9. Terras, M. M. The five central psychological challenges facing effective mobile learning [Text] / M. M. Terras, J. Ramsay // British Journal of Educational Technology. – 2012. – Vol. 43, Issue 5. – P. 820–832. doi: 10.1111/j.1467-8535.2012.01362.x

10. Farwell, T. Keeping an Online Class Interesting and Interactive [Text] / T. Farwell // Distance Learning. – 2013. – Vol. 10, Issue 3. – P. 27–32.

Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Новіков Ф. В.
Дата надходження рукопису 17.04.2017

Грабовський Євген Миколайович, кандидат економічних наук, доцент, кафедра комп'ютерних систем і технологій, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, пр. Науки, 9-а, м. Харків, Україна, 61166
E-mail: Yevgen.Hrabovskyi@hneu.edu.ua

Гіковатий Володимир Михайлович, кандидат економічних наук, доцент, кафедра комп'ютерних систем і технологій, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, пр. Науки, 9-а, м. Харків, Україна, 61166
E-mail: Volodymyr.Hikovatyi@hneu.edu.ua

УДК 614.841.4
DOI: 10.15587/2313-8416.2017.104613

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ В РЕЗЕРВУАРАХ З НАФТОПРОДУКТАМИ КОМБІНОВАНИМ СПОСОБОМ

© Р. А. Корольов, В. В. Ковалишин, Б. В. Штайн

Розглянуто перспективи та недоліки використання твердих гранул діоксиду вуглецю. Запропоновано новий спосіб визначення відносної вогнегасної ефективності комбінованого гасіння для мінімізації часу гасіння та зменшення кількості вогнегасних засобів. Запропоновано розробити стендове експериментальне устаткування, для визначення відносної вогнегасної ефективності комбінованого способу гасіння нафтопродуктів комбінуванням твердих гранул діоксиду вуглецю і піноутворювача
Ключові слова: *гасіння, діоксид вуглецю, піноутворювач, нафтопродукт, пожежа, температура, полум'я, ефективність, охолодження, ізоляція*

1. Вступ

Сучасний Світ не можна уявити без новітніх технологій, машин, підприємств, виробництв. Також з кожним роком випускається все більше сучасних автомобілів для покращення життєдіяльності людини, а значить і стрімко зростає попит на нафтопродукти, які необхідні для функціонування оточуючої нас інфраструктури.

Нафтопродукти розподіляються на світлі та темні і в свою чергу до світлих належать: бензин, уайт-спірит, лігроїн, гас, дизельне паливо, газойль. До темних: мазут, олива (суміш високомолекулярних нафтових вуглеводнів, що використовується в техніці як змащувальний, електроізоляційний, консерваційний матеріал та робоча рідина), мастило (структурована загусником олива, що застосовується для зменшення тертя, консервації виробів та герметизації ущільнень), вазелін, парафін, церезин, гудрон, бітуми нафтові, асфальт, асфальтени, нафтовий кокс, пек та ін. [1].

За даними [2], на території України, станом на квітень 2017 року, налічується приблизно 3702 АЗС, що належать 45 брендам, на яких розміщуються резервуари для зберігання паливно-мастильних матеріалів об'ємом до 100 м^3.

В табл. 1 наведено масштаби видобутку та переробки нафтопродуктів в Україні за 2003–2010 роки [3].

Згідно із статистикою виникнення пожеж в резервуарних парках всіх країн, що продукують нафтопродукти [4], наглядно показує тенденцію до підвищення пожежної небезпеки при збільшені масштабів резервуарних парків і вказує на необхідність подальшого вдосконалення заходів пожежної небезпеки при їх проектуванні та експлуатації. На сьогоднішній день склади нафти і нафтопродуктів є одним із найважливіших елементів системи нафтопродуктозабезпечення України. На початку 1992 року в Україні тільки на нафтобазах експлуатувалось понад 11500 металевих резервуарів загальною місткістю понад 5 млн. м^3. На нафтоперпекачувальних станціях у системі нафтопроводів ВАТ "Укртранснафта" знаходяться резервуари сумарною міскістю понад 1 млн. м^3, у системі ДП "Прикарпатзахідтранс" – близько 350 тис. м^3.

Таблиця 1

Виробництво нафтової промислової продукції за 2003–2010 роки

Вид сировини/Рік	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Добувна промисловість								
Нафта сира, млн.т	2,8	3,0	3,1	3,3	3,3	3,2	2,9	2,6
Переробна промисловість								
Смоли (кам'яновугільні), тис.т	1015	1029	876	910	934	881	785	845
Бензин моторний з вмістом свинцю 0,013 г/л і менше, тис.т	4308	4997	4609	3926	4161	3223	3259	2875
Паливо дизельне для транспорту автомобільного і залізничного, тис.т	6325	6265	5290	4270	4147	3659	3903	3709
Мазути паливні важкі, тис.т	7970	7766	5889	3836	3477	2460	2600	2464
Мастила, масла інші, тис.т	180	214	176	210	214	188	110	119
Пропан і бутан скраплені, тис.т	722	754	766	758	824	727	733	679
Парафін нафтовий, тис.т	15,7	13,9	11,0	13,0	12,2	12,2	15,7	14,3

Пожежі нафти і нафтопродуктів у резервуарах, як правило, є складними і масштабними, ліквідовуються з великими труднощами, наносять велику шкоду і часто приводять до загибелі людей. Як свідчить статистика [4]: в США в резервуарних парках щорічно виникає 20 пожеж, у Японії щорічно виникає по одній пожежі. Статистика свідчить про такий розподіл пожеж: на об'єктах «Головтранснафти» – 9,7 %, на нафтопромислах – 14,2 %, на нафтопереробних заводах – 28,4 %, на розподільних нафтобазах – 47,7 %. В наземних резервуарах сталося 93,4 % пожеж, причому 32,1 % з них мали місце в резервуарах з сирою нафтою, 53,9 % – в резервуарах з бензином, 14,0 % – в резервуарах з іншими нафтопродуктами (мазут, гас тощо). Пожежі відбувалися в основному у вертикальних сталевих резервуарах (227 випадків), з них 198 випадків (87,2 %) припадають на резервуари з бензином та сирою нафтою.

Основою пожежогасіння є примусове припинення процесу горіння [5]. На практиці використовують декілька способів припинення горіння (рис. 1).

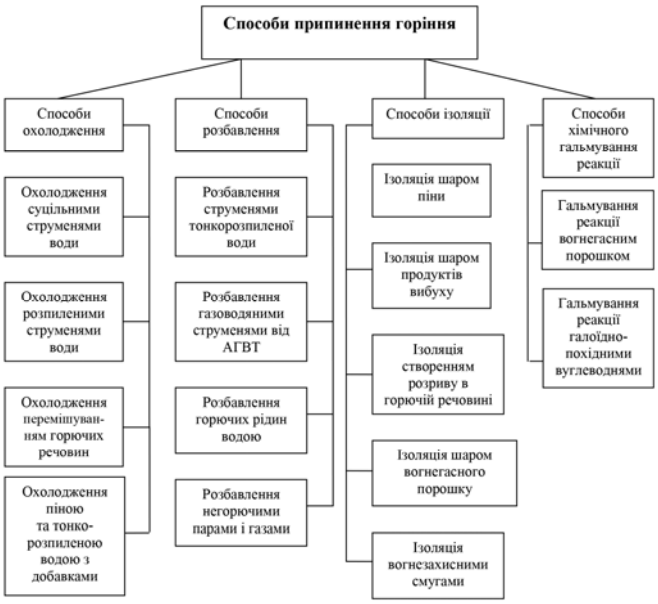


Рис. 1. Класифікація способів припинення горіння

Кожен із способів припинення горіння можна здійснювати різними прийомами, зокрема їх поєднанням. Наприклад, створення ізолюючого шару на поверхні легкозаймистої рідини, яка горить, може бути досягнуто через подачу піни крізь шар горючої рідини, або за допомогою пінопід'йомників, навісними струменями тощо.

Спосіб охолодження ґрунтується на тому, що горіння речовини можливе тільки тоді, коли температура її верхнього шару вища за температуру його спалаху для легкозаймистих рідин (ЛЗР) $t_{сп}$ – 28 °С. Якщо з поверхні горючої речовини відвести накопичене тепло, тобто охолодити її нижче температури спалаху, горіння припиняється (1).

$$t_{пов(ЛЗР,ГР)} \le t_{сп(ЛЗР,ГР)}, \quad (1)$$

де $t_{пов(ЛЗР,\ ГР)}$ – температура поверхні легкозаймистих рідин та горючих рідин; $t_{сп(ЛЗР,\ ГР)}$ – температура спалаху легкозаймистих рідин та горючих рідин.

Спосіб розрідження базується на здатності речовини горіти при вмісті кисню у атмосфері більше 14–16 % за об'ємом. Зі зменшенням кисню в повітрі нижче вказаної величини полум'яне горіння припиняється, а потім припиняється і тління внаслідок зменшення швидкості окислення. Зменшення концентрації кисню досягається введенням у повітря інертних газів та пари і з зовні або розведенням кисню продуктами горіння (у ізольованих приміщеннях).

Спосіб ізоляції ґрунтується на припиненні надходження кисню повітря до речовини, що горить. Для цього застосовують різні ізолюючі вогнегасні речовини (хімічна повітряно-механічна піна, порошок та інше).

Спосіб хімічного гальмування реакцій горіння полягає у введенні в зону горіння галоїдно-похідних речовин (бромисті метил та етил, фреон та інше), які при потраплянні у полум'я розпадаються і з'єднуються з активними центрами, припиняючи екзотермічну реакцію, тобто виділення тепла. У результаті цього процес горіння припиняється [6].

У світовій практиці, в якості удосконалення вогнегасних засобів, перспективний напрямком є комбінування існуючих способів для підвищення фізико-хімічних властивостей компонентів які призначені для гасінні ЛЗР та ГР. Використання тих чи інших вогнегасних засобів при гасінні пожеж горючих рідин, зокрема нафтопродуктів, обмежується умовами технічної реалізації способу подачі та впливом теплофізичних показників палаючої рідин (відкрите полум'я, конвективні потоки, висока температура). Тому, процес гасіння пожеж в резервуарах з горючими рідинами є вкрай складним, довготривалим і доволі витратним, що зумовлює необхідність розробки новітніх засобів та методів пожежогасіння.

2. Літературний огляд

Першим дослідником гасіння нафтопродуктів твердими гранулами діоксиду вуглецю ще у 1972 році став Абдурагімов І. М., у своїй роботі [7] він розглянув теоретичні основи застосування цієї речовини для ліквідації пожеж нафтопродуктів у резервуарах. За результатами проведених досліджень була обрана нерівність (1), що зумовлює припинення горіння шляхом охолодження прогрітого прошарку рідини до температури нижчої температури її спалаху.

Нерівність (1) виконується, якщо згідно теплового балансу, виконується умова:

$$\Delta Q^{від}_{пов(ЛЗР,ГР)} \geq \int_{\tau} q_{л}(\tau_T) d\tau + Q^{зіб}_{ЛЗР,ГР}, \qquad (2)$$

де $\Delta Q^{від}_{пов(ЛЗР,ГР)}$ – кількість тепла, яку необхідно відвести від 1 м^2 поверхні шару рідини, кДж/м^2; $q_л(\tau)$ – інтенсивність променевого теплового потоку, який поступає від факелу полум'я до дзеркала поверхні ЛЗР, ГР в процесі гасіння, кДж/(м^2·с); τ_T – час гасіння, с; $Q^{зіб}_{ЛЗР,ГР}$ – кількість тепла, зібраного в поверхневому прошарку рідини, кДж/м^2.

Робота Абдурагімова І. М. дала поштовх для вдосконалення і покращення даного способу ліквідації пожеж у резервуарах з нафтопродуктами. Нижче представлені та проаналізовані дослідження та установки пожежогасіння, які були розроблені на основі використання діоксиду вуглецю.

У дослідженні [8], запропонований спосіб полягає в одночасній подачі інертного газу (діоксину вуглецю) в горючу рідину і розчину піноутворювача (ПУ) до осередку горіння над зоною утворення бульбашок барботуючого інертного газу. При цьому інертний газ перед подачею в рідину охолоджують до температури, меншої за точку замерзання розчину ПУ. Пристрій для реалізації способу містить ємність з розчином ПУ, з'єднану трубопроводом з форсункою, джерело інертного газу, з'єднаний трубопроводом з барботером, встановленим в рідини, сповіщувач займання і запірні клапани. При цьому форсунка встановлена в рідини над барботером в безпосередній близькості до нього, а ємність з піноутворюючим розчином може бути встановлена в резервуарі з рідиною. Крім того, в трубопроводі, що з'єднує джерело газу з барботером, встановлена вихрова труба, сопловий вхід якої з'єднаний з джерелом газу, а трубопровід холодного потоку – з барботером (рис. 2).

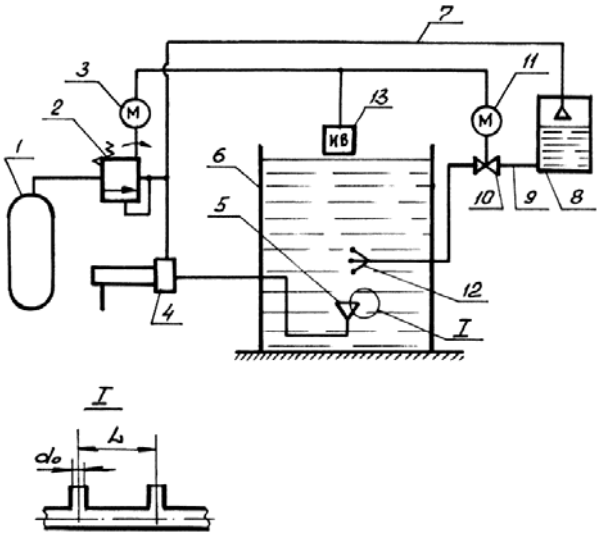


Рис. 2. Принципова схема гасіння пожежі в резервуарі із нафтопродуктами: 1 – балон зі стисненим інертним газом; 2 – автоматичний клапан подачі інертного газу; 3, 11 – манометр; 4 – охолоджуюча камера; 5 – форсунки для подачі інертного газу; 6 – резервуар; 7 – трубопровід подачі інертного газу в резервуар з піноутворювачем; 8 – резервуар з піноутворювачем; 9 – трубопровід подачі піноутворювача до резервуару з нафтопродуктом; 10 – запірний вентиль; 12 – форсунки для подачі піноутворювача; 13 – сповіщувач загоряння

В роботі [9] був розглянутий спосіб гасіння рідини в резервуарі, що включає подачу інертного газу через шар горючої рідини, що відрізняється тим, що, з метою підвищення ефективного гасіння, одночасно з подачею інертного газу через шар рідини на дзеркало рідини подається розпилений ПУ (рис. 3).

Недоліком цього способу є велика кількість додаткового обладнання для зберігання і подачі вуглекислого газу, його зберігання в охолодженому стані, подачі ПУ, та наявності над поверхнею дзеркала ЛЗР сповіщувача, який приводить в дію автоматичну систему пожежогасіння, оскільки у 82 % пожеж в резервуарах супроводжуються вибухом. Також для реалізації цього способу гасіння нафтопродукту необхідно буде обладнувати таким комплексом кожен резервуар, що в свою чергу потягне за собою великі матеріальні затрати.

Цей спосіб є аналогічним до попереднього, за винятком відсутності охолодження інертного газу перед його подачею в рідину а розчин ПУ подається лише на дзеркало нафтопродукту де піддається дії теплофізичних показників.

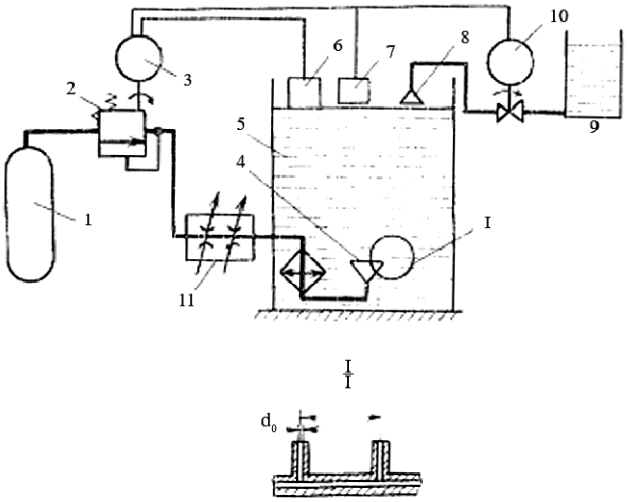
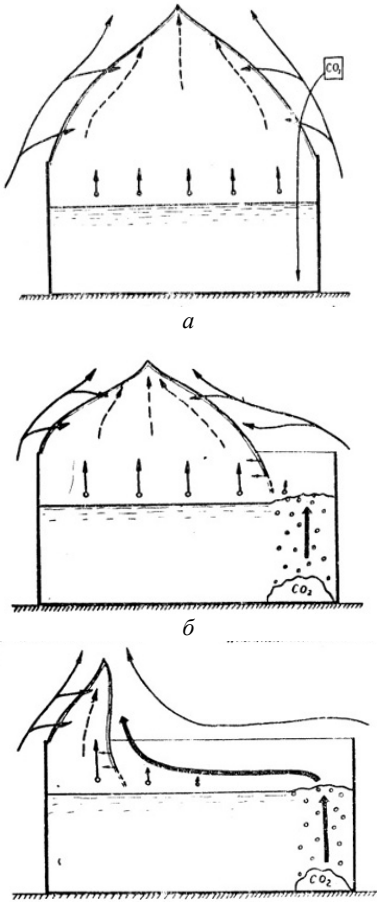


Рис. 3. Принципова схема гасіння пожежі в резервуарі із нафтопродуктами: 1 – балон зі стисненим інертним газом; 2 – автоматичний клапан подачі інертного газу; 3, 10 – приймальний пристрій сигналів температурного датчику та сповіщувача загоряння; 4 – форсунки для подачі інертного газу; 5 – нафтопродукт; 6 – температурний датчик; 7 – сповіщувач загоряння; 8 – форсунки для подачі піноутворювача; 9 – резервуар з піноутворювачем; 11 – запірні вентилі

В дослідженні [10] запропоновано спосіб подачі в резервуар в зону горіння рідини газодисперсної вогнегасної суміші, що відрізняється тим, що вогнегасну суміш подають з плаваючого в центрі резервуара пристрою. Вогнегасну газодисперсну суміш (ГДС) утворюють в вищевказаному пристрої шляхом подачі під тиском не менше 1 МПа газоподібного і/або скрапленого флегматизатора і/або скрапленого та/або газоподібного гомогенного інгібітора горіння в ємність з порошкоподібним або рідким гетерогенним інгібітором горіння. Пристрій має розривну мембрану або клапан, який розкривається при перевищенні вищезазначеного тиску і забезпечує випуск ГДС через вихідний трубопровід і круговий сопловий розпилювач. Розпилення відбувається компактними струменями з кутом розбіжності 5–15° в площині паралельної рідини з витратою не менше 10 кг/с зі швидкістю витікання на зрізі сопла не менше 70 м/с. Подачу струменів ведуть з розгорткою на 360° таким чином, щоб вони в радіальному напрямку всередині резервуара не перетиналися, створюючи в утвореному вогнегасному середовищі розрідження, що забезпечує підсмоктування в зону розрідження продуктів горіння з верхньої зони пожежі. Тим самим утворюючи суцільну кругову вогнегасну зону. Співвідношення вогнегасних площ, утворених газодисперсними струменями і продуктами згоряння рідини, що горить в межах від 1:1 до 10:1, а співвідношення мас між газовою і дисперсної фазами вогнегасної суміші знаходиться в межах від 0,2:1 до 15:1.

Недоліком даного способу є те, що ефективне гасіння може відбуватись лише за цілісності резервуара. При утворенні кишені, зриву даху, чи перекосу понтону даний спосіб буде недоцільним. Також в ньому не враховано охолодження нафтопродукту, що суттєво пришвидшило б ефект гасіння.

В роботі [11] твердий діоксид вуглецю в роздробленому вигляді подається під шар горючої рідини компактними порціями, причому діаметр дробу становить 3–4 см і в процесі сублімації "сухого льоду" порції, активно охолоджують нагрітий верхній шар рідини, що горить. Охолодження верхнього шару рідини веде до зменшення швидкості пароутворення і до зниження активності горіння. Двоокис вуглецю, що виходить на поверхню рідини, припиняє горіння на локальній площі за рахунок пригнічення парів горючої рідини. Змінена при цьому аераційна ситуація над ділянкою виходу газоподібного двоокису вуглецю сприяє ежекції її шару до зони горіння. В наслідок чого, в тонкому шарі частково за рахунок пригнічення парів рідини, частково за рахунок зниження концентрації кисню повітря, що надходить до зони горіння, відбувається припинення екзотермічної реакції. Цей ефект, в свою чергу знижує тепловипромінювання в сторону ділянки, де горіння вже ліквідовано, тим самим сприяючи пересуванню кордону зони горіння в сторону від ділянки введення під шар рідини двоокису вуглецю. Таким чином, наявність конвективної колонки вільним дзеркалом рідини, що горить, забезпечує самолокалізацію горіння за рахунок ежекції до зони горіння в тонкому шарі інгібуючої газоподібної вуглекислоти, що виникає при введенні "сухого льоду" під шар рідини, що горить (рис. 4).



а

б

в

Рис. 4. Принципова схема гасіння пожежі в резервуарі із нафтопродуктами: *а* – подавання твердих гранул діоксиду вуглецю з навітряної сторони резервуару, що горить; *б* – вивільнення в процесі сублімації CO_2 з твердих гранул діоксиду вуглецю; *в* – пригнічення парів горючої рідини парами CO_2

Основним недоліком даного способу є розрахунково-велика кількість вогнегасних засобів необхідних для припинення горіння. Але на відміну від попереднього враховано охолодження нафтопродукту твердою гранульованою вуглекислотою. Також слід зазначити, що закинута в резервуар вуглекислота однією порцією з певної сторони буде витрачати час на розповсюдження і охолодження горючої речовини по всій площині, що в свою чергу збільшить час ліквідації горіння.

В досліджені [12] пристрій містить джерело з негорючих газом, піноутворюючий розчин з щільністю, що перевищує щільність горючої рідини, розміщений в нижній частині резервуара з рідиною, і два барботера. Один барботер встановлений в рідині, а інший – в піноутворюючому розчині. Кожен барботер з'єднаний з джерелом негорючого газу трубопроводом з запірним клапаном. Запірний клапан трубопроводу першого барботера функціонально пов'язаний з датчиком температури, встановленим на поверхні рідини, а запірний клапан іншого барботера – з сповіщувачем займання (рис. 5).

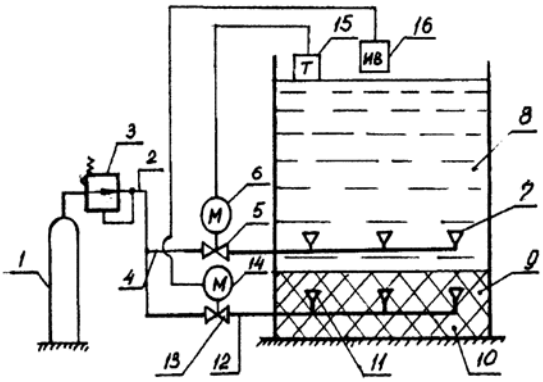


Рис. 5. Принципова схема гасіння пожежі в резервуарі із нафтопродуктами: 1 – балон зі стисненим інертним газом; 2 – загальний резервуар; 3 – автоматичний клапан подачі інертного газу;4 – трубопровід подачі інертного газу в прошарок нафтопродукту; 5, 13 – запірний вентиль; 6, 14 – манометр; 7, 11 – форсунки для подачі інертного газу; 8 – нафтопродукт; 9 – піноутворювач; 10 – донна вода; 12 – трубопровід подачі інертного газу в прошарок з піноутворювачем; 15 – датчик температури; 16 – пожежний сповіщувач

Даний спосіб є схожим з запропонованими у дослідженнях [8, 9], але на відміну від них пропонується закачування піноутворювача густиною більшою за густину нафтопродукту в простір призначений для донної води і цим позбавляє потреби у додатковому обладнанні для зберігання піноутворювача. Недоліками цього способу є недослідженість впливу нафтопродуктів на фізико-хімічний склад ПУ при довготривалому зберіганні, а також можливістю реалізації зберігання лише в резервуарах з сирою нафтою. Також до основних недоліків відноситься встановлення температурних датчиків та датчиків сповіщувачів займання, що знову ж таки не гарантує роботу приладів на початковій стадії займання із супроводженням детонаційного вибуху.

У роботі [6] розглянуто перспективу поєднання комбінованих вогнегасних речовин на основі твердих гранул діоксиду вуглецю, та частково експериментально підтверджено ефективність застосування даного способу на модельному резервуарі, що характеризується зменшенням часу гасіння нафтопродукту. Ця робота стала початком досліджень гасіння нафтопродуктів за допомогою комбінування твердих гранул діоксиду вуглецю і піноутворювача, в якій було запропоновано поєднати гранульовану вуглекислоту з 1 % розчином піноутворювача, який подавався через модельний піно генератор. Схема зображена на (рис. 6).

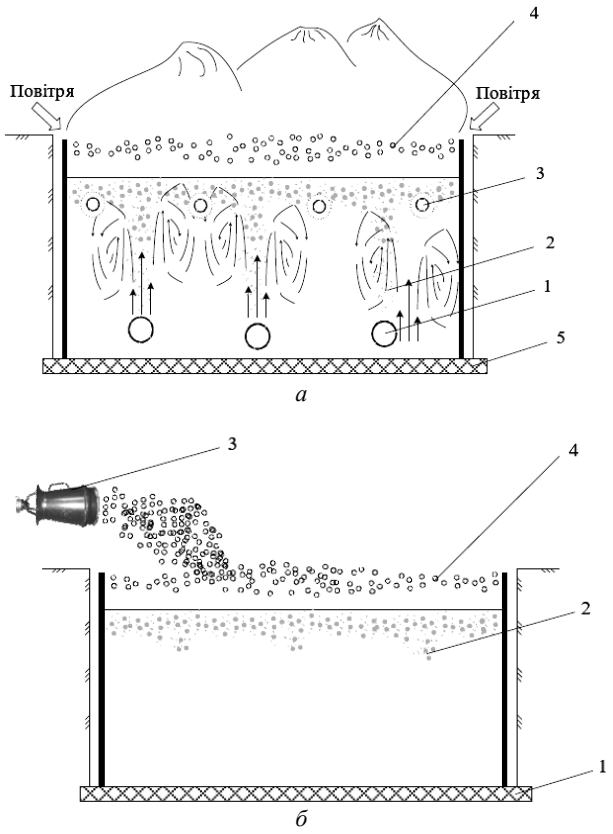


Рис. 6. Принципова схема гасіння пожежі в резервуарі із нафтопродуктами: *а* – гранулами діоксиду вуглецю: 1 – сухий лід; 2 – газові потоки, які утворюються внаслідок сублімації діоксиду вуглецю; 3 – гранули в газовій оболонці, які піднімаються до пове-рхні рідини; 4 – газова подушка над поверхнею рідини; 5 – бетонна плита; *б* – повітряно-механічною піною (ПМП): 1 – бетонна плита; 2 – нафтопродукт; 3 – генератор ПМП (модельний); 4 – ПМП

В даному досліджені не було розглянуто таких важливих питань, що визначають відносну вогнегасну ефективність. Основою таких досліджень є визначення:

1) співвідношення діоксиду вуглецю до ПУ;

2) способу їх комбінування;

3) способу подачі вогнегасної речовини в резервуар з нафтопродуктами;

4) час припинення горіння;

5) час досягнення на поверхні температури нижчої $t_{сп}$.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – розробити спосіб визначення відносної вогнегасної ефективності гасіння

нафтопродуктів комбінованим способом на основі подавання твердих гранул діоксиду вуглецю та піноутворювача для мінімізації часу гасіння та кількості вогнегасних речовин.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

1. Провести аналіз способів здійснення подачі вогнегасної речовини безпосередньо в товщу нафтопродукту (підшарове гасіння), що мінімізує негативний вплив температурних чинників відкритого полум'я на зміну фізико-хімічного складу засобів гасіння;

2. Запропонувати оптимальну схему процесу гасіння без розміщення додаткового обладнання (врізка в комунікації технологічного процесу зберігання нафтопродуктів);

3. Розробити експериментальне устаткування та методику проведення дослідження, для визначення необхідної кількості запропонованих вогнегасних речовин окремо та у їх комбінуванні під час гасіння пожежі нафтопродуктів в резервуарах.

4. Методика та виклад результатів дослідження по гасінню пожеж в резервуарах з нафтопродуктами на основі комбінування твердих гранул діоксиду вуглецю та розчину піноутворювача

4. 1. Розробка способу дослідження відносної вогнегасної ефективності комбінованого способу гасіння нафтопродуктів

Для реалізації визначення відносної ефективності комбінованого способу гасіння ЛЗР та ГР вогнегасною речовиною (діоксин вуглецю + ПУ), запропоновано розробити експериментальне устаткування за схемою, яка зображена на рис. 9.

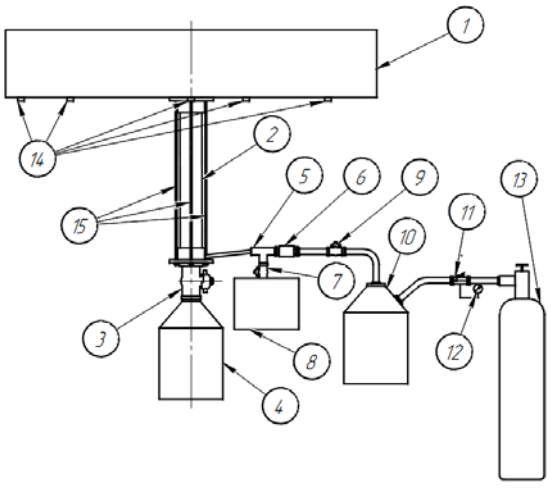


Рис. 9. Принципова схема установки визначення відносної ефективності гасіння пожежі нафтопродуктів комбінованим способом: 1 – дека; 2 – скляна колба; 3 – кран подачі твердих гранул діоксиду вуглецю; 4 – термос з твердими гранулами діоксину вуглецю; 5 – трійник; 6 – зворотній клапан; 7 – кран зливу нафтопродукту; 8 – резервуар для зливу нафтопродукту; 9 – кран подачі ПУ; 10 – резервуар з розчином ПУ; 11 – редуктор; 12 – манометр; 13 – балон з стиснутим повітрям (або) інертним газом; 14 – отвори для термопар х 8; 15 – стягуючі штанги

Для досягнення поставленої мети дослідження, необхідно дати відповідь на три основні питання, а саме:

1. Яка кількість розчину піноутворювача необхідна для ліквідації горіння і унеможливлювання повторного самозаймання нафтопродукту.

2. Яка кількість твердих гранул діоксиду вуглецю необхідна для ліквідації горіння нафтопродукту.

3. Яке співвідношення твердих гранул діоксиду вуглецю та розчину піноутворювача забезпечить оптимальну вогнегасну та економічну ефективність при їх комбінуванні.

Для відповіді на перераховані вище запитання необхідно провести три окремих досліди.

1. Визначення кількості розчину піноутворювача необхідного для ліквідації горіння і унеможливлювання повторного самозаймання нафтопродукту.

Перший етап: Перед початком досліджень в колбу 2 заливається донна вода, у співвідношенні 3 % до кількості нафтопродукту і сам нафтопродукт. Крани 3, 7, 9 і балон 13 знаходяться в закритому положенні.

Волонтер в теплозахисному одязі запалює факел на жердині, яка має бути не коротша за 2 м, і з навітряної сторони здійснює підпал нафтопродукту, після чого жердина гаситься у завчасно підготовленій ємності з водою.

Другий етап: Нафтопродукту дається 5 хвилин вільного горіння, після чого відкривається кран 9 та балон 13. Стиснене повітря або інертний газ з балону 13 через редуктор 11 та манометр 12 поступає до резервуару 10 і виштовхує розчин ПУ через зворотній клапан 6 до скляної колби 2 та у деку 1. Подача ПУ припиняється закриттям балону 13 і крану 9 після ліквідації факелу горіння і охолодження нафтопродукту до температури меншої за температуру самоспалахування. При повторному загорянні нафтопродукту провести всі дії повторно.

Третій етап: По закінченню досліду відкрити кран 7, злити нафтопродукт в резервуар 8, від'єднати резервуар 10, перелити розчин ПУ в мірну тару, і визначити кількість використаного розчину ПУ для ліквідації горіння. Результати записати в протокол досліджень.

2. Визначення кількості твердих гранул діоксиду вуглецю необхідної для ліквідації горіння нафтопродукту.

Повторити дії першого етапу визначення кількості розчину піноутворювача необхідного для ліквідації горіння і унеможливлювання повторного самозаймання нафтопродукту.

Після 5 хвилин вільного горіння відкрити кран 3 для подачі твердих гранул діоксиду вуглецю з термосу 4. Дослід припиняється при ліквідації всіх чинників повторного виникнення горіння. Повторяти дослід з поступовим зменшенням кількості твердих гранул діоксиду вуглецю до визначення мінімальної необхідної його кількості для ліквідації горіння нафтопродукту.

Повторне використання нафтопродукту можливе без його заміни, оскільки тверді гранули діоксиду вуглецю не змінюють його хімічних властивостей та якостей.

Перед кожним дослідом після попереднього, необхідно вичекати поки нафтопродукт не набуде первісної температури.

3. Визначення співвідношення твердих гранул діоксиду вуглецю та розчину піноутворювача при їх комбінуванні, яке забезпечить оптимальну вогнегасну та економічну ефективність.

Повторити дії першого етапу визначення кількості розчину піноутворювача необхідного для ліквідації горіння і унеможливлювання повторного самозаймання нафтопродукту.

Після 5 хвилин вільного горіння послідовно відкрити кран 9, балон 13 та кран 3 до моменту ліквідації горіння та всіх чинників повторного самозаймання. По закінченню досліду, перекрити крани і балон в зворотному порядку.

Повторювати дослід до визначення оптимального співвідношення твердих гранул діоксиду вуглецю та розчину ПУ, яке забезпечить максимальну мінімізацію у часі для ліквідації пожежі в резервуарі з нафтопродуктами.

4. 2. Теоретичні положення комбінованого способу гасіння за принципом «охолодження»

Процес гасіння нафтопродукту в резервуарі твердою вуглекислотою можна описати наступним чином. Гранули твердого діоксиду вуглецю поміщаються в резервуар з рідиною, що горить. Так, як щільність твердої фази діоксиду вуглецю вища щільності рідини, гранули опускаються в шар рідини. На поверхні гранул бурхливо проходить процес сублімації. В результаті цього процесу відбувається активне поглинання тепла від рідини.

Виділений газ спрямовується до поверхні дзеркала рідини. У результаті сильно розвиненого контакту по поверхні дрібних бульбашок діоксиду вуглецю з горючою рідиною, великій різниці температур газу і рідини і великий теплоємності CO_2 відбувається активне поглинання тепла для нагрівання газових потоків до температури рідини.

Теоретична модель способу описує два основні механізми гасіння полум'я: охолодження зони горіння і верхнього шару рідини і розбавлення зони горіння нейтральним газом.

У результаті аналізу процесу сублімації діоксиду вуглецю твердого в рідині, отримано вираз, що характеризує кількісне зміна інтенсивності тепла, що поглинається в одиницю часу при сублімації, $q_{CO_2}^{суб}(\tau)$, Дж·с$^{-1}$

$$q_{CO_2}^{суб}(\tau) = -3 \cdot \frac{r \cdot m \cdot m'^{\,3}_{уд} \cdot \tau^2}{\rho^3 \cdot R_0^3},\ \text{Дж} \cdot \text{с}^{-1} \qquad (3)$$

де r_{CO_2} – теплота сублімації, Дж·с$^{-1}$; m – маса твердої вуглекислоти, яка витрачена на гасіння пожежі в резервуарі, кг; $m'_{уд}$ – питома масова швидкість газоутворення твердого діоксиду вуглецю, кг·м$^{-2}$·с$^{-1}$; τ – час, с; ρ – густина твердого діоксиду вуглецю, кг·м$^{-3}$; R_0 – вихідний радіус одної гранули, м.

Отримано залежність зміни інтенсивності поглинання тепла при нагріванні газу діоксиду вуглецю, що утворився в результаті сублімації, при контакті з рідиною, від температури твердої речовини $T_{субл}$ до температури рідини $T_р$, $q_{CO_2}^{нагр}(\tau)$, Дж·с$^{-1}$ дорівнює:

$$q_{CO_2}^{нагр}(\tau) = -3 \cdot \frac{c_{co_2} \cdot r \cdot m \cdot m'^{\,3}_{уд} \cdot \tau^2}{\rho^3 \cdot R_0^3} \cdot \left(T_{ж} - T_{субл}\right),\ \text{Дж} \cdot \text{с}^{-1} \qquad (4)$$

де c_{co_2} – питома теплоємність газу діоксиду вуглецю, Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$.

Якщо розглядати процес гасіння пожеж нафтопродуктів і полярних рідин в резервуарах твердим діоксидом вуглецю як об'ємний спосіб, то умовою ліквідації факелу полум'я, буде створення над поверхнею рідини, вогнегасної концентрації газу діоксиду вуглецю.

Загальне рівняння матеріального балансу газу діоксиду вуглецю, виділився в результаті сублімації в шарі рідини, має вигляд:

$$S_0 \cdot h d\varphi = m' d\tau - S_0 \cdot U \cdot \varphi d\tau, \qquad (5)$$

де m' – витрата газу діоксиду вуглецю через поверхню шару рідини, кг·с$^{-1}$; S_0 – площа дзеркала резервуару, м^2; h – висота шару газу накопиченого над поверхнею рідини, м; φ – концентрація діоксиду вуглецю над поверхнею, кг·м$^{-3}$; U – швидкість конвективних потоків, м·с$^{-1}$.

Отримано вираз питомої витрати вогнегасної речовини для гасіння пожежі, G, кг·м$^{-2}$:

$$G = \frac{\beta \cdot J^2}{U} \cdot \ln\left(\frac{J}{J - U \cdot \varphi_F}\right), \qquad (6)$$

де β – коефіцієнт ежекції, м^3·с·кг$^{-1}$, зворотний показник величини, що характеризує кількість м^3 повітря в секунду захоплюваний одним кілограмом газу, що виділяється; J – інтенсивність надходження газу діоксиду вуглецю на поверхні рідини в одиницю часу, кг·м$^{-2}$·с$^{-1}$

4. 3. Результати теоретичних розрахунків залежності питомої вогнегасної речовини

Графічно функціональна залежність (6), для значень $\beta = 1\ м^3 \cdot с \cdot кг^{-1}$, $U = 0{,}5\ м \cdot с^{-1}$, представлена на рис. 7.

Крива функціональної залежності $G(J)$ має екстремум функції, в якому, при деякому значенні J, значення $G(J_i)$=min.

При значеннях $J \leq J_i$ функція $G(J) \rightarrow \infty$, фактично це означає, що при зменшенні величини інтенсивності J нижче значення J_i, гасіння полум'я не наступить.

Таким чином, значення J_i при якому $G(J_i)=min$ є оптимальною величиною $J_i=J_{opt}$.

Визначена масова швидкість газоутворення – інтенсивність сублімації діоксиду вуглецю твердого гранульованого, поміщеного в різні види рідин.

Залежність інтенсивності сублімації діоксиду вуглецю від температури рідини показана на рис. 8.

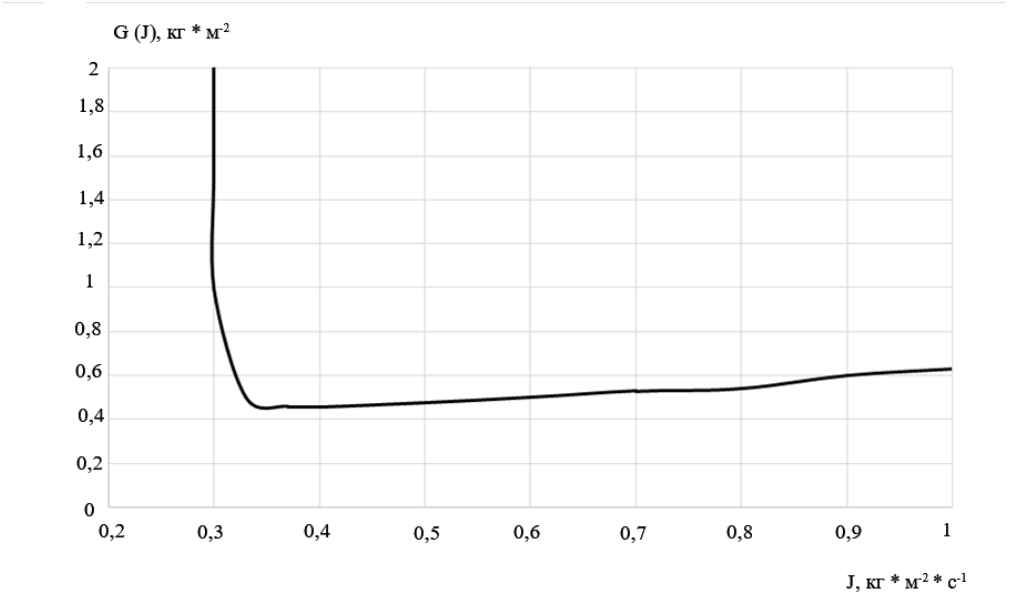


Рис. 7. Залежність питомої витрати вогнегасної речовини від інтенсивності надходження газу до поверхні рідини (загальний вигляд)

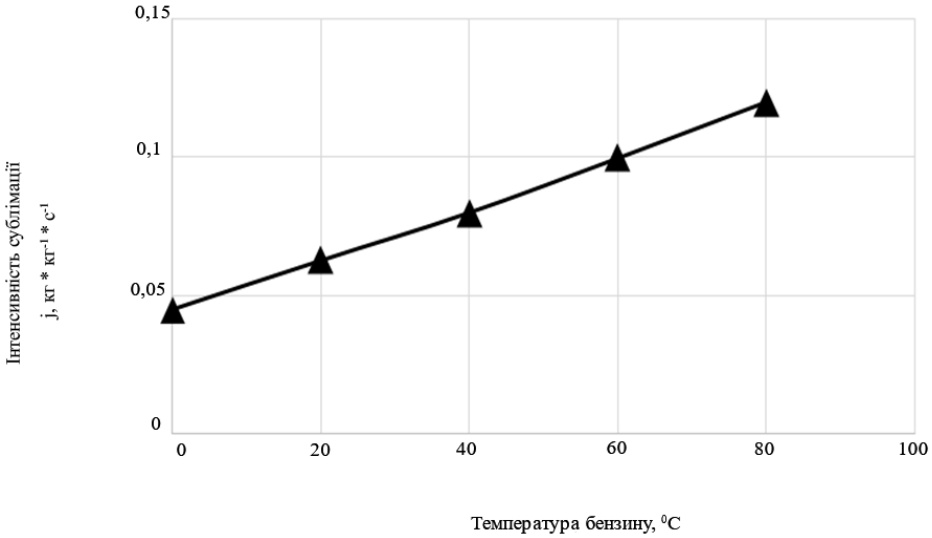


Рис. 8. Зміна інтенсивності сублімації діоксиду вуглецю твердого (j_{CO_2}) в бензині при зміні температури

У результаті аналізу отримано спрощений математичний опис залежності інтенсивності сублімації твердого діоксиду вуглецю від температури рідини, в яку він поміщений. Результати математичного аналізу наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Залежність інтенсивності сублімації твердого діоксиду вуглецю від температури рідини

Рідина	Функція
Бензин	$j_{CO_2}(\mathrm{t}) = 0.04 + \left(\frac{t}{1000}\right)$

5. Обговорення результатів дослідження

Проведено вивчення механізму перемішування в процесі сублімації твердого діоксиду вуглецю, поміщеного в рідину. При поміщенні в об'єм рідини твердого діоксиду вуглецю, гранули опускаються в шарі рідини. У результаті фазового переходу твердого тіла в газ до поверхні рідини спрямовуються потоки газу, що викликають рух шарів рідини у всьому резервуарі. Виникаюче тепло-масо перенесення, призводить до інтенсивного охолодження прогрітого верхнього шару.

Участь механізму перемішування в процесі гасіння полум'я палаючої рідини характеризується тісним зв'язком теплових і гідродинамічних факторів: теплообмін між факелом полум'я і рідиною, тепломасообмін всередині самої рідини і т. д.

Початковий розподіл температури в масі рідини, встановлюється протягом часу вільного горіння, при впливі механізму перемішування зазнає значних змін, які призводять до зниження температури верхнього шару рідини до середнього значення температури в глибині резервуара.

Швидкість зміни температурного поля не однакова у всіх частинах системи. У глибинних шарах рідини температура змінюється швидко і приймає значення, близьке до кінцевої температури за порівняно короткий час, практично відповідне часу вста-

новлення стаціонарного гідродинамічного режиму. Зміна температури поблизу вільної поверхні рідини протікає значно повільніше, ніж в глибинних шарах, що пов'язано з більш високим початковим значенням температури в цій зоні і з випромінюванням факела полум'я, який є джерелом тепла.

По закінченню досліджень і отриманні позитивних результатів щодо відносної вогнегасної ефективності застосування комбінованого способу гасіння пожеж в резервуарах з нафтопродуктами, за схемою «тверді гранули діоксиду вуглецю + розчин ПУ», планується розробити пристрій для подачі запропонованої комбінації вогнегасних речовин, який мінімізує кількість особового складу та техніки необхідної для ліквідації пожеж в резервуарах з легкозаймистими та горючими рідинами. Цей пристрій буде підключатись до комунікацій резервуару, що призведе до наступного:

– зникне необхідність встановлювати високовартісне і громіздке обладнання ззовні і в середині резервуару;

– зменшить кількість особового складу і техніки задіяної в ліквідації пожежі;

– надасть підрозділам більшої мобільності, швидкості і ефективності у ліквідації пожеж в резервуарах з нафтопродуктами;

– дозволить проводити ліквідацію пожежі на безпечній відстані від резервуару в якому виникла пожежа.

6. Висновки

1. На основі проведеного аналізу методів та технічних засобів з гасіння нафтопродуктів в резервуарах на основі твердих гранул діоксиду вуглецю визначено його перспективність та недоліки які необхідно врахувати при подальших дослідженнях. Вирішено здійснювати подачу вогнегасних засобів в товщу нафтопродукту, оскільки це мінімізує негативний вплив температурних чинників на засоби гасіння.

2. Запропоновано спосіб гасіння пожеж в резервуарах з нафтопродуктами без розміщення додаткового стаціонарного обладнання, шляхом врізки приладу з вогнегасними речовинами в комунікації технологічного процесу зберігання нафтопродуктів.

3. Розроблене експериментальне устаткування та методику проведення дослідження процесу гасіння пожеж нафтопродуктів комбінованим способом за схемою «тверді гранули діоксиду вуглецю + піноутворювач». Позитивною основою такого комбінування є поєднання усіх трьох принципів фізичного способу гасіння (охолодження, розрідження та ізоляція).

В подальшій роботі, для визначення відносної вогнегасної та економічної ефективності такого комбінованого способу буде проведено комплекс досліджень на розробленому експериментальному устаткуванні з визначення оптимального співвідношення вогнегасних речовин щодо кількості ЛЗР чи ГР.

Література

1. Топільницький, П. І. Фізико-хімічні та експлуатаційні властивості товарних нафтопродуктів [Текст] / П. І. Топільницький, О. Б. Гринишин, О. І. Лазорко, В. В. Романчук. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 248 с.

2. Кількість автозаправних станцій, що знаходяться на території України [Електронний ресурс]. – Uapetrol. – 2017. – Режим доступу: http://www.azs.uapetrol.com/

3. Виробництво основних видів промислової продукції за 2003–2010 роки [Електронний ресурс]. – Державна служба статистики України. – 2011. – Режим доступу: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2006/pr/prm_ric/prm_ric_u/vov2004_u.html

4. Чернецький, В. В. Вплив теплових факторів пожежі на цілісність вертикальних сталевих резервуарів з нафтопродуктами [Текст]: дис. … канд. техн. наук / В. В. Чернецький. – Львів, 2015. – 121 с.

5. Пархоменко, Р. В. Пожежна тактика: курс лекцій [Текст] / Р. В. Пархоменко, Д. О. Чалий, Д. П. Войтович. – Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2017. – 367 с.

6. Васютяк, А. О. Експериментальні дослідження гасіння легкозаймистих рідин гранулами сухого льоду [Текст] / А. О. Васютяк, Б. В. Штайн // Пожежна безпека. – 2015. – № 27. – С. 18–25.

7. Абдурагимов, И. М. Перспективное огнетушащее средство для тушения пожаров легковоспламеняющихся и горючих жидкостей в резервуарах [Текст] / И. М. Абдурагимов, Чан Ван Тхао. – М., 1975. – С. 72–78.

8. Пат. № 2126702 RU. Способ тушения горения жидкостей в резервуарах и устройство для его осуществления. МПК A62C3/06, A62C35/00 [Текст] / Алексеев Ю. С., Заволока А. Н., Межуев Н. Н., Нода А. А., Свириденко Н. Ф., Сенькин В. С. – № 97116246/12; заявл. 24.09.1997; опубл. 27.02.1999. – Режим доступа: http://www.findpatent.ru/patent/212/2126702.html

9. Пат. № 1337107 RU. Способ тушения горения жидкостей в резервуаре. МПК A62C3 12 [Текст] / Будник В. С., Бугаенко В. Ф., Кузнецов В. И., Свириденко Н. Ф., Скорик А. Д., Абрамов В. М. – № 3584549/29-12; заявл. 20.04.83; опубл. 15.09.87, Бюл. № 34. – Режим доступа: http://www.findpatent.ru/patent/133/1337107.html

10. Пат. № 2258549 RU. Способ тушения пожара в резервуаре и устройство для его осуществления. МПК A62C3/06 [Текст] / Кашпоров Л. Я., Кусков Н. А., Селиверстов В. И., Стенковой В. И., Ивашков В. П., Веретинский П. Г., Крестинин В. В., Трубникова Г. В. – Режим доступа: http://www.findpatent.ru/patent/225/2258549.html

11. Пат. № 1687266 RU. Способ тушения горящих жидкостей. МПК A62C1/10 [Текст] / Данилов А. В., Козлов В. А., Стецюк В. Ф., Аблязис Р. А. – № 4710559/12; заявл. 16.05.89; опубл. 30.10.91, Бюл. № 40. – Режим доступа: http://www.findpatent.ru/patent/168/1687266.html

12. Пат. 2209100 RU. Устройство для предупреждения и тушения горения жидкостей в резервуарах [Текст] / Алексеев Ю. С., Бабенко В. С., Донец В. В., Заволока А. Н., Кравчуновский В. Ф., Нода А. А., Свириденко Н. Ф., Сербин В. В. – Режим доступа: http://www.findpatent.ru/patent/220/2209100.html

13. Ковалишин, В. В. Пінне гасіння [Текст] / В. В. Ковалишин, О. Е. Васильєва, Н. М. Козяр. – Львів: СПОЛОМ, 2007. – 168 с.

14. Ковалишин, В. В. Розвиток наукових основ гасіння пожеж на об’єктах значної протяжності [Текст]: автореф. дис. … д-ра техн. наук / В. В. Ковалишин. – Макіївка, 2012. – 36 с.

15. Антонов, А. В. Вогнегасні речовини [Текст] / А. В. Антонов, В. О. Боровиков, В. В. Ковалишин та ін. – К.: Пожінформтехніка, 2004. – 176 с.

Дата надходження рукопису 25.04.2017

Корольов Роман Анатолійович, ад'юнкт, кафедра пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Україна, 79007
E-mail: costaderomantik@gmail.com

Ковалишин Василь Васильович, доктор технічних наук, професор, кафедра пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Україна, 79007
E-mail: Kovalyshyn.v@gmail.com

Штайн Богдан Володимирович, доцент, кафедра пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Україна, 79007
E-mail: lviv.ptarr@gmail.com