

ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДШАРОВОГО ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КОМПРЕСІЙНОЮ ПІНОЮ В РЕЗЕРВУАРАХ З НАФТОПРОДУКТАМИ

Стаття присвячена дослідженню ефективності «підшарового» гасіння пожеж у резервуарах із горючими рідинами за допомогою компресійної піни. У дослідженні застосовувалась спеціально розроблена експериментальна установка, яка дозволяє генерувати та подавати компресійну піну безпосередньо під шар пального.

Ключові слова: «підшарове» гасіння, компресійна піна, резервуар з нафтопродуктом, піна низької кратності.

Постановка проблеми

Гасіння пожеж у резервуарах із нафтопродуктами є одним із найскладніших завдань для пожежно-рятувальних служб. Такі пожежі супроводжуються значними матеріальними збитками, екологічними наслідками та загрозою для життя людей [1]. Зважаючи на масштаби пожеж на об'єктах нафтової промисловості та військові дії, що включають обстріли об'єктів нафтової інфраструктури, розробка ефективних засобів і методів гасіння стає критично важливою. Оперативні дії на таких пожежах організовуються відповідно до вимог нормативних актів з врахуванням особливостей обстановки в конкретний час на місці події та максимально можливим дотриманням заходів безпеки для пожежно-рятувальних підрозділів [2]. Застосування повітряно-механічної піни, часто виявляється неефективним через тривалість гасіння, необхідність великих об'ємів ресурсів і складність проникнення вогнегасних речовин у зону горіння. Одним із перспективних способів є використання компресійної піни, яка має високу стійкість і низьку кратність, а також можливість подавання «підшаровим» способом. «Підшаровий» спосіб гасіння має певну перевагу над традиційним, де піну подають знизу: вся подана піна потрапляє в резервуар (не впливають вітер і теплові потоки); особовий склад не піддається зайвим ризикам при гасінні. Це допомагає забезпечити безпеку піногенераторів та пінопроводів від вибухів парових сумішей. При використанні системи «підшарового» гасіння, піна низької кратності подається безпосередньо під шар нафтопродукту через пінопровід системи пожежогасіння, що розташований у нижній частині резервуара, за допомогою пересувної пожежної техніки.

З початком виробництва плівкоутворювальних ПУ з'явилась перспектива в освоєнні «підшарового» способу гасіння пожеж в резервуарах із подаванням піни безпосередньо в шар пального. Дослідження такого способу гасіння розпочались у США у 1972 році, пізніше до досліджень у цій галузі приєдналися Велика Британія та багато інших країн, в тому числі і Україна [3].

В Україні перша система "підшарового" пожежогасіння була впроваджена на нафтоперекачувальній станції (НПС) "Кременчук" ДАТ "Придніпровські магістральні нафтопроводи" для захисту резервуарів з нафтою об'ємом 10 000 м³. Розробку системи провели фахівці ВАТ "Інститут транспорту нафти". У цій системі використана передова на той час автоматизована система дозування ПУ, з використанням резервуарів з еластичним балоном та дозаторів широкого діапазону виробництва компанії "SvenskaSkum" [1].

Система автоматизації, яка впроваджена на об'єкті, передбачає:

- організацію централізованого контролю і керування процесом пінного пожежогасіння з місцевого диспетчерського пункту;
- підвищення ефективності експлуатації системи і скорочення матеріальних збитків під час пожежі завдяки оперативності надання інформації і організації автоматичного пожежогасіння;
- збільшення термінів періодичності обслуговування і скорочення термінів проведення ремонтних робіт технічних засобів автоматичної системи пожежогасіння.

Впроваджена автоматизована система забезпечує повну автоматизацію процесу збирання інформації, а також вирішення завдань контролю та управління процесом пінного гасіння пожежі на об'єктах НПС "Кременчук". Система успішно пройшла випробування і була введена в експлуатацію [1].

Основні переваги компресійної піни [4]:

- утворення піни відбувається безпосередньо за насосною установкою, що дає змогу зменшити енергетичні затрати на її доставку до місця пожежі;
- компресійну піну можна подавати на значні відстані, навіть по вертикалі (до 400 м);
- компресійна піна є високоструктурованою, компактною та складається з великої кількості однорідних одиночних пухирців. Відношення маси до поверхні є сприятливим для інтенсивної теплопередачі, що призводить до значного ефекту охолодження нагрітої поверхні;
- оскільки компресійна піна утворюється за допомогою повітря під тиском, то додатково отримує від нього енергію, потрібну для доставки її безпосередньо в осередок пожежі. При цьому, на відміну від води, не відбувається випаровування малих крапель на етапі доставки струменя в осередок пожежі, що значно підвищує коефіцієнт використання вогнегасної речовини;
- пожежні рукави, заповнені компресійною піною, значно легші, а отже, підвищується маневреність ствольника;
- компресійна піна може мати як підвищений склад рідкої фази, що підсилює ефект охолодження, так і понижений склад рідкої фази, що веде до підсилення адгезії та дає змогу використовувати її для вогнезахисту вертикальних поверхонь та гасіння електрообладнання під напругою;
- понижений склад рідкої фази зменшує прямі збитки під час гасіння пожеж у поверхових будівлях та на горищах через уникнення затоплення нижчих поверхів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У своїй роботі [5] автори згадують про високу вартість систем CAFS (compressed air foam system), хоча вони не наводять детального аналізу економічної ефективності їх використання порівняно з іншими способами пожежогасіння. Дослідження у роботі [6] зосереджені на властивостях компресійної піни та технологічних аспектах її генерування, однак не була розглянута поведінка піни у середовищі нафтопродуктів. У статті [7] описано функціонально-фізичну схему для генерування компресійної піни та запропоновані лише теоретичні підходи, відсутні результати експериментального тестування запропонованої установки. У роботі [8] також досліджувалася компресійна піна, зокрема її стисливість. Проте це дослідження потребує подальшого підтвердження та розширення, оскільки відсутня достатня інформація про порівняння з іншими типами піни за різних умов стиску. Крім того, постає питання щодо калібрування і надійності обладнання, розробленого

спеціально для цього експерименту, а також його співставлення з існуючими приладами та методиками. У [9] науковці досліджували ефективність системи гасіння пожеж компресійною піною (CAFS) при різних співвідношеннях повітря та робочого розчину піноутворювача (1:4, 1:7, 1:10). Експерименти показали, що оптимальне співвідношення для плівкоутворювального піноутворювача (AFFF) становить 1:7, що забезпечило найшвидше гасіння (30 секунд). Система зменшила витрати води до 90% в порівнянні з традиційними методами, а також показала екологічну та економічну ефективність. Однак у статті був проаналізований лише короткостроковий ефект (до 5 хв) стійкості піни, варто дослідити, як тривале зберігання піни в резервуарі вплине на її стійкість. Модель гасіння нафтопродуктів компресійною плівкоутворювальною піною, яка може застосовуватись для гасіння пожеж в резервуарах, досліджувалась у роботі [10], але питання, які пов'язані з подачею компресійної піни під шар нафтопродукту, що горить, залишилися невирішеними. У дослідженні [11] аналізувалися параметри кратності компресійної піни та досліджувався вплив рідин (вода, бензин, дизель) на її руйнування при подаванні під шар палива та на поверхню. Піна продемонструвала хороші показники кратності і стійкості, а отримані дані підтвердили можливість застосування цього типу піни для «підшарового» гасіння.

Мета та завдання статті

Метою дослідження є визначення ефективності «підшарового» гасіння резервуарів з нафтопродуктами за допомогою компресійної піни в полігонних умовах на прикладі макетного резервуара об'ємом 0,25м³.

Для досягнення поставленої мети потребують вирішення наступні завдання:

1. Розробити експериментальну установку для генерування компресійної піни та провести «підшарове» гасіння пожежі нафтопродукту в макетному резервуарі за допомогою компресійної піни, визначити ефективність такого гасіння та встановити основні вогнегасні характеристики компресійної піни.

2. Дослідити вплив кратності компресійної піни на ефективність «підшарового» гасіння пожежі бензину в резервуарі за допомогою моделювання в програмному продукті SolidWorks Flow Simulations, а також визначити оптимальні параметри подавання піни для зниження часу гасіння та економічної ефективності.

Виклад основного матеріалу

Основою для проведення дослідження з «підшарового» гасіння пожежі в макетному резервуарі стала самостійно розроблена установка для генерування компресійної піни (рис. 1) яка передбачає:

- зберігання робочого розчину піноутворювача;
- подавання робочого розчину піноутворювача в камеру змішування за допомогою повітря;
- перемішування робочого розчину піноутворювача з повітрям в камері змішування та утворення компресійної піни;
- регулювання тиску у балонах з повітрям;
- подавання готової компресійної піни на гасіння.

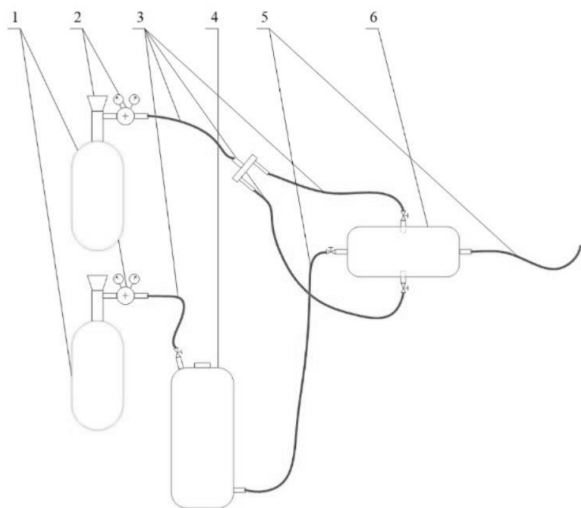


Рис. 1. Установка для генерування компресійної піни: 1) балон з повітрям; 2) редуктор з манометрами високого та середнього тиску; 3) шланги для подавання повітря $\varnothing 10$ мм; 4) емність (типу вогнегасника) з робочим розчином піноутворювача ($V = 12$ дм³); 5) шланги для подавання робочого розчину/піни; 6) камера змішування робочого розчину із повітрям.

Важливу увагу приділяли герметичності всіх з'єднань та калібруванню клапанів для забезпечення стабільної роботи системи. Основним елементом установки є камера змішування, в якій відбувався процес генерування компресійної піни. Повітря в камеру змішування потрапляло через 2 вмонтовані штуцери, до яких прикріплені шланги високого тиску $\varnothing 10$ мм, які забезпечували необхідний об'єм повітря:

- для змішування з робочим розчином піноутворювача та утворення компресійної піни;
- для подавання компресійної піни до резервуару на гасіння.

Загальний вигляд камери змішування можна побачити на рис. 2.

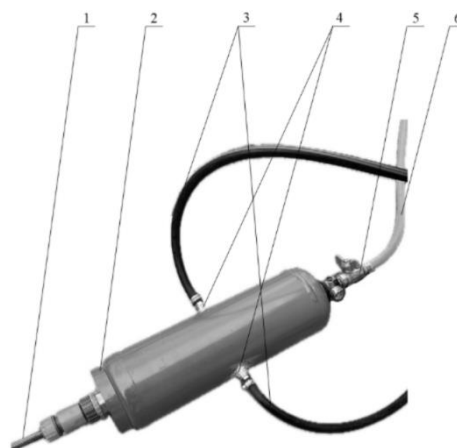


Рис. 2. Загальний вигляд камери змішування: 1) шлаг для подавання готової компресійної піни; 2) камера змішування; 3) міцні шланги для подавання повітря; 4) штуцери для подавання повітря в середину камери змішування; 5) перекривний кран; 6) шланг для подавання робочого розчину в камеру змішування.

Камера змішування виготовлена з корпусу вогнегасника об'ємом 3 дм³. Цього достатньо щоб генерувати необхідну кількість компресійної піни на гасіння макетного резервуара. Для генерування компресійної піни було використано піноутворювач підвищеної стійкості «Барс S-2». Як горючу речовину використовували бензин у кількості 100 літрів, який заливався безпосередньо в резервуар перед початком експерименту. Перед кожним експериментом система наповнювалася 12 дм³ 6% розчину піноутворювача. Для забезпечення безпеки експерименту резервуар з бензином встановлювався на відкритому майданчику. Також для експерименту було використано:

- ваги з межею зважування 10 кг з ціною поділки 0,005 кг;
- манометр згідно з ДСТУ 7224:2011 з верхньою межею вимірювання 1 МПа і ціною поділки 0,01 МПа;
- термометр згідно з ДСТУ OIML R 133:2019 з діапазоном вимірювання від 0 до 100°C і ціною поділки 1°C;
- циліндр 1-500 згідно з ДСТУ ISO 1042:2005 з ціною поділки 10 см³;
- секундомір з межею вимірювання 3600 с і ціною поділки 0,2 с.

Всього було проведено три експерименти з «підшарового» подавання компресійної піни. Перед початком кожного експерименту готували 12 дм³ робочого розчину піноутворювача та виливали у ємність типу вогнегасника (рис. 1) для зберігання робочого розчину. Після чого ємність герметично закривали та приєднували до балону із стиснутим повітрям та до камери змішування. Цей балон із стиснутим повітрям використовувався тільки для виштовхування робочого розчину піноутворювача з ємності для зберігання до камери змішування через гнучкі шланги. Утворення компресійної піни відбувалося в камері змішування, яка мала окреме джерело повітря. Перед початком дослідження установка для генерування компресійної піни була під'єднана до дна макетного резервуара об'ємом 0,25 м³ (рис. 3).

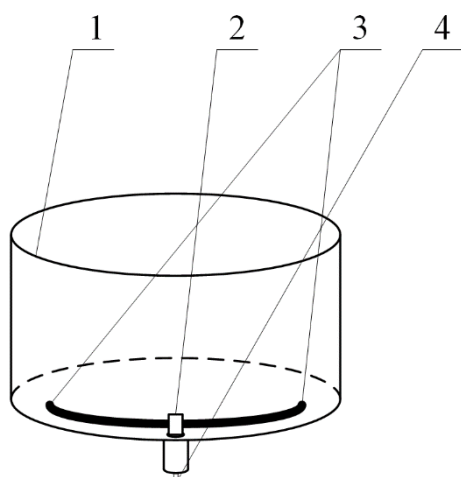


Рис. 3. Загальний вигляд макетного резервуара з розподільчою системою: 1) макетний резервуар ($V = 0,25 \text{ м}^3$); 2) розподільча система для подавання компресійної піни; 3) місце виходу компресійної піни; 4) місце приєднання установки для генерування компресійної піни.

Резервуар виготовлений зі сталі та має форму циліндра з герметичним дном та відкритим дахом. На дні резервуара розташована розподільча системи для подавання компресійної піни, яка забезпечує рівномірний розподіл піни під шаром горючої рідини.

На початку експерименту бензин у резервуарі підпалювався відкритим полум'ям. Висота полум'я досягала 2-3 розмірів резервуара. Через 60 секунд після початку горіння подавалась компресійна піна.

Піна подавалась під шар горючої рідини через систему, змонтовану на дні резервуара. Завдяки дії повітря в камері змішування утворювалась компресійна піна з низькою кратністю, яка

рівномірно розподілялася по поверхні горючої рідини. Час гасіння фіксувався секундоміром, починаючи з моменту початку подавання піни і до повного припинення горіння. Додатково проводився візуальний контроль покриття дзеркала горіння піною після гасіння.

Особлива увага приділялась стійкості піни після припинення її подавання. Витрати розчину обчислювались шляхом вимірювання залишків після кожного експерименту. Це дозволяло оцінити ефективність системи у витратах ресурсів. У результаті проведених експериментів було отримано дані про ефективність «підшарового» гасіння бензину у макетному резервуарі за допомогою компресійної піни. У табл. 1 узагальнені основні результати досліджень.

Таблиця 1
Результати «підшарового» гасіння бензину компресійною піною

№ Досліду	Об'єм розчину, дм ³	Використано розчину, дм ³	Кратність	Тиск подавання, МПа	Час гасіння, с
1	12	3,1	10,7	4	56
2	12	2,9	10,3	4	52
3	12	3,2	10,8	4	57

Компресійна піна продемонструвала здатність ефективно ізолювати дзеркало горіння бензину. Час гасіння становив від 52 до 57 секунд залежно від експерименту. Це вказує на стабільну ефективність «підшарового» способу гасіння, який забезпечує швидке припинення горіння завдяки створенню непроникного шару піни. Система дозволила досягти ефективного гасіння при використанні лише 2,9–3,2 літра розчину піноутворювача. Це свідчить про економічну доцільність компресійної піни, оскільки її низька кратність забезпечує щільний і стабільний шар на поверхні горючої рідини. Кратність компресійної піни становила 10,3–10,8. Завдяки цьому піна утворює густий і щільний шар, який ізолює поверхню горючої рідини та перешкоджає випаровуванню парів. Це критично важливо для запобігання повторному займанню та ефективного контролю над горінням. Використання тиску 4 МПа забезпечило рівномірний розподіл піни по поверхні бензину. Це дозволило значно зменшити час гасіння та знизити втрати горючої рідини під час пожежі. Тиск подавання виявився достатнім для створення стабільної компресійної піни. Після припинення подавання піни, її шар утримувався на поверхні бензину протягом тривалого часу, ефективно перешкоджаючи випаровуванню горючих парів. Це підтверджує здатність компресійної піни створювати

довготривалу ізоляцію, необхідну для запобігання повторному займанню.

Для теоретичних досліджень використовувався програмний продукт SolidWorks Flow Simulations. Розрахунки проводились для резервуара об'ємом 5000 м³. Дані для моделювання наближені до результатів дослідження з гасіння пожежі бензину «підшаровим» способом в макетному резервуарі (розділ 5). Розглянуто подавання піни кратністю 10 при тиску 4 МПа. Також, додатково, було проведено аналогічне моделювання для піни кратністю 5 при тиску 4 МПа та проведено порівняння.

Мінімально необхідна інтенсивність подавання піни для «підшарового» гасіння в резервуар становить 28 кг/с, резервуар діаметром 16 м. З врахуванням гідростатичного тиску ця піна подається під тиском 2 МПа на виході із сопла. Збільшивши напір до зростання тиску в 4 МПа, отримаємо 56 кг/с. Тобто таким чином збільшено мінімальну необхідну інтенсивність подавання в 2 рази. Температуру дзеркала горіння прийнято 433 °K (160 °C), в температура бортів резервуара на рівні дзеркала горіння 650 °K (377 °C) [12, 13]. Маса пари від піни яка подається під тиском 2 МПа та виходить на поверхню горіння протягом 5 хвилин приблизно дорівнює 2500 кг. На рис. 4 відображено графічну залежність маси піни кратністю 10 на дзеркалі горіння від часу її подавання та тиску 4 МПа. Як видно піна з кратністю 10 при тиску подавання 4 МПа досягає рівня 2500 кг протягом 180 с. Звідси виходить що, чим більший тиск при подаванні піни, тим швидший і її вихід. Тому температуру дзеркала горіння слід «зменшити» із 160°C до 100°C, що є пропорційно до виходу піни значенням 2500 кг. Також слід збільшити тривалість дослідження моделі після зміни температури, оскільки, як показали дослідження [2], спочатку іде викид пари, а потім, в міру зменшення середньої температури, вже іде піна. Для визначення продуктивності виходу піни на поверхню горіння встановимо часовий проміжок 120 с після виходу піни.

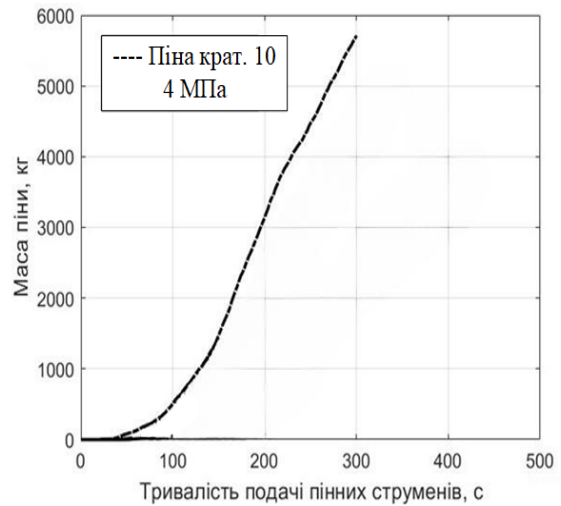


Рис. 4. Графічна залежність маси піни кратністю 10 на дзеркалі горіння від часу її подавання та тиску 4 МПа.

Це ж саме проробимо з піною кратністю 5. На рис. 5 відображено графічну залежність маси піни кратністю 5 на дзеркалі горіння від часу її подавання та тиску 4 МПа.

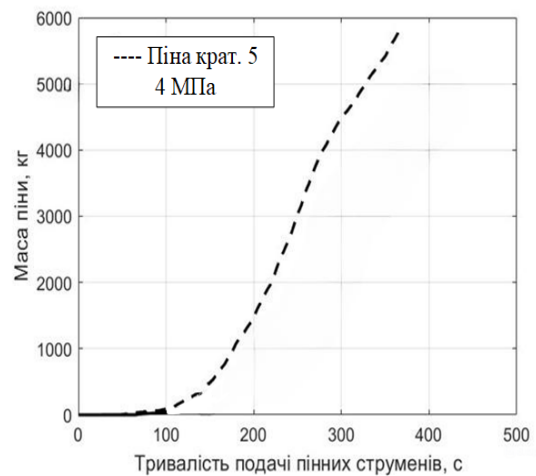


Рис. 5. Графічна залежність маси піни кратністю 5 на дзеркалі горіння від часу її подавання та тиску 4 МПа.

Виходячи з цього, подальші дослідження процесу «підшарового» гасіння проведемо для таких параметрів піни:

- Піна кратністю 10 – 4 МПа 180 с + 120 с;
- Піна кратністю 5 – 4 МПа 245 с + 120 с.

Графічна залежність масових витрат піни кратністю 10 та пари на виході резервуара від часу, при тиску подавання 4 МПа зображена на рис. 6.

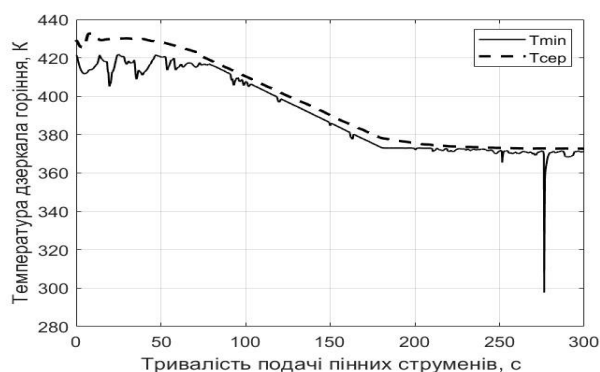


Рис. 6. Температура середовища на дзеркалі горіння при гасінні піною кратністю 10 та при тиску подавання 4 МПа.

Вихід піни кратністю 10 при тиску подавання 4 МПа з 200 с до 300 с (рис. 4) становить:

$$5688 - 3142 = 2546 \text{ кг};$$

Масова витрата піни (Q_m) становить 25,5 кг/с. Об'ємна витрата піни (Q_v) становить 318 $\text{дм}^3/\text{с}$ (0,32 $\text{м}^3/\text{с}$).

Час умовного гасіння (досягнення висоти шару піни 100 мм на дзеркалі, $V=35 \text{ м}^3$) становить: $35/0,32=110 \text{ с}$;

$$\text{Повний час гасіння: } 200 + 110 = 310 \text{ с.}$$

Графічна залежність масових витрат піни кратністю 5 та пари на виході резервуара від часу, при тиску подавання 4 МПа зображена на рис. 7.

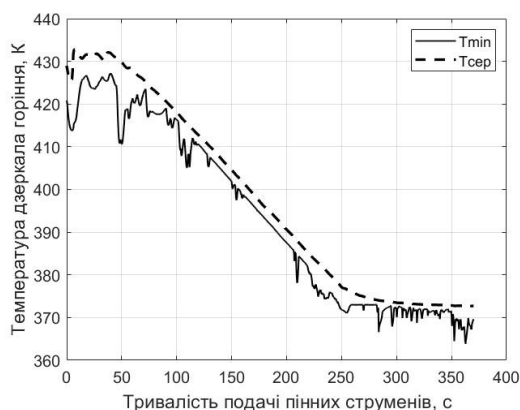


Рис. 7. Температура середовища на дзеркалі горіння при гасінні піною кратністю 5 та при тиску подавання 4 МПа.

Вихід піни кратністю 5 при тиску подавання 4 МПа з 250 с до 370 с (рис. 5) становить:

$$5893 - 3000 = 2893 \text{ кг (K6,25)};$$

Масова витрата піни (Q_m) становить 24,1 кг/с. Об'ємна витрата піни (Q_v) становить 150,7 $\text{дм}^3/\text{с}$ (0,151 $\text{м}^3/\text{с}$).

Час умовного гасіння (досягнення висоти шару піни 100 мм на дзеркалі, $V = 35 \text{ м}^3$) становить: $35/0,151 = 232 \text{ с}$;

Повний час гасіння: $250 + 232 = 482 \text{ с}$.

Отримані внаслідок моделювання результати розміщені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати дослідження отримані внаслідок моделювання

Піна	Час подавання до гасіння, с	Витрати піни, кг	Витрати піноутворювача, кг
Кратність 10 4 МПа	310	17360	1389
Кратність 5 4 МПа	482	26992	4319

Згідно проведеного моделювання встановлено, що піна кратністю 5 є менш ефективною в плані часу гасіння пожежі та через значно більші витрати піноутворювача є економічно не вигідною.

Висновки

1. Розроблена експериментальна установка для генерування компресійної піни базується на забезпеченні стабільності та контролю процесу. Використання модифікованого корпусу вогнегасника (3 дм^3) як камери змішування забезпечило ефективне утворення компресійної піни шляхом комбінування робочого розчину піноутворювача зі стисненим повітрям. Основні властивості установки це те, що вона дозволяє одночасне зберігання, генерування та подавання компресійної піни, а також можливість регулювати тиск подавання в залежності від потреб. Герметичність з'єднань мінімізувала втрати робочого розчину, що підтвердилося під час триразового проведення дослідів. Однак для випробувань на промислових масштабах необхідно провести додаткові дослідження та адаптувати установку до гасіння пожеж в резервуарах великої місткості. Дослідження «підшарового» гасіння бензину в макетному резервуарі (250 дм^3) засвідчило високу ефективність компресійної піни з низькою кратністю. Результати підтверджують, що «підшарове» гасіння компресійною піною є перспективною альтернативою традиційним методам. Його основні переваги - економічність, стабільність ізоляційного шару піни та зниження ризиків для пожежних підрозділів, що роблять його особливо актуальним для умов воєнного часу, коли швидкість та ефективність гасіння визначають масштаби катастроф. Середній час гасіння становив

55 с при витраті 3 дм³ розчину піноутворювача, що робить «підшаровий» спосіб економічно вигідним у порівнянні з традиційними способами гасіння. Компресійна піна створює щільний і стійкий шар, який ефективно ізолює дзеркало горіння та обмежує доступ горючих парів в зону горіння і запобігає повторному займання. «Підшарове» гасіння показало стабільні результати в лабораторних умовах. Проте для застосування способу в промислових масштабах потрібні додаткові дослідження з оптимізації системи подавання піни та розрахунку витрат ресурсів. Отримані результати підтверджують, що «підшарове» гасіння компресійною піною є перспективним методом для ліквідації пожеж класу В у резервуарах із горючими рідинами. Даний метод може бути рекомендований для впровадження в пожежно-рятувальні підрозділи та використовуватись у системах автоматизованого гасіння.

2. Відповідно до проведених розрахунків на гасіння резервуару з нафтопродуктом за допомогою піни кратністю 5 було витрачено 4319 кг піноутворювача при тиску в 4 МПа відповідно, що становить у 3 рази більше ніж при використанні піни кратністю 10 (1389 кг при тому самому тиску). Також відрізняється і час гасіння: при подаванні піни кратністю 5, час гасіння становить 482 с при тиску 4 атм, що є на 172 с більше ніж при використанні піни кратністю 10 (310 с при тому самому тиску). Отже, звідси виходить що подавання піни кратністю 5 є менш ефективне в плані часу гасіння пожежі, та через значно більші витрати піноутворювача є економічно не вигідне.

Література

1. Войтович Т.М. Вдосконалення технології «підшарового» пожежогасіння в резервуарах з нафтопродуктами : дис. ... д-ра філософії : 261. Львів, 2020. 216 с. URL: https://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/3_nauka/svr/razovi/disertaciya_voytovich_t.m.pdf;
2. Ковалишин, В. В., Великий, Н. Р., Ковалишин, В. В., Войтович, Т. М., Бунь, Р. А., Новіцький, Я. М., & Фірман, В. М. (2024). Розроблення технології гасіння компресійною піною підшаровим способом резервуарів з нафтопродуктами. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10) (129), 6–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.305684>;
3. Kovalyshyn V. V., Vasileva O. E., Koziar N. M. Pinne gasinia (2007). [Foam quenching]. ISBN 978-966-665-473-4. Spolom. Lviv. Ukraine;
4. Титаренко А. В. Газонаповнена піна – ефективний засіб пожежогасіння лісових пожеж. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. № 25.9. С. 246-250. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&S21P03=FILE=&S21STR=nvnltnu_2015_25_9_41;

5. Вілінський Р. В. Гаврилюк А. Ф. Аналіз використання компресійної піни. Львівський державний університет безпеки життєдіяльності // Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: зб. наук. Праць XV Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, курсантів та студентів. Львів, 2020. С.16-17. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/6990/1/1-16-46.pdf>;

6. Kodryk, A., Nikulin, O., Titienko, O., Kurtov, A., & Shakhov, S. (2019). Залежність властивостей компресійної піни від робочих параметрів процесу генерування піни. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 1(17), 54–63. <https://doi.org/10.33269/nvcs.2019.1.54-63>;

7. Нікулін О. Ф., Кодрик А.І., Тітенко О.М., Виноградов С.А., Шахов С.М. Функціонально-фізична схема установки для генерації компресійної піни. Харків, (2018). <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2018-7-146-163-166>;

8. Chen, Y., Chen, T., Fu, X. C., Bao, Z. M., & Hu, C. (2021). The research of compressibility of compressed air foam. *Journal of Physics: Conference Series*, 1820(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1820/1/012021>;

9. Dong-Ho, Rie; Jang-Won, Lee; Seonwoong, Kim. (2016). Class B Fire-Extinguishing Performance Evaluation of a Compressed Air Foam System at Different Air-to-Aqueous Foam Solution Mixing Ratios. *Applied Science*, 6, 191. <https://doi.org/10.3390/app6070191>;

10. Rie, D.-H., Lee, J.-W., & Kim, S. (2016). Class B fire-extinguishing performance evaluation of a compressed air foam system at different air-to-aqueous foam solution mixing ratios. *Applied Sciences*, 6(7), 191. <https://doi.org/10.3390/app6070191>;

11. Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovych, T., & Pastukhov, P. (2023). Дослідження стійкості та кратності компресійної піни. *Пожежна безпека*, 43, 34-40. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.05>;

12. П.П. Ключ, В.Г. Палюх, А.С. Пустовой, Ю.М. Сенчихін, В.В. Сировой. *Пожежна тактика: Підруч. — Х.: Основа, 1998.*;

13. Довідник керівника гасіння пожеж / За загальною редакцією В.С. Кропивницького. — К.: ТОВ «Літера-Друк», 2016. — 320 с.

References

1. Voitovych T.M. (2020). Improvement of the Subsurface Extinguishing Technology in Tanks with Petroleum Products. Doctor's thesis. Lviv [in Ukrainian] Available at: https://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/3_nauka/svr/razovi/disertaciya_voytovich_t.m.pdf;
2. Kovalyshyn, V., Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovych, T., Bun, R., Novitskyi, Y., & Firman, V. (2024). Devising technology for extinguishing oil tanks using compressed foam by sub-layer technique. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10) (129), 6–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.305684>;
3. Kovalyshyn V. V., Vasileva O. E., Koziar N. M. Pinne gasinia (2007). [Foam quenching]. ISBN 978-966-665-473-4. Spolom. Lviv. Ukraine;
4. Tytarenko A. V. «Gas-filled foam is an effective means of extinguishing forest fires». (2015). The Scientific Bulletin of UNFU. Vol. 25.9. pp.246-250; Available at: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&S21P03=FILE=&S21STR=nvnltnu_2015_25_9_41

FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=nvnlts_2015_25.9_41;

5. Vilinskyi R. V., Havrylyuk A. F. (2020). «Analysis of the use of compression foam». Problems and Prospects of Life Safety System Development: Proceedings of the XV International Research and Practical Conference of Young Scientists, Cadets and Students. Lviv, pp.16-17. Available at: <https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/6990/1/1-16-46.pdf>;

6. Kodryk, A., Nikulin, O., Titienko, O., Kurtov, A., & Shakhov, S. (2019). DEPENDENCE OF COMPRESSION FOAM PROPERTIES FROM WORKING PARAMETERS OF FOAM GENERATION PROCESS. Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety, 1(1(7), 54–63. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2019.1.54-63>;

7. Nikulin O. F., Kodrik A. I., Titenko O. M., Vinogradov S. A., Shakhov S. M. Functional physical scheme of the installation for the generation of compressed air foam. Kharkiv, 2018. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2018-7-146-163-166>;

8. Chen, Y., Chen, T., Fu, X. C., Bao, Z. M., & Hu, C. (2021). The research of compressibility of compressed air

foam. Journal of Physics: Conference Series, 1820(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1820/1/012021>;

9. Dong-Ho, Rie; Jang-Won, Lee; Seonwoong, Kim. (2016). Class B Fire-Extinguishing Performance Evaluation of a Compressed Air Foam System at Different Air-to-Aqueous Foam Solution Mixing Ratios. Applied Science, 6, 191. <https://doi.org/10.3390/app6070191>;

10. Rie, D.-H., Lee, J.-W., & Kim, S. (2016). Class B fire-extinguishing performance evaluation of a compressed air foam system at different air-to-aqueous foam solution mixing ratios. Applied Sciences, 6(7), 191. <https://doi.org/10.3390/app6070191>;

11. Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovych, T., & Pastukhov, P. (2023). RESEARCH OF STABILITY AND EXPANSION OF COMPRESSION FOAM. Fire Safety, 43, 34-40. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.05>.

12. Klus, P., Palukh, V., Pustovoi, A., Senchukhin, Yu., Sirovoi, V. (1998). Fire tactics. Kharkiv: OSNOVA.;

13. Handbook of the head of fire fighting. (2016).

According to the general edition Kropivnitsky V. Kyiv: Ltd "Litera-Druk", 320;

Рецензент: д-р техн. наук, доцент О.І. Лавренюк, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, України

Автор: КОВАЛИШИН Василь Васильович
доктор технічних наук, професор, професор кафедри
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

E-mail - kovalyshyn.v@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5463-0230>

Автор: ВЕЛИКИЙ Назарій Романович
ад'юнкт
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

E-mail - nvelukuy6@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7967-4491>

RESEARCH ON SUBSURFACE FIRE SUPPRESSION USING COMPRESSION FOAM IN TANKS WITH PETROLEUM PRODUCTS

V. Kovalyshyn, N. Velykyi

Lviv State University of Life Safety

The article is devoted to studying the effectiveness of "subsurface" fire suppression in tanks containing flammable liquids using compression foam. The research utilized a specially designed experimental setup that enables the generation and delivery of compression foam directly beneath the fuel layer. The compression foam covered the burning surface, remained stable for an extended period without breaking down, and prevented combustible vapors from entering the combustion zone, which is a key factor in halting the burning process. Experiments were conducted under laboratory conditions using a mock tank with a capacity of 250 liters. The compression foam generation system included: a fire extinguisher-like structure with a 12-liter capacity, air cylinders, medium- and high-pressure regulators with pressure gauges, a mixing chamber, valves, and flexible hoses through which the prepared foam was delivered. The foam was injected beneath the flammable liquid layer at a pressure of 4 MPa, ensuring its even distribution across the entire burning surface area. The results, based on three conducted experiments, demonstrated that the extinguishing time ranged from 52 to 57 seconds, with foam solution consumption varying between 2.9 and 3.2 liters. The low expansion ratio of the foam contributed to the formation of a dense and stable layer that effectively remained on the gasoline surface, preventing the evaporation of combustible vapors and eliminating the possibility of re-ignition. Particular attention was given to the economic efficiency of the method, as "subsurface" suppression with compression foam significantly reduces the consumption of foaming agents compared to traditional methods. The article also examines the main advantages of the "subsurface" approach over surface extinguishing. Delivering foam from below ensures a stable and controlled suppression process. Key limitations of the method are outlined, including the need to optimize the foam delivery system for large-volume tanks. Directions for further research are proposed to adapt the method for industrial conditions.

Keywords: subsurface fire suppression, compression foam, tank with petroleum products, low-expansion foam.