

УДК 541.49:544.169:539.199

Д. Г. Трегубов¹, к.т.н., доцент, докторант (ORCID 0000-0003-1821-822X)

О. О. Кіреєв¹, д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0002-8819-3999)

Л. М. Трефілова¹, д.т.н., с.н.с., проф. каф. (ORCID 0000-0001-8939-6491)

М. А. Чиркіна¹, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-2060-9142)

І. Ф. Дадашов², д.т.н., доцент, декан фак. (ORCID 0000-0002-1533-1094)

¹Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

²Академія Міністерства з надзвичайних ситуацій Азербайджанської Республіки, Баку, Азербайджан

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАЛАНСУ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛАВУЧИХ СИСТЕМ ДЛЯ ГАЛЬМУВАННЯ ВИПАРОВУВАННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ РІДИН

Встановлено баланс внесків властивостей засобів, призначених для гальмування випаровування рідин та забезпечення безпечних концентрацій пари, у залежності від значень характерних температур та водорозчинності. Доведено, що обмеження розмірів парогазової хмари досягається засобами ізоляції або охолодження поверхні рідини. Показано, що подовжену дію таких засобів можуть забезпечити лише закритопористі плавучі тверді матеріали (наприклад, піноскло) і піни, що тверднуть. Акцентовано увагу на таких недоліках вказаних засобів, як мала ізолююча здатність піноскла та незначна охолоджуюча здатність, а для твердіючої піни – горючість. Дослідним шляхом встановлено наявність менших коефіцієнтів гальмування випаровування гелем для рідин з більшою водорозчинністю. Дослідним шляхом встановлено наявність більшої охолоджуючої здатності у вологого піноскла, ніж у сухого, у 5–6 разів з близькою залежністю для охолодження полярних та неполярних рідин. Показано, що охолоджуючий ефект від подавання піноскла менший для рідин з більшою теплою випаровування, причому ця різниця приблизно однакова для випадків подавання як сухого, так і вологого піноскла. Встановлено, що для легкокиплячих неполярних рідин ізоляція випаровування більш ефективно досягається за використання ізолюючої системи на основі сухого піноскла з шаром гелю, а для важкокиплячих рідин – за умови подачі охолоджуючої системи у вигляді вологого піноскла. Визначено, що додатковий внесок у запобігання та припинення горіння за використання водовмісних засобів на основі піноскла надає флегматизація повітряного простору над поверхнею рідини водяною парою. Доведено, що зменшення масової швидкості вигорання та ефект пожежогасіння за нанесення на поверхню горючої рідини шару піноскла відбувається схожим чином для рідин з близькими молярними масами, а не температурами спалаху.

Ключові слова: випаровування, вигорання, масова швидкість, ізоляція, охолодження, плавучий засіб, піноскло, гель

1. Вступ

Великі кількості небезпечних рідин найчастіше зберігають на складах паливно-мастильних матеріалів. Також можлива наявність на промислових майданчиках виробництв значних кількостей горючих або токсичних рідин для підтримання безперебійної роботи не менше трьох діб. Аварійний розлив цих рідин зазвичай відбувається при розгерметизації резервуарів або трубопроводів з утворенням зони небезпечної загазованості [1]. Зовнішня межа цієї зони визначається відстанню від місця аварійного розливу до області, де концентрація пари даної рідини зменшується до рівня, меншого за критичний. Критичною концентрацією є нижня концентраційна межа поширення полум'я (НКМПП) або граничнодопустима концентрація за токсичністю чи іншими впливами (ГДК) [2]. Внаслідок небезпеки забруднення повітря та навколишнього середовища для організації певної технології за інших рівних умов обирають речовини з більшим класом небезпеки (меншою небезпекою). За умов аварійного розливу для створення безпечних умов у навколишньому середовищі часткове зменшення зони загазованості без її повної ліквідації є недостатньою дією, оскільки залишається ймовірність запалювання у зменшеній

зоні вибухонебезпечних концентрацій з наступним вибухом та початком пожежі.

Зазвичай нижня межа токсичності за параметром ГДК є значно меншою ніж НКМПП, тому її складніше забезпечити над поверхнею рідини. З іншого боку, є можливість зменшити розміри цієї зони, уникнути контакту людей з токсичними концентраціями в робочому просторі шляхом евакуації або при застосуванні ізолюючих індивідуальних засобів. А для забезпечення пожежної безпеки зменшення зони загазованості без її повної ліквідації є недостатньою дією, оскільки залишається ймовірність запалювання у зменшеній зоні вибухонебезпечних концентрацій з наступним вибухом та початком пожежі. Тобто, для забезпечення безпеки знаходження горючої рідини на відкритому просторі значення НКМПП є критичним, у той час, як для токсичної речовини під час проведення аварійно-рятувальних дій на території підприємства її концентрація може й перевищувати ГДК, а головне завдання – не допустити поширення небезпечних концентрацій за зовнішню територію. Під час військових дій швидкість та надійність вживаних заходів є особливо актуальними. Тобто, засоби гальмування процесу випаровування для горючої пари повинні забезпечувати відсутність зони загазованості, а для токсичної пари можна обмежити розміри такої зони (на період проведення аварійних робіт) межами цеху або виробництва, де передбачено для робітників можливість оперативного застосування засобів індивідуального захисту.

Таким чином, на даний час залишається остаточно не вирішеною проблема забезпечення надійного зменшення або ліквідації зони загазованості над поверхнею аварійного розливу небезпечної рідини на заданий час. Тому актуальним є проведення наукових досліджень з виділення перспективних напрямків керування розмірами зони загазованості на підставі аналізу фізико-хімічних механізмів, що супроводжують даний процес, та пошуку відповідних засобів, що створюють потрібні умови.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Бажаними властивостями шуканого засобу гальмування випаровування є надійність ізоляції та охолодження поверхні рідин, стійкість під дією теплового випромінювання, полярних рідин, за контакту зі стінками та в часі, а також відсутність впливу на людей, довкілля, рідину та обладнання [3]. З усього обсягу впливів на процес горіння рідин можна сформуванати два напрямки можливих дій: зменшення інтенсивності випаровування і безпосереднє припинення полум'яного горіння. Існує два напрямки забезпечення гальмування випаровування рідин: ізоляція поверхні випаровування та її охолодження. Дослідження застосування таких засобів більш поширені для пожежогасіння, ніж для локалізації аварійного розливу рідин. Практичні напрямки реалізації таких дій передбачають застосування пінних засобів, твердої вуглекислоти або твердих плавучих матеріалів [4, 5]. Ефективність дії таких заходів можна оцінити за зменшенням масових швидкостей випаровування $v_{m(e)}$ та вигорання $v_{m(b)}$.

При знаходженні рідин на відкритому просторі можливість запалювання зони загазованості визначають за температурою спалаху $t_{сп}$. Цій критичній температурі зберігання рідини відповідає певна критична $v_{m(e)}$ [6]. Відповідно, якщо охолодити поверхню рідини до температури меншої за $t_{сп}$, то інтенсивність випаровування стане меншою за критичну, а концентрація пари стане меншою за нижню КМПП і горіння припиниться. Засіб ізоляції, у свою чергу, повинен зменшити дифузію пари горючої рідини у зону горіння.

Способи впливу на полум'яне горіння, інгібування й флегматизація, для гасіння великих пожеж на відкритому просторі є важко застосованими [7–9], а для зменшення зони загазованості розливу токсичних рідин їх використання взагалі неможливе. Флегматизація газового простору є одним з варіантів розведення середовища. Розведення небезпечних рідин більш безпечними розчинниками може зменшити зону загазованості. Але навіть для припинення горіння чистої горючої водорозчинної рідини її необхідно розбавляти до мольної частки 0,01 (ацетон)–0,2 (оцтова кислота) [10], тобто у 5–100 разів. Це визначає необхідність застосування великих кількостей розчинника та наявності технічної можливості безпечного розташування відповідної кількості розчину без збільшення площі аварійного розливу, що на практиці не може бути реалізовано.

Типовими плавучими засобами ізоляції поверхні аварійного розливу рідин є піни [11], досліджено можливість ізоляції шаром спіненого поліакрілатного гелю [12], розроблено ізоляційні засоби у вигляді закритопористого твердого негорючого матеріалу (піноскло, ПС) [13, 14] та ПС з шаром гелю [15]. Більшість з них забезпечує ізоляцію за рахунок наявності певного шару води (від плівки до декількох міліметрів). Саме вода здебільшого й виконує ізолюючу роль для реалізації гальмування випаровування рідин. Неорганічний гель також виконує функцію водонаповненого засобу. Звичайні піни швидко руйнуються, особливо за умови контакту з полярними рідинами. ПС, у свою чергу, має недостатню ізолюючу здатність для гальмування випаровування. Тому, для покращення ізоляції більш легкозаймистих рідин за допомогою ПС необхідне утворення на його зовнішній поверхні щільного ізолюючого шару, наприклад, у вигляді гелю.

Типовим плавучим засобом охолодження поверхні рідин є варіанти подачі твердого діоксиду карбону CO_2 ($-78,4\text{ }^\circ\text{C}$) [7], що створює можливість зменшити зону загазованості, запобігти вибуху або контамінації повітря. Твердий CO_2 зазвичай отримують у вигляді снігу, але він відразу сублімує, тому не повністю реалізує власну охолоджуючу здатність по відношенню до горизонтальної поверхні. Гранули CO_2 мають більшу густину, ніж рідини, тому осідають на дно. Гранули більші за $0,5 \times 1,5$ см головним чином забирають тепло в нижній частині резервуару та виділяють негорючий газ, що охолоджує увесь об'єм та поверхню за рахунок перемішування шарів рідини; негорючий газ надалі флегматизує полум'яне горіння над поверхнею [7]. Але цей механізм підходить для припинення горіння менш легкозаймистих рідин. Гранули менші за $0,5 \times 1,5$ см внаслідок ефекту «кипіння» за інтенсивного газовиділення піддаються флотації на поверхню, де гранула починає «бігати» та втрачати масу аж до зникнення частинки. Процес занурення гранули трохи підвищує ефективність механізму охолодження поверхні, але недостатньо. Крім того, гранула капсулюється охолодженою рідиною, що загусла. Недоліком такого засобу також є те, що CO_2 є парниковим газом.

Вода має більшу густину, ніж більшість рідин, тому для охолодження поверхні поки не використовується (крім «легкої води», яка утримується на поверхні у вигляді плівки; але її використання є екологічно неприйнятним за [3]). Тому існує необхідність шукати нові плавучі охолоджуючі засоби.

Ефект охолодження у процесах пожежогасіння є найбільш універсальним, оскільки маса речовини, що подається у зону горіння, у будь-якому разі створює охолоджуючий ефект, який приймає участь у загальному механізмі припинення горіння за умови використання даної вогнегасної речовини. Тому, якщо домінуючим ефектом пожежогасіння є ізоляція, розбавлення або інгібування, можна го-

ворити про наявність означеної додаткової дії. Для плавучих засобів охолоджуючий ефект виникає за умови, коли температура ізолюючого шару менша за температуру рідини або присутні певні ендотермічні ефекти. Охолоджуючу дію ПС можна посилити за рахунок змочування водою [13] або попереднього охолодження у рефрижераційних системах. Бажаний баланс ізолюючих та охолоджуючих властивостей плавучих засобів гальмування випаровування на даний час докладно не вивчено. Тому цей науковий напрямок потребує подальших досліджень.

Проведений аналіз досліджень, присвячених гальмуванню випаровування рідин показав, що у них переважає однобічний підхід до вирішення цього питання, що проявляється у використанні або ізолюючих, або охолоджуючих ефектів. Вказані роботи не розглядають внески та бажаний баланс цих ефектів, а також їх вплив на зменшення концентрації пари та зони загазованості.

Таким чином, потребує вирішення наукова проблема вдосконалення засобів керування розмірами зони загазованості. Вирішення даної проблеми передбачає проведення досліджень щодо встановлення частки охолоджуючої та ізолюючої дії на рідину для досягнення ефекту зменшення зони загазованості шляхом аналізу типових та перспективних засобів відповідної дії. У даній роботі зосереджено увагу на таких перспективних засобах сповільнення інтенсивності випаровування рідин як піноскло та неорганічні гелі.

3. Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є встановлення балансу внесків охолоджуючих та ізолюючих властивостей плавучих засобів, призначених для гальмування випаровування рідин та забезпечення безпечних концентрацій пари, у залежності від значень характерних температур та водорозчинності.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення наступних завдань:

- дослідити ефект гальмування випаровування піносклом та гелем за умови ізоляції поверхні полярних та неполярних рідин;
- дослідити ефект охолодження поверхні полярних та неполярних рідин за подавання плавучих систем на основі зернистого піноскла.

4. Матеріали та методи дослідження

Дослідженню підлягають такі відомі системи пожежогасіння рідин, як ПС та неорганічні гелі, а також такі процеси, які забезпечуються цими засобами, як охолодження поверхні та ізоляція випаровування. Кращу ізоляцію забезпечують гелі, але вони не мають плавучості. Саме ПС можна використовувати для створення бінарного плавучого ізолюючого засобу [15]. Даний засіб має узагальнену охолоджуючо-ізолюючу властивість, яку можна використовувати для гальмування випаровування рідин як під час пожежогасіння, так і для зменшення розмірів зони загазованості. Але кожний компонент даного бінарного засобу має власну охолоджуючу та ізолюючу здатність. Тому для встановлення потрібного балансу цих властивостей необхідно дослідити їх окремий внесок та у сукупності. Крім того, відоме різне поведіння засобів пожежогасіння на поверхні полярних та неполярних рідин.

На першому етапі досліджень ізолювали процес випаровування полярних та неполярних рідин шаром гелю без ПС. Гель утворювали шляхом одночасного розпилювання розчинів рідкого скла та хлористого кальцію. Гель наносили на сіт-ку з розміром комірок 1 мм. Фіксували зменшення маси ємності з рідиною у часі та

за різних температур середовища. Розраховували коефіцієнт гальмування випаровування як відношення зменшення маси рідини з вільної поверхні до зменшення маси рідини за подачі гелю, який утворювали з різною витратою.

На другому етапі досліджень ізолювали випаровування бінарним шаром «гель+ПС» за умови нанесення гелю на плавучий шар дробленого ПС. Ізоляцію може забезпечити листове ПС, але його незручно подавати та розташовувати по поверхні рідини для надійної ізоляції, тому зазвичай досліджують використання дробленого закритопористого ПС фракції 1–1,5 см [13]. Причому сам шар ПС товщиною до 4 см не має ізолюючих властивостей, а за бінарного засобу «гель+ПС» шар ПС притоплюється і теж не має ізолюючих властивостей.

На третьому етапі досліджень визначали охолоджуючі властивості ПС по відношенню до полярних та неполярних рідин, а також відповідну дію бінарних засобів «гель+ПС» та «ПС+вода». Вимірювали зменшення температури поверхні рідин за подачі на означених систем. У якості кінцевого результуючого досліді проводили гасіння шаром ПС полярних та неполярних рідин з близькими характеристиками (M , $t_{\text{кип}}$, $t_{\text{сп}}$) для з'ясування показника, що надає найбільшу кореляцію зі значенням вогнегасного шару ПС.

5. Дослідження ізолюючої складової при гальмуванні випаровування

Стосовно співвідношення охолоджуючої та ізолюючої складової певних засобів по відношенню до поверхні рідин необхідно зауважити наступне. По-перше, засіб, що контактує з поверхнею рідини та має меншу температуру, буде створювати охолоджуючий ефект. По-друге, більшість ізолюючих речовин подають на поверхню з температурою навколишнього середовища. В той же час, $t_{\text{сп}}$ багатьох легкозаймистих рідин є меншою. Тому звичайні засоби пожежогасіння можуть охолодити поверхню у кращому випадку до стандартної температури, що надає лише часткове гальмування випаровування. Достатнє гальмування випаровування для таких рідин без застосування ізолюючих систем з поширених засобів створює лише твердий CO_2 , температура якого є меншою, ніж $t_{\text{сп}}$ будь-яких рідин та температура плавлення $t_{\text{пл}}$ багатьох рідин (хоча для деяких речовин навіть у твердому стані зберігається випаровування у небезпечних концентраціях, наприклад, у бензену [16]). Але досягнення такої температури та сам процес виділення CO_2 потребує значних енергетичних та матеріальних затрат. По-третє, засіб охолодження поверхні повинен бути легшим за рідину, що горить, тобто бути плавучим. У будь-якому разі за зменшення температури поверхні або усього об'єму рідини зменшується інтенсивність випаровування.

Стандартним параметром гальмування випаровування для пін є ізолююча здатність, яку визначають за найменшим шаром піни, що запобігає запалюванню, або за часом за який над піною даної товщини утворюється нижня КМПП пари [6]. Але гальмування випаровування можна тестувати й за зміною інтенсивності випаровування за подачі певних засобів. У разі відкритого простору інтенсивність випаровування має відмінність у значеннях залежно від температури рідини та висоти вільного борту, що показує формула Стефана (інтенсивність випаровування оберненопропорційна відстані від рідини до краю борту) [17]. За випаровування крізь ізолюючий шар до означених ефектів додаються властивості цього шару та рідини, що випаровує: водорозчинність, змочувальна здатність до поверхні (змінюється площа змоченої рідиною поверхні ПС), швидкість дифузії парів, температура шару, дисперсність плавучого шару або пін. Для характеристики інтенсивності створення небезпеки за фактичної площі аварійного розливу можна

використовувати параметр «швидкість випаровування».

Зведених даних щодо інтенсивності випаровування широкої номенклатури рідин за різних температур існує небагато. У якості інтенсивності випаровування за температур близьких до температури кипіння можна також використовувати параметри «інтенсивність вигорання» та «масова швидкість вигорання» $v_{m(b)}$. При цьому $v_{m(b)}$ можна умовно вважати граничним випадком $v_{m(e)}$ для випадку температури кипіння рідини. Встановлено, що $v_{m(e)}$ для бензину за стандартних умов виявляється приблизно на два порядки меншою за $v_{m(b)}$ [15]. Але існує відмінність у теплових умовах знаходження рідини, що буде впливати на розбіжності вказаних показників. Основна відмінність між параметрами $v_{m(b)}$ та $v_{m(e)}$ полягає у тому, що на процес вигорання впливає інтенсивність теплового потоку від полум'я до поверхні рідини, яка змінює процес випаровування. На інтенсивність випаровування навіть в одному гомологічному ряду також впливає явище парних-непарних молекул за кількістю атомів карбону у ланцюзі вуглеводню. Наприклад, зигзагоподібна залежність спостерігається для $v_{m(b)}$ в гомологічному ряду як алканів, так й нормальних жирних спиртів [18, 19].

Тому, було проведено вимірювання ефекту гальмування випаровування шаром гелю (нанесеним на сітку над поверхнею рідини) за параметром «коефіцієнт гальмування випаровування» (K_1 – за годину, K_{24} – за добу) на прикладі рідин з різною розчинністю у воді за температур 15–25 °С. В досліді шляхом кінцевого зважування визначалась втрата маси ємності з рідиною або ємності з рідиною та ізолюючим шаром гелю після заданого часу витримання. В таблиці 1 наведено встановлені параметри K_{24} для органічних рідин за стандартних умов й витрати нанесення гелю 0,4 г/см², а також дані щодо температур кипіння $t_{кип}$, плавлення $t_{пл}$ та спалаху $t_{сп}$, розчинності рідин у воді та необхідного безпечного рівня фактичної концентрації пари за показниками ГДК та НКМПП.

Табл. 1. Характеристики досліджуваних рідин [16] та коефіцієнт К для гелю

Рідина (М)	Розчинність	K_{24} за 25 °С	Температура, °С			НКМПП, %	ГДК _{рз} (клас)	
			$t_{пл}$	$t_{сп}$	$t_{кип}$		%	мг/м ³
Бензин (100*)	~0	26	-60*	-30*	190*	0,76–1,3	0,0034	100 (IV)
ізопропанол (60)	необмеж.	2,5	-89,5	14	82,3	2,23	0,0004	10 (III)
ізопентанол (86)	2,7	3	-117,2	43	131,1	1,46	0,0092	360 (IV)
метанол (30)	необмеж.	2,5	-98	6	64,9	6,98	0,00038	5 (II)
дихлоретан (99)	0,86	12	-35,5	9	83,5	5,6	0,00025	10 (II)
бензол (78)	0,18	31	5,6	-11	80,1	1,43	0,00015	5 (II)

* – умовні усереднені значення.

Як свідчать наведені дані, граничні параметри запалювання та токсичності пари наведених рідин відрізняються на 3–4 порядки.

Зміна інтенсивності випаровування рідин крізь ізолюючий шар гелю має багато факторів впливу, які у свою чергу залежать від властивостей рідини, що контактує з засобом ізоляції, наявності ПС, товщини та цільності шару гелю, температури середовища. Щоб частково зменшити такий різноманітний вплив на процес ізоляції для подальшого дослідження параметру К, було обрано рідини з близькими $t_{кип}$: бензен – 80,1 °С, ізопропанол – 83,5 °С, 1,2-дихлоретан – 82,3 °С. Але вказані рідини мають різні $t_{пл}$ та $t_{сп}$, що говорить про різну залежність тиску насиченої пари від температури та НКМПП. Більш того, бензен має $t_{сп}$ меншу за $t_{пл}$,

тобто він добре випаровує (сублимує) ще з твердого стану. Повні результати дослідження механізму ізолювання в часі (τ) процесу випаровування гелевим шаром за витрат нанесення (F) до $0,4 \text{ г/см}^2$ для рідин з різною водорозчинністю (W), але близьким значенням $t_{\text{кип}}$, показано на рис. 1.

З експериментальних даних, наведених на рис. 1, можна зробити висновок, що гелі, як і піни загального призначення краще ізолюють водонерозчинні рідини. Тобто, гель, як водовмісний засіб, транспортує крізь себе водорозчинні рідини від області з меншою концентрацією в область з більшою концентрацією. Це зменшує K з 30 для неполярних рідини до 4 для полярних. Для запобігання такого ефекту можна використати рішення, яке застосовують для утворення спеціальних пін з гасіння полярних рідин: додавання полісахаридів у розчини перед утворенням гелю. Для полярних рідин позитивну дію означеної бінарної системи можна позначити як стабільне у часі гальмування випаровування.

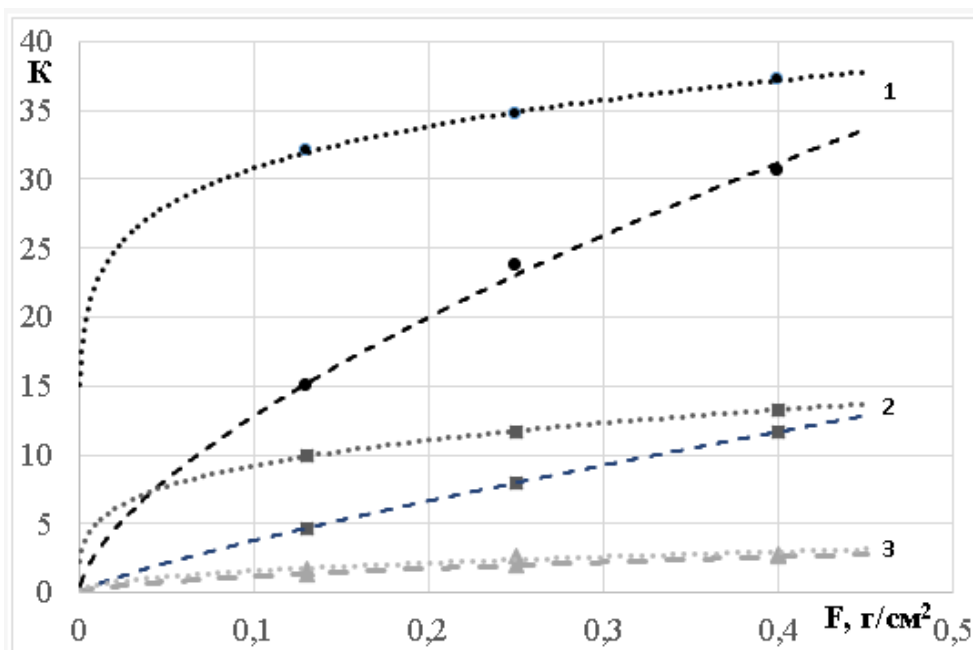


Рис. 1. Коефіцієнт гальмування випаровування гелем для рідин з різною водорозчинністю: 1 – бензен, 2 – 1,2-дихлоретан, 3 – ізопропанол; \cdots – 1 год, $- -$ 24 год

Наступним висновком аналізу графіків на рис. 1 є те, що показник K зі збільшенням часу витримання зменшується. Також необхідно зауважити, що через добу витримання шару гелю, отриманого з малою витратою подачі ($0,1 \text{ г/см}^2$), його ізолююча здатність за параметром K зменшується приблизно у два рази. Але за витрати $0,45 \text{ г/см}^2$ такий ефект вже менший та становить до 25 %. Також аналіз залежностей для гальмування випаровування гелем дозволяє передбачити, що збільшення витрати подавання до $0,45 \text{ г/см}^2$ мінімізує втрату у часі ізолюючої здатності гелевого шару за випробувань протягом доби. Тенденції, відображені на рис. 1, свідчать, що за витрат подавання гелю більших за $0,45 \text{ г/см}^2$ різниця між параметрами K_1 та K_{24} буде у межах похибки вимірювання.

Отримані дані можна апроксимувати ступеневими залежностями: для бензолу – $K_1=42,101F^{0,1356}$ та $K_{24}=56,115F^{0,6412}$; для 1,2-дихлоретану – $K_1=16,882F^{0,2622}$ та $K_{24}=24,551F^{0,811}$; для ізопропанолу – $K_1=4,5223F^{0,4587}$ та $K_{24}=4,4416F^{0,5787}$. Дані залежності у свою чергу можна узагальнити наступною формулою:

$$K = (10^{-4})^F + \left(4,44 + \frac{\tau^{0,12}}{0,09W^{2,5} + 0,026} \right) F^{0,11 + \left(0,45 - \frac{0,6579}{(0,6W^{1,5} + 1,5)} \right) \tau^{\left(\frac{0,45}{0,5W + 0,37} \right)}} \quad (1)$$

яка прогнозує коефіцієнт гальмування випаровування для рідин з різною водорозчинністю за температур 15–25 °С та витрат утворення гелю до 0,45 г/см² з кореляцією R=0,998 й середнім відхиленням у 0,52 відносні одиниці (за «К» до 40).

Вплив температури на досліджуваний процес виявився неоднозначним. Для аналізу виявлених явищ отримані дані наведено у вигляді залежностей на рис. 2, на яких показано зміну параметрів К відносно цього показника за температури 15 °С; тому для усіх рідин за цієї температури відносний коефіцієнт гальмування випаровування склав k=1.

Очікувалось, що для температури рідини 15 °С коефіцієнти K₁ та K₂₄ будуть більшими ніж для температур 20 та 25 °С, за яких дифузія повинна відбуватися інтенсивніше. Але така залежність спостерігається не для всіх речовин, що можна пояснити не однаковими змінами у надмолекулярній будові різних рідин за однакової зміни температури. Хоча t_{кип} рідин, обраних для порівняння, приблизно однакові, в них сильно різняться t_{пл}. Це говорить про різний коефіцієнт кластеризації. Так, нами була запропонована відповідна залежність з використанням показника «легкість плавлення» n_M=n_{сєкв}M^{0,2} [19], що дозволяє прогнозувати коефіцієнт кластеризації: t_{пл}=101,85ln(n_M)-452,37, °С. Тоді t_{пл} бензену (5,6 °С) передбачає будову гексамеру, для 1,2-дихлоретану та ізопропанолу можна запропонувати будову тетрамеру (що корелює з даними спектрального аналізу [20]), але перший з них має значно більшу молярну масу.

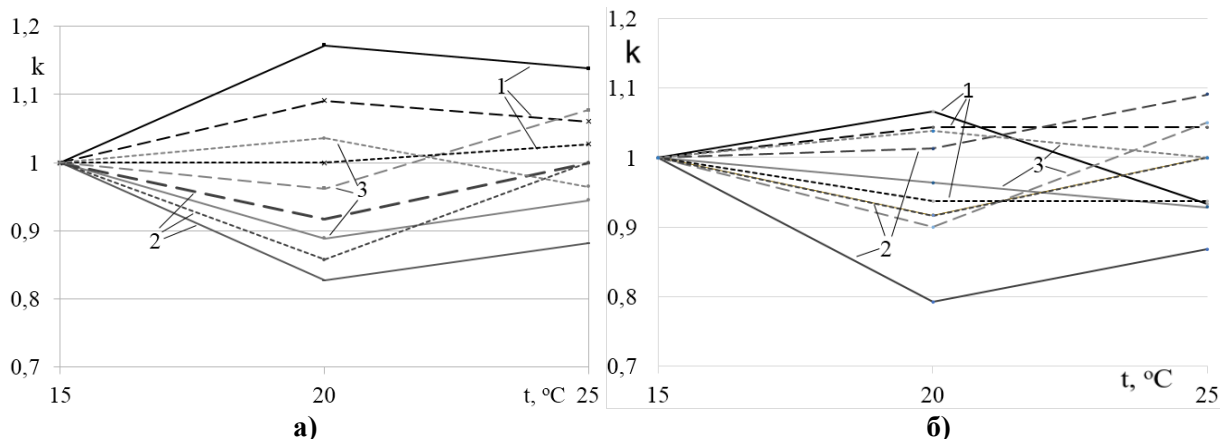


Рис. 2. Зміна відносного коефіцієнту гальмування випаровування гелем за температур 15, 20 та 25 °С: 1 – бензен, 2 – 1,2-дихлоретан, 3 – ізопропанол; витрата утворення гелю: — — — — 0,13 г/см², — — — — 0,26 г/см², — — — — 0,4 г/см²

На відміну від модельного нанесення гелю на сітку, за тих самих витрат для випадку плавучого зернистого носія (піноскло) суцільного шару гелю не утворюється внаслідок нерівності зовнішньої поверхні [15]. Тому, для досягнення того самого ізолюючого ефекту необхідні збільшені витрати утворення гелю. Так, до витрати нанесення гелю 0,6 г/см² спостерігається повільне зростання показника К, а за більших витрат – різке зростання, що свідчить про зміну механізму ізоляції. За малих значень F можна говорити про наявність не перекритих гелем каналів випаровування між частинками ПС, а за більших – про утворення суцільного шару гелю. Тоді перша частина цієї залежності відбиває посилення ізолюючої дії

за рахунок звуження каналів випаровування між часинками ПС, а друга – збільшення шару ПС. У момент формування суцільного шару гелю досягається значення показника $K=20$, а за шару гелю більше за 1,5 мм – більше за 30, що співпадає з даними отриманими щодо утворення суцільного шару гелю на сітці, рис. 1. Відповідність існує тому, що за притоплення шаром гелю ПС його ізолююча дія зникає, і він виконує лише роль плавучого носія з наявністю охолоджуючої дії. Експериментальні дані описує залежність: $K=0,986 \cdot 1,092^{50F}$ з $R^2=0,977$. Найбільш тривалий та якісний ізоляційний ефект забезпечує вогнегасна система, яка складається з зернистого ПС фракції 1–1,5 см шаром 15 см та гелю з суцільним шаром 1,5 мм, який утворюється за інтенсивності подавання компонентів $0,8 \text{ г/см}^2$. У досліді також встановлено, що шар сухого ПС 4 см майже не гальмує випаровування бензину ($K \approx 1$).

6. Дослідження охолоджуючої складової при гальмуванні випаровування

Якщо порівняти застосування ПС для охолодження поверхні рідини з дією твердої вуглекислоти, піни, твердіючої піни або «легкої води», то охолодження реалізується більш ефективно саме у разі ПС. Це спостерігається тому, що тверда вуглекислота, піна та «легка вода» контактують лише з зовнішньою поверхнею рідини. Крім того, тверда вуглекислота у вигляді «снігу» або «гранул у киплячому шарі» після фазового переходу втрачається у навколишній простір ще у холодному стані. Тобто вона не повною мірою реалізує власну охолоджуючу здатність. Затримання флотації гранул твердої вуглекислоти на поверхню реалізується за їх більшого початкового розміру. Але при цьому охолоджувати доводиться весь об'єм рідини.

З засобів охолодження поверхні рідини, які занурюються частково, твердіюча піна у момент подачі притоплюється лише на 20 % [21], сухе ПС – на 40–60 %, змочене – на 60–80 % [15]. Тобто можна очікувати, що більша охолоджуюча здатність буде у ПС внаслідок більшого за площею контакту з прогрітим шаром рідини. Також необхідно відзначити, що за охолодження поверхневого шару він починає занурюватись й температура поверхні усереднюється. За охолодження ПС, його занурена частина створює дифузійні ускладнення для перемішування рідини вглибину. Тому можна досягти більшої ефективності охолодження саме поверхневого шару. Впровадження змочування ПС крім більш глибокого занурення надає важливий внесок в ефект охолодження у вигляді тепловтрат від прогрітого шару рідини на нагрів та випаровування маси води. Недоліком твердіючої піни на даний момент є те, що вона у твердому стані є горючою речовиною, тому більше підходить не для пожежогасіння, а для ізоляції аварійних розливів рідин.

Дослідним шляхом визначено охолоджуючу дію сухого та вологого ПС з товщиною плавучого насипного шару 12 см за його подачі на поверхню розігрітої полярної та неполярної рідини з близькими $t_{\text{кип}}$ (н-октанол – 195 °С, н-додекан – 216 °С [16]), рис. 3.

Дані графіку показують більші охолоджуючі властивості змоченого ПС у 5–6 разів. Не зважаючи на різні ефекти охолодження рідини за умови застосування сухого та змоченого ПС, різниця для цих засобів у разі подачі на поверхню н-октанолу та н-додекану (Δt) залишається приблизно однаковою, що говорить про наявність певного стабільного теплового ефекту. Таке явище можна пояснити тим, що октанол має більшу теплоту випаровування (71 проти 65 кДж/моль при 25 °С [16]). Крім того, хо-

ча розчинність н-октанолу у воді не висока, розчинність додекану у воді настільки мала, що нею можна нехтувати. Це означає, що вода, розчиняючись та змішуючись з октанолом, буде прискорювати та посилювати охолоджуючий ефект для поверхневого шару.

Охолоджуючий ефект вологого ПС по відношенню до н-додекану у діапазоні температур 80–160 °С можна описати рівнянням $\Delta t = 12,2e^{0,0172t-1}$ °С з $R=0,998$; для н-октанолу дане рівняння набуває вигляду $\Delta t = 12,2e^{0,0172t-1}$ °С з $R=0,9966$; або, враховуючи незначну різницю між даними залежностями можна у якості загальної формули застосувати вираз для н-додекану з $R=0,9966$.

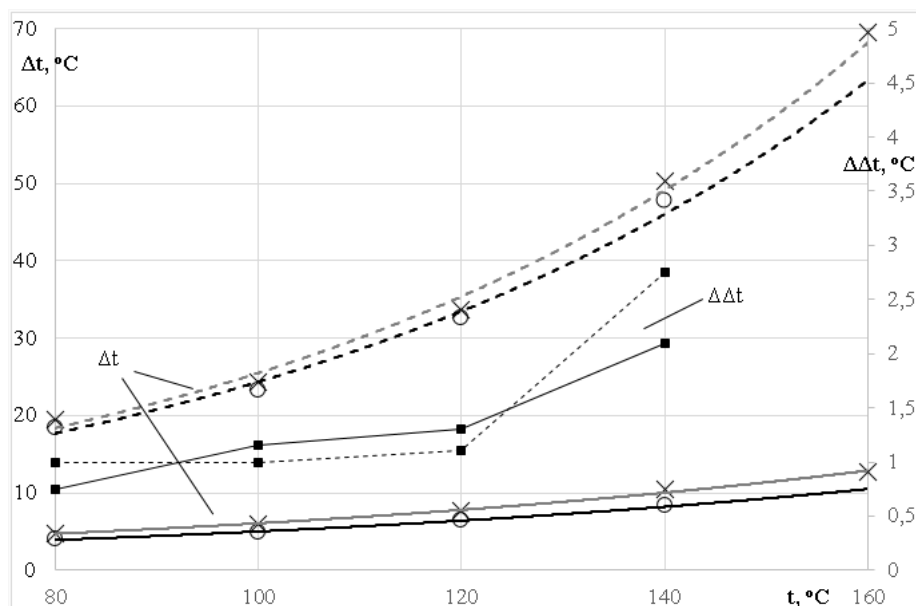


Рис. 3. Охолодження поверхні нагрітій полярної та неполярної рідини сухим (суцільна лінія) та вологим (пунктирна лінія) піносклом: × – н-додекан, o – н-октанол

Охолоджуючий ефект сухого ПС по відношенню до н-додекану у діапазоні температур 80–160 °С можна описати рівнянням $\Delta t = 4,4e^{0,013t-1}$ °С з $R=0,997$; для н-октанолу дане рівняння набуває вигляду $\Delta t = 3,8e^{0,013t-1}$ °С з $R=0,998$; у якості загальної формули працює вираз $\Delta t = 4,1e^{0,013t-1}$ °С з $R=0,967$.

У досліді також встановлено, що додавання вогнегасного шару гелю на ПС змінює його охолоджуючу здатність в межах похибки. Так, для додекану охолоджуюча здатність сухого ПС менша ніж для сухого ПС з шаром гелю з максимальним відхиленням не більше 0,3 °С та з середнім відхиленням 0,18 °С; охолоджуюча здатність змоченого ПС менша ніж для змоченого ПС з шаром гелю з максимальним відхиленням не більше 0,75 °С та з середнім відхиленням 0,39 °С. Для н-октанолу охолоджуюча здатність сухого ПС менша ніж для сухого ПС з шаром гелю з максимальним відхиленням не більше 0,1 °С та з середнім відхиленням 0,06 °С; з охолоджуюча здатність змоченого FG менша ніж для змоченого ПС з шаром гелю з максимальним відхиленням не більше 0,25 °С та з середнім відхиленням 0,21 °С. Це пояснюється тим, що описаний режим подачі ПС та гелю забезпечував ізолюючу функцію гелю, яка зберігається лише за умови відсутності контакту гелю з поверхнею горючої рідини.

Таким чином, саме комбінація охолоджуючих та ізолюючих властивостей вогнегасного засобу визначає ефективність застосування найбільш ефективних засобів гасіння пожеж рідин, а також зменшення зони загазованості аварійних ро-

зливів токсичних рідин, що повинно проявлятися у зменшенні $v_{m(e)}$ або $v_{m(b)}$.

На рис. 4 показано зменшення $v_{m(b)}$ для висококиплячої полярної і неполярної рідин (додекан та гептанол) за рахунок подачі ПС. Вказані рідини мають близькі $t_{сп}$: 77 °С та 74 °С; але різні $t_{кип}$: 216 °С та 176 °С, а також молярні маси – 170 та 116 г/моль. Для можливості проведення аналізу на графіку також наведено дані з ізоляції випаровування декану, який має $t_{сп}=47$ °С, $t_{кип}=174$ °С (що близько до гептанолу), молярну масу – 142 г/моль. На графіку також наведено дані щодо гасіння октану, який має молярну масу близьку до гептанолу – 114 г/моль, але інші характерні температури $t_{сп}=14$ °С, $t_{кип}$ 126 °С. Нульове значення $v_{m(b)}$ на графіках показує ефект гасіння та вогнегасний шар гранульованого ПС, достатній для цього. Додаткова дія ПС полягає в екрануванні поверхні рідини від прогріву тепловим випромінюванням полум'я.

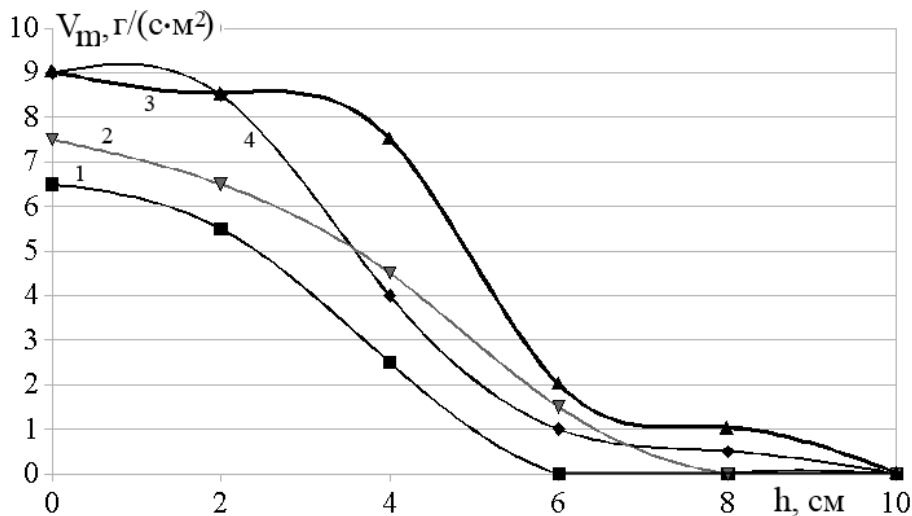


Рис. 4. Зменшення масової швидкості вигорання полярних та неполярних рідин при нарощуванні шару піноскла: 1 – н-додекан; 2 – н-декан; 3 – н-октан; 4 – н-гептанол

Наведені дані показують, що близькість $t_{сп}$ додекану та гептанолу не створили однаковості вогнегасного шару ПС. Близькість $t_{кип}$ декану та гептанолу наблизила графіки зменшення $v_{m(b)}$, але менша молярна маса та різні кути змочування ПС визначили те, що $v_{m(b)}$ з вільної поверхні для декану має менше значення, а гасіння спостерігається за меншого шару ПС. Ці параметри виявились однаковими для н-гептанолу з октаном, які близькі за молярною масою. Притоплення сухого піноскла гелем надає додатковий охолоджуючий ефект. По відношенню до застосування сухого ПС впровадження змочування збільшує охолоджуючий ефект у 5–6 разів та дозволяє зменшити вогнегасний шар ПС на 2–3 см.

Таким чином, визначальним параметром, яким характеризують необхідність застосування цільових вогнегасних засобів з певною інтенсивністю подавання для гасіння рідин є не температура спалаху, як прийнято використовувати, а $t_{кип}$ та молярна маса. Така залежність спостерігається тому, що інтенсивність випаровування під час горіння та витрата засобів гасіння на ізоляцію та охолодження поверхневого шару пов'язані саме з цими параметрами. $t_{кип}$ важлива тому, що у момент початку гасіння рідина має таку або близьку температуру. У той же час, $t_{сп}$ за сенсом є температурою формування НКМПП пари за зберігання рідини, а не фактором інтенсивності випаровування під час вигорання (НКМПП для більшості рідин лежить у межах 1–3 %).

7. Обговорення результатів дослідження ізолюючої та охолоджуючої складової при гальмуванні випаровування

Якими б не були ізолюючі та охолоджуючі засоби, їх дія проявляється у зменшенні інтенсивності випаровування, що можна протестувати за коефіцієнтом гальмування випаровування K , який встановлюють за ступенем зменшення масової швидкості випаровування $v_{m(e)}$ або вигорання $v_{m(b)}$. Супутнім ефектом подачі таких засобів може бути зменшення температури поверхні рідини, якщо температура засобу є меншою, а також застосовано певні ендотермічні ефекти.

Головною різницею у застосуванні плавучих засобів гальмування випаровування є властивості рідини, яку ізолюють: легкість кипіння ($t_{\text{кип}}$ менша або більша за 100 °C), полярність, водорозчинність. Бажано було б мати єдиний засіб для ефективного охолодження або ізоляції поверхні цих рідин. Таким плавучим засобом виглядає піноскло (ПС), але воно має низьку ізолюючу та охолоджуючу здатність. Ізолюючу здатність ПС запропоновано підвищувати шляхом ущільнення його поверхні неорганічними гелями; охолоджуючу – шляхом змочування водою. Одночасне використання цих заходів виявилось неефективним, оскільки змочене ПС має меншу плавучість. Стосовно подавання означених бінарних засобів на поверхню полярних та водорозчинних рідин, то було виявлено схожі проблеми з пінним пожежогасінням стандартними засобами. Так, піни загального призначення руйнуються на поверхні таких рідин, що вимагає додавання полісахаридів. Гель, як водовмісний засіб, та змочене ПС повинні були зіткнутися з аналогічною проблемою.

Перевірка ізолюючої здатності гелю для полярних та неполярних рідин з різною водорозчинністю, але близькими температурами кипіння підтвердило таке припущення. Серед досліджених рідин бензол, як найменш водорозчинна рідина, отримав найбільший коефіцієнт гальмування випаровування (близько 30), ізопропанол, як необмежено розчинна у воді рідина, – найменший (до 3). В останньому випадку застосування даної ізолюючої системи стає мало ефективним. Однак таке гальмування випаровування виявилось стійким у часі, що зберігає можливість застосування цього засобу й для полярних рідин.

Слід зауважити, що повністю ідентичні умови для проведення даного дослідження забезпечити важко. Це виникає внаслідок суттєвої різниці обраних рідин за $t_{\text{пл}}$ (див. табл. 1), тому у діапазоні досліджуваних температур 15–25 °C досліди було проведено у різних частинах шкали тиску насиченої пари. Для бензену це 50–58 % цієї шкали, для 1,2-дихлоретану – 42–51 %, ізопропанолу – 60–67 %, тобто випаровування відбувається у різних частинах графіку зростання тиску насиченої пари від температури. Пара бензену створює тиск 20–25 кПа, 1,2-дихлоретану – 5–10 кПа, ізопропанолу – 1,3–4 кПа [6]. Тобто дифузія молекул рідин крізь водовмісний ізолюючий шар здійснювалася за різного тиску насиченої пари, тобто створювався різний тиск на систему ізоляції. Процес випаровування крізь водовмісний шар можна сформулювати й наступним чином: водорозчинна рідина, яка випаровує, утворює над поверхнею ізолюючого водовмісного шару концентрацію пари пропорційно до її вмісту в утвореному розчині. Скоріше за все працюють обидва механізми проходження пари, але чим товщій водовмісний ізолюючий шар, тим більшою стає частка другого механізму. Стосовно процесу ізоляції піною можна зауважити, що у кожному шарі бульбашок за висотою піни встановлюється концентрація пари пропорційна до компонентного складу попереднього рідкого ізолюючого шару плівки бульбашки.

Наближеність чи віддаленість досліджуваних температур від $t_{пл}$ означає наявність у рідині різної кількості надмолекулярних утворень різного розміру у вигляді кластерів (чим ближча температура рідини до $t_{пл}$, тим більша кількість цих структур). Від температури для різних рідин також існує різна залежність зміни змочуваності рідиною ПС, зміна розчинності у воді; наявність більш крупних кластерів буде гальмувати їх дифузію крізь гель. Певним чином у даному температурному діапазоні змінюються й властивості води. Крім того, можна очікувати, що гель буде створювати об'ємну «сітку», яка для певних молекул або кластерів може виконувати функцію селективної мембрани.

Перевірка охолоджуючої здатності ПС для полярних та неполярних рідин з різною водорозчинністю, але близькими $t_{кип}$ показало відсутність впливу водорозчинності. Але суттєва різниця помічена у разі подавання сухого або змоченого ПС. Так, $t_{сп}$ *n*-додекану становить 77 °С, *n*-октанолу – 81 °С [16]. Охолоджуючого ефекту сухого ПС 4–12 °С достатньо для гасіння означених рідин лише у разі, якщо їх температура незначно перевищує $t_{сп}$. Охолоджуючого ефекту вологого ПС 20–70 °С повністю достатньо для гасіння означених рідин, якщо їх температура менша за 110 °С (110 – 30=80 °С, а 160 – 70=90 °С, рис. 3). Але гасіння змоченим ПС досягається і за більших температур рідин. Цей ефект пояснюється як наявністю у ПС власних ізолюючих властивостей, так й ефектом флегматизації полум'я парою води, що інтенсивно випаровує з ПС. У такому разі горіння припиняється раніше, ніж поверхневий шар рідини встигає охолотитись до температури спалаху.

Однак означеного охолоджуючого ефекту недостатньо для ефективного гальмування випаровування легкокиплячих рідин, особливо для досягнення нетоксичних концентрацій пари. Так, у разі застосування охолоджуючого засобу для припинення горіння, вільну поверхню рідини необхідно охолодити до температури меншої за $t_{сп}$ (для бензину по гексану – це «–35 °С»); для забезпечення нетоксичних концентрацій – до температур близьких до $t_{пл}$ (для бензину по гексану – це «–95 °С»); а для деяких рідин – навіть до менших температур, ніж $t_{пл}$ (так бензен має $t_{пл}=5,5$ °С, а НКМПП досягається за $t=-11$ °С).

Інтенсивність подавання вогнегасних засобів для гасіння пожеж класу «В» зазвичай оцінюють за значенням $t_{сп}$. Для з'ясування кореляції значення вогнегасного ізолюючо-охолоджуючого шару сухого ПС з характерними температурами рідин (спалаху, кипіння) було проведено додаткове дослідження з визначенням зменшення $v_{m(b)}$ високиплячих рідин за нарощування шару сухого ПС. Дослід показав, що близькі графіки отримано для рідин з близькими температурами кипіння або молярними масами. Відповідно, можна рекомендувати витрату подавання ПС за цими параметрами для полярних та неполярних рідин, які не потрапили в обсяг дослідження. Хоча $t_{сп}$ є цільовою межею охолодження поверхні.

За пожежі класу «В» поверхня рідини має $t_{кип}$, за якої концентрація насиченої пари – 100 %, а за температури спалаху – дорівнює НКМПП. Тому, бажаний мінімальний коефіцієнт гальмування випаровування для гасіння рідини буде відношенням $100/\varphi_n$. Якщо для гальмування випаровування застосовується ізолюючий засіб, що контактує з поверхнею речовини, то він буде створювати й охолоджуючий ефект, що буде мати свою частку у параметрі К. Наприклад, для гасіння бензину з $\varphi_n=1$ % необхідно забезпечити $K=100/1=100$; для гасіння метанолу $\varphi_n=6,98$ %, $K=100/6,98=14,3$. Ефект охолодження залежить від типу охолоджуючого засобу та властивостей рідини. Так, змочене ПС охолоджує поверхню рідини на 20–70 °С. Для бензину охолодження лише на 20 °С зменшує тиск насиченої пари до 53 кПа, тоді необхідно забезпечити $K=53/1=53$.

Для забезпечення не токсичних концентрацій K необхідно відлічувати від концентрації пари, яка відповідає температурі зберігання рідини. Так, за стандартних умов для бензину концентрація насиченої пари становить 27 %, тоді, оскільки $\Gamma ДК_{рз}=0,0034$ %, необхідно забезпечити $K=27/0,0034=7941$; для метанолу за вказаних умов концентрація насиченої пари становить 17 %, та, оскільки $\Gamma ДК_{рз}=0,00038$ %, необхідно забезпечити $K=17/0,00038=44737$. Але, як було сказано, можна зосередитись не на відсутності токсичних концентрацій, а на зменшенні розмірів зони загазованості. Існують методики визначення часу утворення, рівня досягнутих концентрацій та розмірів зони загазованості за умови розливу рідини у приміщенні та на відкритому просторі [6, 17]. Якщо гасіння бензину досягається системою «піноскло 12 см +гель 0,2 г/см²», то забезпечується $K>53$, але через годину $K=37$, через добу $K=28$. Це набагато менше, ніж необхідно для повної ліквідації токсичного середовища. Але за розрахунком для відповідного сповільнення випаровування очікуваний габаритний розмір парогазової хмари бензину для площі аварійного розливу 100 м² зменшується протягом години випаровування з 2916 м до 593 м, що можна вважати розмірами, що входять у межі підприємства.

На підставі проведених досліджень розроблено формулу (1), яка прогнозує показник K у діапазоні до 40 для ізоляції гелем рідин з різною водорозчинністю за температур середовища 15–25 °С та витрат утворення гелю до 0,45 г/см². У подальшому для аналізу пожежогасіння рідин передбачається замість $v_{m(b)}$ враховувати теплоту пожежі, тобто кількість тепла, яка виділяється за даної інтенсивності вигорання. Відомо, що різні рідини мають різну масову теплоту згорання, яка пропорційно різною мірою буде підтримувати процес горіння, але на даний момент таке явище у практичних розрахунках не завжди враховують. Також не до кінця з'ясованим та поясненим залишилось те, що вогнегасний шар ПС для гептанолу та октану корелював не з температурою кипіння, а з молярною масою. Це явище можна також пояснити кластерною будовою речовини. Означені речовини мають близькі молярні маси (116 та 114 г/моль), але водночас мають й однакову довжину димеру – 16 [18, 19]. Але це питання потребує додаткового вивчення.

8. Висновки

1. Досліджено особливості ефекту гальмування випаровування піносклом та гелем за умови ізоляції поверхні полярних та неполярних рідин. Встановлено, що для гальмування випаровування легкокипячих рідин ефективніше застосовувати ізоляційні засоби, а для важкокипячих – засоби охолодження поверхневого шару. Встановлено, що шар піноскла 4 см майже не має ізолюючої дії, про що свідчить коефіцієнт гальмування випаровування K близький до «1». Ізоляцію слабозчинних у воді рідин забезпечує неорганічний гель. Найбільш тривалий та надійний ізоляційний ефект надає вогнегасна система, яка складається з зернистого піноскла фракції 1–1,5 см шаром 15 см та гелю з суцільним шаром 1,5 мм, який утворюється за інтенсивності подавання компонентів 0,8 г/см². Така система забезпечує для неполярних рідин показник $K=30$, для полярних рідин $K=4$, стабільний у часі. Розроблено формулу (1), яка прогнозує для ізоляції гелем показник K у діапазоні до 40 для рідин з різною водорозчинністю за температур середовища 15–25 °С та витрат утворення гелю до 0,45 г/см².

2. Досліджено особливості ефекту охолодження поверхні полярних та неполярних рідин за подавання плавучих систем на основі зернистого піноскла. Визначено, що гасіння легкокипячих рідин ефективніше здійснювати шляхом по-

давання ізолюючих засобів, а важкокиплячих – шляхом подавання охолоджуючих засобів. Найбільш надійними засобами для цього виявились системи на основі зернистого піноскла. Встановлено, що однаковий ефект пожежогасіння важкокиплячих рідин сухим піносклом досягається для рідин з близькою молярною масою. Так, молярна маса гептанолу становить 116 г/моль, а октану – 114 г/моль, тому їх гасіння забезпечується шаром сухого піноскла – 10 см. Досягнуто спрощення гасіння важкокиплячих неполярних рідин та підвищення ефективності гасіння полярних рідин за рахунок подачі піноскла у змоченому вигляді, що інтенсифікує охолодження поверхневого шару та додає ефект флегматизації полум'я парою води. По відношенню до застосування сухого піноскла впровадження змочування збільшує охолоджуючий ефект у 5–6 разів та дозволяє зменшити вогнегасний шар піноскла на 2–3 см. Доведено, що найбільш тривалий та якісний ізоляційний ефект забезпечує система, яка складається з зернистого піноскла фракції 1–1,5 см шаром 15 см та гелю з суцільним шаром 1,5 мм за інтенсивності формування 0,8 г/см².

Література

1. Semichaevsky S., Yakimenko M., Osadchuk M. Regarding emergency spillage of flammable liquids. Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Технічні науки. 2021. Т. 32(71). № 3. Р. 219–225. doi: 10.32838/2663-5941/2021.3/33
2. Saravanan R., Karunanithi T., Govindarajan L. A Risk Assessment Methodology for Toxic Chemicals Evaporation from Circular Pools. J. Appl. Sci. Environ. Manage. 2007. Vol. 1. P. 91–100. doi: 10.4314/jasem.v1i1i1.46841
3. Loboichenko V., Strelets V., Gurbanova M., Morozov A., Kovalov P., Shevchenko R., Kovalova T., Ponomarenko R. Review of Environmental Characteristics of Fire Extinguishing Substances of Different Composition used for Fires Extinguishing of Various Classes. Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. Vol. 14. P. 5925–5941. doi: 10.36478/jeasci.2019.5925.5941
4. Kireev A., Tregubov D., Safronov S., Saveliev D. Study Insulating and Cooling Properties of the Material on the Basis of Crushed Foam Glass and Determination of its Extinguishing Characteristics with the Attitude to Alcohols. Materials Science Forum. 2020. Vol. 1006. P. 62–69. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1006.62
5. Боровиков В. Гасіння пожеж у резервуарах для зберігання нафти та нафтопродуктів. Пожежна та техногенна безпека. 2015. № 11(26). С. 28–29. URL: <http://eom.com.ua/index.php/topic,16176.msg137533.html#msg137533>
6. Glassman I., Yetter R. A. Combustion. London: Elsevier, 2014. 757 p. doi:10.1016/C2011-0-05402-9
7. Korolov R., Kovalyshyn V., Shtajn B. Analysis of methods for extinguishing fires in reservoirs with oil products by a combined method. ScienceRise. 2017. № 6(35). P. 41–50. doi: 0.15587/2313-8416.2017.104613
8. Balanyuk V. M., Kozyar N. M., Garasymuyk O. I. Study of fire-extinguishing efficiency of environmentally friendly binary aerosol-nitrogen mixtures. Eastern-european journal of enterprise technologies. Technical science. 2016. № 3/10(71). P. 4–12. doi: 10.15587/1729-4061.2016.72399
9. Balanyuk, V., Kravchenko, A., Harasymyuk, O. Reducing the intensity of thermal radiation at the sublayer extinguishing of alcohols by ecologically acceptable aerosols. Eastern-european journal of enterprise technologies. Technical science. 2021. Vol. 1/10(109). P. 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2021.225216
10. Трегубов Д. Г., Тарахно О. В. Розбавлення пароповітряного простору парою негорючого компоненту. Проблемы пожарной безопасности. 2013. № 33.

C. 183–187. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/3205>

11. Pietukhov R., Kireev A., Tregubov D., Hovalenkov S. Experimental Study of the Insulating Properties of a Lightweight Material Based on Fast-Hardening Highly Resistant Foams in Relation to Vapors of Toxic Organic Fluids. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 374–382. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1038.374

12. Un procedimiento para la preparacion de un gel de poliacrilato sodico. Pat. ES 8901936: A62C 5/033, C09K 21/14. № 2 018 370; Fecha de presentacion: 02.06.89; Fecha de publicacion del folleto de patente: 01.04.91. URL: <https://patents.google.com/patent/ES2545370T3/es>

13. Dadashov I., Kireev A., Kirichenko I., Kovalev A., Sharshanov A. Simulation of the insulating properties of two-layer material. *Functional materials*. 2018. Vol. 25(4). C. 774–779. doi: 10.15407/fm25.04.774

14. Eom J. H., Kim Y. W., Raju S. Processing and properties of macroporous silicon carbide ceramics. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2013. Vol. 1(3). P. 220–242. doi: 10.1016/j.jascer.2013.07.003

15. Дадашов І., Кіреєв О., Трегубов Д., Тарахно О. Гасіння горючих рідин твердими пористими матеріалами та гелеутворюючими системами. Х.: НУЦЗУ, 2021. 240 с. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14033>

16. PubChem. Compound summary. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>

17. Bubbico R., Mazzarotta B. Predicting Evaporation Rates from Pools. *Chemical engineering transactions*. Servizi S.r.l. 2016. Vol. 48. P. 49–54. doi: 10.3303/CET1648009

18. Tregubov D., Tarakhno O., Deineka V., Trehubova F. Oscillation and Stepwise of Hydrocarbon Melting Temperatures as a Marker of their Cluster Structure. *Solid State Phenomena*. 2022. Vol. 334. P. 124–130. doi: 10.4028/p-3751s3

19. Трегубов Д., Шаршанов А., Соколов Д., Трегубова Ф. Прогнозування найменших надмолекулярних структур алканів нормальної та ізомерної будови. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. № 35. С. 63–75. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-5

20. Doroshenko I. Yu. Spectroscopic study of cluster structure of n-hexanol trapped in an argon matrix. *Low Temperature Physics*. 2017. № 3(6). P. 919–926. doi: 10.1063/1.4985983

21. Pietukhov, R., Kireev, A., Slepuzhnikov, E., Chyrkina, M., Savchenko, A. Lifetime research of rapid-hardening foams. *Problems of Emergency Situations*. 2020. № 1(31). C. 226–223. doi: 10.5281/zenodo.3901986

D. Tregubov¹, PhD, Associate Professor, Doctoral Student

O. Kireev¹, DSc, Professor, Professor of the Department

L. Trefilova¹, DSc, Senior Researcher, Professor of the Department

M. Chyrkina¹, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

I. Dadashov², DSc, Head of the Faculty

¹*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

²*Academy of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan*

ENSURING THE BALANCE OF PROPERTIES OF FLOATING SYSTEMS TO SLOW DOWN THE EVAPORATION OF HAZARDOUS LIQUIDS

The means properties contributions ratio designed to prevent the liquids evaporation and ensure safe vapor concentrations, depending on the values of characteristic temperatures and water solubility, was established. It is proven that limiting the vapor-gas cloud size is achieved by means of the liquid surface insulation or cooling. It is shown that only floating closed-pore solid materials (f.e., foam glass)

and solidifying foams can provide a prolonged effect of such means. Attention is focused on specified means disadvantages, such as the low insulating ability of the foam glass and insignificant cooling ability, and for foam that hardens – also the flammability. The existence of lower coefficients of the evaporation retardation by the gel for liquids with greater water solubility was established experimentally. Experimentally, it was established that wet foam glass has a greater cooling capacity than dry foam glass by 5–6 times, with a close dependence for cooling polar and non-polar liquids. It is shown that the cooling effect of the feeding foam glass is smaller for liquids with a vaporization higher heat, and this difference is approximately the same for the cases of the feeding both dry and wet foam glass. It was found that for low-boiling non-polar liquids, the evaporation insulation is more effectively achieved by using an insulating system based on dry foam glass with a gel layer, and for hard-boiling liquids – provided that the cooling system is supplied in the form of the wet foam glass with an additional effect in the form of the air space phlegmatization above the liquid surface with water vapor. It has been proven that reduction of the burning mass rate and the fire extinguishing effect achievement by applying the foam glass layer on the combustible liquid surface occurs in a similar way for liquids with close molar masses and not flash temperatures.

Keywords: evaporation, burnout, mass burnup rate, insulation, cooling, buoyant agent, foam glass, gel

References

1. Semichaevsky, S., Yakimenko, M., Osadchuk, M. (2021). Regarding emergency spillage of flammable liquids. *Vcheni zapysky TNU im. V.I. Vernads'koho. Tekhnichni nauky*, 32(71), 3, 219–225. doi: 10.32838/2663-5941/2021.3/33
2. Saravanan, R., Karunanithi, T., Govindarajan, L. (2007). A Risk Assessment Methodology for Toxic Chemicals Evaporation from Circular Pools. *J. Appl. Sci. Environ. Manage*, 1, 91–100. doi: 10.4314/jasem.v1i1.46841
3. Loboichenko, V., Strelets, V., Gurbanova, M., Morozov, A., Kovalov, P., Shevchenko, R., Kovalova, T., Ponomarenko, R. (2019). Review of Environmental Characteristics of Fire Extinguishing Substances of Different Composition used for Fires Extinguishing of Various Classes. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14, 5925–5941. doi: 10.36478/jeasci.2019.5925.5941
4. Kireev, A., Tregubov, D., Safronov, S., Saveliev, D. (2020). Study Insulating and Cooling Properties of the Material on the Basis of Crushed Foam Glass and Determination of its Extinguishing Characteristics with the Attitude to Alcohols. *Materials Science Forum*, 1006, 62–69. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1006.62
5. Borovykov, V. (2015). Hasinnya pozhezh u rezervuarakh dlya zberihannya nafty ta naftoproduktiv. *Pozhezhna ta tekhnohenna bezpeka*, 11(26), 28–29. URL: <http://eom.com.ua/index.php/topic,16176.msg137533.html#msg137533>
6. Glassman, I., Yetter, R. A. (2014). *Combustion*. London: Elsevier. doi:10.1016/C2011-0-05402-9
7. Korolov, R., Kovalyshyn, V., Shtajn, B. (2017). Analysis of methods for extinguishing fires in reservoirs with oil products by a combined method. *ScienceRise*, 6(35), 41–50. doi: 10.15587/2313-8416.2017.104613
8. Balanyuk, V. M., Kozyar, N. M., Garasymuyk, O. I. (2016). Study of fire-extinguishing efficiency of environmentally friendly binary aerosol-nitrogen mixtures. *Eastern-european journal of enterprise technologies. Technical science*, 3/10(71), 4–12. doi: 10.15587/1729-4061.2016.72399
9. Balanyuk, V., Kravchenko, A., Harasymyuk, O. (2021). Reducing the thermal radiation intensity at the sublayer extinguishing of alcohols by ecologically acceptable aerosols. *Eastern-european journal of enterprise technologies. Technical science*, 1/10(109), 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2021.225216
10. Trehubov, D. H., Tarakhno, O. V. (2013). *Rozbavlennya paropovitryanoho*

prostoru paroyu nehoryuchoho komponentu. *Problemy pozharnoy bezopasnosti*, 33, 183–187. Retrieved from: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/3205>

11. Pietukhov, R., Kireev, A., Tregubov, D., Hovalenkov, S. (2021). Experimental Study of the Insulating Properties of a Lightweight Material Based on Fast-Hardening Highly Resistant Foams in Relation to Vapors of Toxic Organic Fluids. *Materials Science Forum*, 1038, 374–382. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1038.374

12. Un procedimiento para la preparacion de un gel de poliacrilato sodico. Pat. ES 8901936: A62C 5/033, C09K 21/14, 2 018 370; Fecha de presentacion: 02.06.89; Fecha de publicacion del folleto de patente: 01.04.91. Retrieved from: <https://patents.google.com/patent/ES2545370T3/es>

13. Dadashov, I., Kireev, A., Kirichenko, I., Kovalev, A., Sharshanov, A. (2018). Simulation of the insulating properties of two-layer material. *Functional materials*, 25(4), 774–779. doi: 10.15407/fm25.04.774

14. 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. doi: 10.1016/j.jascer.2013.07.003

15. Dadashov, I. F., Kiryeyev, O. O., Trehubov, D. H., Tarakhno, O. V. (2021). Hasinnya horyuchykh ridyn tverdymy porystymy materialamy ta heleutvoryuyuchymy systemamy. Kh.: NUTSZU. Retrieved from: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14033>

16. Pub Chem. Compound summary. Retrieved from: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>

17. Bubbico, R., Mazzarotta, B. (2016). Predicting Evaporation Rates from Pools. *Chemical engineering transactions*, 48, 49–54. doi: 10.3303/CET1648009

18. Tregubov, D., Tarakhno, O., Deineka, V., Trehubova, F. (2022). Oscillation and Stepwise of Hydrocarbon Melting Temperatures as a Marker of their Cluster Structure. *Solid State Phenomena*, 334, 124–130. doi: 10.4028/p-3751s3

19. Trehubov, D., Sharshanov, A., Sokolov, D., Trehubova, F. (2022). Forecasting the smallest super molecular formations for alkanes of normal and isomeric structure. *Problems of Emergency Situations*, 35, 63–75. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-5

20. Doroshenko, I. Yu. (2017). Spectroscopic study of cluster structure of n-hexanol trapped in an argon matrix. *Low Temperature Physics*, 3(6), 919–926. doi: 10.1063/1.4985983

21. Pietukhov, R., Kireev, A., Slepuzhnikov, E., Chyrkina, M., Savchenko, A. (2020). Lifetime research of rapid-hardening foams. *Problems of Emergency Situations*, 1(31), 226–223. doi: 10.5281/zenodo.3901986

Надійшла до редколегії: 13.03.2023

Прийнята до друку: 17.04.2023