добре ізолює; висока ефективність пожежогасіння; відсутність забруднення нафтопродукту вогнегасною системою; відсутність негативного впливу на навколишнє середовище.

- недоліками використання плавучої вогнегасної системи на основі піноскла в порівнянні з гасінням пінами є відсутність стандартних систем подачі для даних вогнегасних систем та необхідність візуального контролю процесу гасіння.

8. Висновки

1. Експериментально досліджено процес припинення горіння моношаром піноскла для пожеж класу «В». Встановлено, що визначальною характеристикою для пожежогасіння рідин є плавучість піноскла. Визначено, що у рідинах ряду алканів плавучість моношару сухого піноскла фракції 1,0–1,5 см становить 0,36–0,58, вологого – 0,21–0,4. Відповідно, сухе піноскло має кращу ізолюючу дію стосовно випаровування горючої рідини, а вологе – краще охолоджуючу дію для поверхні рідини. Встановлено значення ізолюючої здатності моношару піноскла для гасіння бензину на модельному осередку 2В – 50 см, для вологого моношару піноскла – 66 см. Отримано апроксимаційну залежність, яка дозволяє прогнозувати значення ізолюючого шару піноскла за температурою спалаху горючої рідини, що горить, рис. 5.

2. Експериментально з'ясовано ефективність практичної реалізації пожежогасіння бінарною вогнегасною системою на основі піноскла шляхом застосування трьох режимів подачі компонентів. Доведено, що ефективне гасіння модельного осередку 2В (горіння бензину) вогнегасною системою на основі піноскла досягається: моношаром піноскла товщиною 50 см фракції 1-1,5 см; бінарним шаром з піноскла фракції 1-1,5 см товщиною 15 см та ізолюючого шару гелю 0,7 см; бінарним шаром з піноскла фракції 1-1,5 см товщиною 12 см та охолоджуючо-ізолюючою подачею гелю шаром 0,2 см. Встановлено, що гасіння особливо небезпечних легкозаймистих рідин з температурою спалаху менше за $28 \text{ }^\circ\text{C}$ краще здійснювати в охолоджуючо-ізолюючому режимі з мінімальними витратами подачі піноскла та гелю (12 см та 0,2 см, відповідно). Досліди показали, що гасіння горючих рідин з температурою спалаху більшою за $61 \text{ }^\circ\text{C}$ з достатньою ефективністю досягається індивідуальним ізолюючим моношаром піноскла, товщину

якого для різних рідин можна визначити за формулою (4). Експериментально доведено, що гарантувати відсутність повторного спалаху, за умови подачі вогнегасної системи на основі піноскла, можна шляхом формування на шарі піноскла ізолюючого шару гелю (15 см та 0,7 см, відповідно). Показано, що використані вогнегасні речовини є не токсичними, не забруднюють горючу рідину, а піноскло після гасіння здатне до регенерації.

Література

1. Тарахно О. В., Жернокльов К. В., Трегубов Д.Г. та ін. Теорія розвитку та припинення горіння. Практикум. Частина 1. Х., 2010. 309 с.
2. Баланюк В. М., Михалічко Б. М., Моргун Ю. О. Гасіння аерозолем пожеж горючих рідин в резервуарах підшаровим методом // Пожежна безпека, 2012. № 21. С. 19–22.
3. Ковалишин В. В., Васильєва О. Е., Козяр Н. М. Пінне гасіння. Л., 2007. 168 с.
4. Боровиков В. Гасіння пожеж у резервуарах для зберігання нафти та нафтопродуктів // Пожежна та техногенна безпека, 2015. № 11(26). С. 28–29.
5. Статут дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби. К., 2012. 42 с.
6. Сенчихін Ю. С., Сировий В. В., Тарахно О. В. та ін. Довідник керівника гасіння пожежі. К., 2017. 358 с.
7. Pat. 4303534 US. Foam fire-extinguishing composition and preparation and use thereof // I. Hisamoto, Ch. Maeda, T. Esaka, M. Nishiwaki. – Orig. Assignee: Daikin Industries Ltd.–US06084541, 14.10.1978, Int. Publ. Date: 12.01.1981.
8. Pat. 2014/153122 WO. Polyperfluoroalkyl substituted polyethyleneimine foam stabilizers and film formers / Yuan Xie.; Orig. Assignee: Tyco fire products LP,–US61/785963, 14.03.2013, Int. Publ. Date: 25.09.2014.
9. Пат. 37638 RU. Генератор низкократной пены для подслоного пожаротушения в резервуаре // В.К. Никульчиков.; заяв. та патентообл.: Транснефть. – RU2003 137153U, 12.26.2003, опубл. 10.05.2004.
10. Кокорин В.В., Романова И.Н., Хафизов Ф.Ш. Проблемы эффективного тушения пожаров вертикальных стальных резервуаров в слой горючего // Нефтегазовое дело, 2012. № 3. С. 255–260.
11. Kannan K., Corsolini S., Falandysz J. et al. Perfluorooctanesulfonate and related fluoro-chemicals in human blood from several countries // Environ Sci. Technol, 2004. № 38. P. 89–95.
12. Amankeldi F., Ospanova Z. Composite Foaming Agents on the Basis of High-Molecular Natural Surfactants // Colloids Interfaces, 2018. V. 2. P. 2–8.
13. Дадашов И. Ф., Михеенко Л. А., Киреев А. А. Выбор лёгкого силикатного носителя для гелевого огнетушащего слоя при пожаротушении // Керамика: наука и жизнь, 2016. № 2 (31). С.44–51.
14. Дадашов И. Ф., Киреев А. А., Трегубов Д. Г. и др. Экспериментальное исследование влияния скорости ветра на изолирующие свойства гелеобразного слоя по отношению к парам токсичных и горючих жидкостей // Проблеми надзвичайних ситуацій, 2018. № 27. С. 17–24.
15. Дадашов И. Ф., Киреев А. А., Шаршанов А. Я. та ін. Экспериментальное исследование влияния характеристик гелеобразного слоя на его изолирующие свойства по отношению к парам органических жидкостей // Проблеми надзвичайних ситуацій, 2017. Вип. 26. С. 43–48.

16. Дадашов І. Ф., Кіреєв О. О. Експериментальне дослідження впливу шару гранульованого піноскла на горіння бензину // Пожежна безпека, 2017. № 31. С. 36–42.

17. 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.

18. Saravanan R., Karunanithi T., Govindarajan L. A Risk Assessment Methodology for Toxic Chemicals Evaporation from Circular Pools // J. Appl. Sci. Environ. Manage, 2007. V. 11(1). P. 91–100.

19. Лісачук Г. В., Кривобок Р. В., Іваніщева Ж. О. та ін. Захисні елементи від дії електромагнітного випромінювання на основі піноскла // Збірник наукових праць ВАТ «УкрНДІвогнетрив А.С. Бережного», 2008. Вип. 108. С. 196–202.

20. Eom J. H., Kim Y. W., Raju S. Processing and properties of macroporous silicon carbide ceramics // Journal of Asian Ceramic Societies, 2013. V. 1(3). P. 220–242.

21. H. Y. Cho et al. Sound Absorbing Properties of Foamed Glasses // Materials Science Forum, 2005. V. 486–487. P. 578–581.

22. Manevich V. E. & Subbotin K.Y. Foam glass and problems of energy conservation // Glass Ceram, 2008. V. 65. Issue 3–4. P. 105–108.

23. Михеєнко Л. А. Стеклокристаллические фильтрующие материалы на основе системы $R_2O - RO - Al_2O_3 - B_2O_3 - SiO_2$; дис. ...к.т.н: 05.17.11. Х., 2013. 190 с.

24. Дадашов І. Ф., Трегубов Д. Г., Киреев А. А., Тарахно Е. В. Исследование влияния толщины слоя гранулированного пеностекла на горение жидких углеводородов // Вестник КТИ, 2018. № 4(32). С.47–54.

25. Спосіб гасіння пожеж горючих та легкозаймистих рідин в резервуарах: пат. № 128050; заявка 13.04.2018; опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16.

I. Dadashov, PhD, Associate Professor

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

STUDY OF THE FIRE EXTINGUISHING PROPERTIES SYSTEM BASED ON FOAM GLASS

The properties of the fire-extinguishing substances, which are made of the foam glass, were tested in comparison to the fire-fighting foams; the comparison was done during extinguishing a class B fire. It has been shown that effective fire extinguishing with foams can be achieved only with the use of perfluorinated foaming substances. As well as, it was noticed that such foam formers are tough moreover, they are prohibited for widespread use. The requirements to a modern fire-extinguishing agent used for a class B fire are offered: the buoyancy in the flammable liquids, non-flammability, high insulating ability, environmental safety, resistance to decomposition on fire, inertness to flammable liquid. It is shown that the fire extinguishing system made of a floating lay of the foam glass and an insulating lay of the non-flammable gel corresponds to such requirements; however, properties of that system are not sufficiently studied. The insulating, cooling and other related properties of the foam glass and gel were considered in the system. It was proved that the fire-extinguishing properties of this system are based on the foam glass buoyancy. It was determined that the best interrelation between buoyancy, insulating and carrying ability of foam glass is provided by a fraction of 1-1.5 cm. It was shown that the buoyancy of foam glass in the alkane liquids in dry state is 0.36-0.58, in wet state is 0.21-0.4. It is shown that using foam glass in the described system can realize three fire extinguishing modes: with the foam glass monolayer (layer thickness to extinguish gasoline – 50 cm), with the sufficient layer of foam glass that withstands an insulating layer of gel 0.7 mm (layer thickness for extinguishing gasoline – 15 cm), with the minimum layer of foam glass – 12 cm which allows the system to extinguish a fire with a minimum flow rate of the gelling system – 0,2 g/cm². The obtained results allow us to regulate the process of extinguishing class B fires with using the fire-extinguishing systems based on foam glass, provide effective results of extinguishing and avoid negative impact on the environment.

Keywords: class B fires, flammable liquids, gasoline, fire extinguishing, foam, foam glass, non-combustible gel, monolayer, binary layer, consumption, insulation

References

1. Tarakhno, O. V., Tregubov, D. G. & Zhernoklov, K. V. (2010). Teoriya rozvitku ta pripinennya gorinnya. Praktikum, ch.I. Mis'ka drukarnya, 309.
2. Balanyuk, V. M., Mykhalichko, B. M., Morhun & Yu.O. (2012). Hasinnya aerezolem pozhezh horyuchykh ridyn v rezervuarakh pidsharovym metodom. Pozhezhna bezpeka, 21, 19–22.
3. Kovalyshyn, V. V., Vasylyeva O. E. & Kozyar N. M. (2007). Pinne hasinnya. L'viv, Spolom. 168.
4. Borovykov, V. (2015). Hasinnya pozhezh u rezervuarakh dlya zberihannya nafty ta naftoproduktiv. Pozhezhna ta tekhnohenna bezpeka, 11(26), 28–29.
5. Statut diy u nadzvychaynykh sytuatsiyakh orhaniv upravlinnya ta pidrozdiliv Operativno-ryatuval'noyi sluzhby. (2012). MNS Ukrayiny, 42.
6. Senchykhin, YU. C., Syrovyy, V. V., Tarakhno, O.V. & al. (2017). Dovidnyk kerivnyka hasinnya pozhezhi. DSNS, 358.
7. Pat. 4303534 US. Foam fire-extinguishing composition and preparation and use thereof / I. Hisamoto, Ch. Maeda, T. Esaka & M. Nishiwaki. Orig. Assignee: Daikin Industries Ltd. US06084541, 14.10.1978, Int. Publ. Date: 12.01.1981.
8. Pat. 2014/153122 WO. Polyperfluoroalkyl substituted polyethyleneimine foam stabilizers and film formers / Yuan Xie.; Orig. Assignee: Tyco fire products LP, US61/785963, 14.03.2013, Int. Publ. Date: 25.09.2014.
9. Pat. 37638 RU. Generator nizkokratnoy peny dlya podsloynogo pozharotusheniya v rezervuare / V.K. Nikul'chikov; zayavleniy. i patentoobl.: Transneft'. – RU2003 137153U, 12.26.2003, opubl. 10.05.2004.
10. Kokorin, V. V., Romanova, I. N. & Khafizov, F. Sh. (2012). Problemy effektivnogo tusheniya pozharov vertikal'nykh stal'nykh rezervuarov v sloy goryuchego. Neftegazovoy delo, № 3, 255–260.
11. Kannan, K., Corsolini, S., Falandysz, J. & al. (2004). Perfluorooctanesulfonate and related fluoro-chemicals in human blood from several countries. Environ Sci. Technol, 38, 89–95.
12. Amankeldi, F., Ospanova, Z. (2018). Composite Foaming Agents on the Basis of High-Molecular Natural Surfactants. Colloids Interfaces, 2, 2–8.
13. Dadashov, I. F., Mikheyenko, L. A. & Kireyev, A. A. (2016). Vybor logkogo silikatnogo nositelya dlya geleovogo ognitushashchego sloya pri pozharotushenii. Keramika: nauka i zhizn, 2 (31), 44–51.
14. Dadashov, I. F., Kireyev, A. A., Tregubov, D. G. & al. (2018). Eksperimental'noye issledovaniye vliyaniya skorosti vetra na izoliruyushchiye svoystva geleobraznogo sloya po otnoshenii k param toksichnykh i goryuchikh zhidkostey. Problemy chrezvychaynykh situatsiy, 27, 17–24.
15. Dadashov, I. F., Trehubov, D. G., Senchikhin, Yu. M. & Kiryeyev, O. O. (2018). Napryamky vdoskonalennya hasinnya pozhezh naftoproduktiv. Naukovyy visnyk budivnytstva, 94, 4, 238–249.
16. Dadashov, I. F. & Kiryeyev, O. O. (2017). Eksperymental'ne doslidzhennya vplyvu sharu hranul'ovanoho pinoskla na horinnya benzynu. Pozhezhna bezpeka, 31, 36–42.
17. Dadashov, Y. F., Trehubov, D. H., Senchykhin, Yu. M. & Kiryeyev, O. O. (2018). Napryamky vdoskonalennya hasinnya pozhezh naftoproduktiv. Naukovyy visnyk budivnytstva, 94(4), 238–249.

18. Saravanan, R., Karunanithi, T. & Govindarajan, L. (2007). A Risk Assessment Methodology for Toxic Chemicals Evaporation from Circular Pools. *J.Appl.Sci. Environ.Manage*, 11(1), 91–100.
19. Lisachuk, G. V., Krivobok, R. V., Ivanishcheva, Zh. O. (2008). Zashchitnyye elementy ot deystviya elektromagnitnogo izlucheniya na osnove penostekla. *Sbornik nauchnykh trudov «UkrNDIvognetriv A.S. Berezhnogo»*, 108, 196–202.
20. Eom, J. H., Kim, Y. W. & Raju, S. (2013). Processing and properties of macroporous silicon carbide ceramics: *Journal of Asian Ceramic Societies*, 1(3), 220–242.
21. Cho, H.Y. & al. (2005). Sound Absorbing Properties of Foamed Glasses. *Materials Science Forum*, 486, 578–581.
22. Manevich, V.E. & Subbotin, K.Y. (2008). Foam glass and problems of energy conservation *Glass Ceram*, 65(3–4), 105–108.
23. Mikheyenko, L. A. (2013). Steklokristallicheskiye fil'truyushchiye materialy na osnove sistemy $R_2O - RO - Al_2O_3 - B_2O_3 - SiO_2$: dis. k. t. n.: 05.17.11. 190.
24. Dadashov, I. F., Tregubov, D. G. , Kireyev, A. A. & Tarakhno, Ye. V. (2018). Issledovaniye vliyaniya tolshchiny sloya granulirovannogo penostekla na goreniiye zhidkikh uglevodorodov. *Vestnik KTI*, 4(32), 47–54.
25. Pat. № 128050. Sposib hasinnya pozhezh horyuchykh ta lehkoyzaymystykh ri-dyn v rezervuarakh / Data podannya 13.04.2018. Data publikatsiyi 27.08.2018. *Byul.* № 16.

Надійшла до редколегії: 04.09.2018

Прийнята до друку: 13.11.2018