УДК 614.84:662.767:628.9

ТАКТИЧНІ ПІДХОДИ ДО ГАСІННЯ ПОЖЕЖ У ПІДЗЕМНИХ РЕЗЕРВУАРАХ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ НАФТОПРОДУКТІВ

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-1

Панченко С. О.[1*], ORCID iD 0000-0002-1781-3935
Ніжник В. В.[2], ORCID iD 0000-0003-3370-9027
Федоренко Д. С.[1], ORCID ID 0000-0002-2069-7760
Кропива М. О.[1], ORCID ID 0000-0002-1111-8747
*E-mail: panchenko_serhii@nuczu.edu.ua

[1]Національний університет цивільного захисту України, Україна
[2]Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 26.02.2026
Прийнято: 14.04.2026
Опубліковано: 30.05.2026

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

підземні резервуари, нафтопродукти, пожежогасіння, піна, водяна мла, теплове випромінювання, комбіноване гасіння

АНОТАЦІЯ

У статті обґрунтовано тактичні підходи до гасіння пожеж у підземних резервуарах для зберігання нафтопродуктів та елементах підземної інфраструктури резервуарних парків в умовах обмеженого доступу, руйнування стаціонарних систем пожежогасіння і високої ймовірності утворення вибухонебезпечних пароповітряних сумішей. Актуальність дослідження зумовлена тим, що такі пожежі характеризуються складністю розвідки, ускладненим подаванням вогнегасних речовин, значним тепловим впливом на особовий склад і ризиком поширення горіння підземними комунікаціями, тоді як у чинній практиці відсутні достатньо структуровані тактичні рішення для подібних сценаріїв. У результаті дослідження сформовано алгоритми безпечного розгортання сил і засобів, визначено підходи до ізоляції джерела парів, локалізації розливів, застосування піни низької та середньої кратності в замкнених об'ємах, а також обґрунтовано доцільність комбінованого гасіння із поєднанням водяної мли та порошкових засобів для ліквідації локальних осередків на арматурі й у важкодоступних зонах. Встановлено, що під час аварійної фази пріоритет мають дистанційні дії, а вхід у підземні порожнини є недопустимим без виконання вимог контрольованого допуску до замкнених просторів. Для сценарію з тепловою потужністю 15 МВт моделювання показало зниження щільності теплового потоку на відстані 1,6 м з 8,2 до 2,6 кВт/м², тобто приблизно на 68 %, а зменшення цього показника нижче 4 кВт/м² відбувається орієнтовно через 20 с після активації зрошення. Практична цінність одержаних результатів полягає у можливості їх використання для планування оперативних дій, підготовки підрозділів ДСНС України та підвищення безпеки особового складу під час ліквідації пожеж у підземних резервуарах.

Постановка проблеми. Пожежі на об'єктах зберігання нафти та нафтопродуктів належать до категорії найбільш небезпечних техногенних явищ, оскільки поєднують високий ризик вибухів, інтенсивне теплове випромінювання, швидке поширення вогню по розлитих горючих рідинах та суттєвий вплив на навколишнє середовище. Особливо складними для ліквідації є пожежі у підземних резервуарах, які через свою конструктивну замкненість, накопичення вибухонебезпечних пароповітряних сумішей та обмежений доступ для оперативних підрозділів створюють специфічні небезпеки для особового складу. Наявність замкнених просторів значно ускладнює організацію розвідки, подачу вогнегасних речовин, а також контроль за поширенням вогню по комунікаціях, що безпосередньо загрожує як ефективності гасіння, так і безпеці рятувальників.

На практиці ліквідація таких пожеж нерідко супроводжується руйнуванням конструкцій, викидом чи спінюванням нафтопродуктів, розповсюдженням парів через вентиляційні системи, що ускладнює

вибір тактики та потребує спеціальних заходів для локалізації наслідків. Додатковим чинником є сучасні реалії збройної агресії, за яких резервуарні парки стають об'єктами цілеспрямованих ударів, що призводить до масових горінь у підземній інфраструктурі та створює необхідність розробки спеціалізованих підходів для підвищення безпеки персоналу й ефективності застосування сил і засобів.

Міжнародний досвід містить рекомендації стосовно конструктивних рішень та протипожежного захисту, але потребує адаптації до українських умов. Водночас, наявні нормативно-правові акти в Україні регламентують загальні питання пожежогасіння на об'єктах нафтопродуктозабезпечення, однак відсутні чітко структуровані вимоги щодо гасіння пожеж у підземних резервуарах.

Таким чином, актуальність проблеми полягає у необхідності формування уніфікованої тактики гасіння пожеж у підземних резервуарах нафтопродуктів, що поєднує міжнародний досвід і національні практики та спрямована на підвищення ефективності реагування і захисту особового складу. В науковій статті розглянуто загальні вимоги до організації та ведення гасіння пожеж, пов'язаних із підземними резервуарами (underground storage tanks, далі - UST) для зберігання нафти та нафтопродуктів, включно з діями під час горіння у зонах горловин/оглядових камер, вентиляційних труб, біля дозаторів та при розливах у підземних комунікаціях. Вони базуються на настановах з безпечної експлуатації складів ЛЗР, що охоплюють як наземні, так і підземні резервуари та містять вимоги до проєктних і протипожежних рішень, а саме: водяне охолодження експозицій, застосування пінних систем, урахування специфіки проведення тактичної вентиляції, зонування, гасіння підземних трубопроводів [1].

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Наразі узагальнений вітчизняний досвід гасіння пожеж на складах нафтопродуктів, що сталися внаслідок обстрілів розкрито в Методичних рекомендаціях щодо організації оперативних дій органів управління та підрозділів ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів, що сталися внаслідок обстрілів в умовах ведення бойових дій. Рекомендації доведено до територіальних органів ДСНС окремим дорученням ДСНС від 23.05.2022 № В-269. Детальні вимоги до тактики гасіння підземних резервуарів, вибору та інтенсивності подачі вогнегасних речовин, а також заходів безпеки при роботі у замкнених просторах у діючих нормативно-правових актах відсутні. Аналіз міжнародного досвіду показує, що в роботі [1] досліджено механізми пригнічення випаровування палив під дією плівкоутворювальних піноутворювачів AFFF і безфтористих альтернатив F3. Показано їхню ефективність у запобіганні повторному займання при гасінні пулових пожеж (англ. – pool fire) - форма горіння рідких вуглеводнів, що виникає внаслідок займання поверхні шару палива, розлитого або розташованого у відкритій ємності. Для даного типу пожеж характерні стала площа горіння, утворення полум'я над шаром рідини та формування радіаційного і конвективного теплообміну. Проте, дослідження проводилися лише для відкритих поверхонь, тоді як поведінка піни у замкнених об'ємах підземних резервуарів залишилася поза увагою. У роботі [2] досліджено ефективність різних вогнегасних засобів під час гасіння пожеж літій-іонних акумуляторів. Автори порівнюють дію окремих агентів за умов інтенсивного тепловиділення та повторного займання, що є важливим для розуміння обмежень універсального застосування вогнегасних речовин у складних пожежних сценаріях. Хоча дослідження не стосується безпосередньо пожеж у підземних резервуарах із нафтопродуктами, його результати підтверджують доцільність диференційованого підходу до вибору засобів гасіння залежно від механізму горіння, джерела тепловиділення та ризику повторного займання. У роботі [3]

досліджено токсикологічні ефекти фторсурфактантів, що використовуються у складі AFFF, та підкреслено необхідність пошуку екологічно безпечніших альтернатив. Це є важливим у контексті вибору піноутворювачів для гасіння пожеж на об’єктах зберігання нафтопродуктів. У публікації [4] здійснено огляд сучасних можливостей і викликів використання безфтористих піноутворювачів. Автори підкреслюють екологічні переваги, але вказують на необхідність збільшених витрат піни та обмежену ефективність при великих площах горіння. Невирішеним залишається питання оптимізації витрати піни для умов обмеженого доступу в підземних резервуарах. У роботі [5] досліджено властивості нано-модифікованої силіконової піни, призначеної для гасіння нафтових пожеж. Автори показують, що модифікація складу піни може підвищувати її стабільність, покривну здатність та вогнегасну ефективність, що є важливим для локалізації горіння рідких вуглеводнів. Хоча дослідження не орієнтоване безпосередньо на підземні резервуари, його результати підтверджують перспективність удосконалення пінних засобів для застосування в складних умовах обмеженого доступу та інтенсивного теплового впливу.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Нормативний документ NFPA 11 [6] регламентує витрати та методи подавання піни різної кратності для гасіння легкозаймистих рідин. Стандарт використовується як базовий міжнародний орієнтир, але він не враховує специфіки пошкоджених чи замкнених резервуарів, характерних для умов воєнних уражень. Вимоги [7] щодо безпеки робіт у замкнених просторах містять рекомендації з організації захисту персоналу. Однак відсутні конкретні тактичні схеми для гасіння пожеж у підземних резервуарах, що створює методичний вакуум для практики пожежних підрозділів. Європейський стандарт EN 12285-1 [8] визначає конструктивні особливості підземних сталевих резервуарів. Документ спрямований на герметичність і надійність, але не містить алгоритмів гасіння пожеж у таких спорудах. Це свідчить про відокремленість інженерних рішень від тактики пожежогасіння. Британські рекомендації HSG176 [9] приділяють увагу застосуванню систем водяного охолодження та піни на складах ЛЗР. Водночас сценарії гасіння у підземних резервуарах розглянуті лише побіжно, що обмежує їх практичну цінність.

Методичні рекомендації ДСНС України (2022) визначають організацію оперативних дій підрозділів під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів, зокрема в умовах бойових дій, і були використані як основа для узагальнення практичних підходів до реагування на такі пожежі [10]. Проєкт рекомендацій ДСНС України (2024) систематизує підходи до гасіння пожеж у резервуарах і резервуарних парках на складах нафти та нафтопродуктів, тому його використано для уточнення тактичних рішень щодо подачі вогнегасних речовин і організації дій на таких об’єктах [11]. Статут дій встановлює загальний порядок організації, управління силами і засобами та виконання оперативних дій під час пожежогасіння, тому його положення використано як нормативну основу дослідження [12]. Наказ ДСНС України [13] визначає порядок удосконалення організації реагування на надзвичайні ситуації та небезпечні події, тому його положення використано для обґрунтування координації дій підрозділів під час ліквідації пожеж на об’єктах зберігання нафтопродуктів. Наказ ДСНС України [14] визначає особливості реагування на надзвичайні ситуації в умовах збройної агресії, тому його положення використано для врахування специфіки організації дій підрозділів під час гасіння пожеж на об’єктах зберігання нафтопродуктів у воєнний період. Правила безпеки праці в органах і підрозділах ДСНС [15] встановлюють вимоги щодо безпечного виконання робіт особовим складом, тому їх положення використано для обґрунтування заходів захисту рятувальників під час

гасіння пожеж на об’єктах зберігання нафтопродуктів. Окреме доручення ДСНС України [16] регламентує удосконалення організації реагування на надзвичайні ситуації та відображає практичні підходи до управління силами і засобами під час ліквідації пожеж на об’єктах зберігання нафтопродуктів. Окреме доручення ДСНС України [17] визначає порядок удосконалення реагування на надзвичайні ситуації та небезпечні події і відображає актуалізовані організаційні підходи до координації дій підрозділів під час ліквідації пожеж. Окреме доручення ДСНС України [18] встановлює заходи безпеки для органів і підрозділів служби та визначає організаційні вимоги до захисту особового складу під час виконання оперативних дій у небезпечних умовах.

Таким чином, наявні дослідження та нормативні акти підтверджують актуальність проблеми, проте залишають невирішеними питання тактики гасіння підземних резервуарів із нафтопродуктами. Відсутність уніфікованих підходів до подачі піни та охолодження в умовах обмеженого доступу й підвищеної небезпеки вибухів утворює науково-практичну проблему, вирішенню якої присвячено дану статтю.

Методи дослідження. У роботі застосовано методи аналізу та порівняння вимог вітчизняних і міжнародних нормативних документів, узагальнення оперативно-тактичного досвіду ліквідації пожеж на об’єктах зберігання нафтопродуктів і сценарний аналіз типових осередків горіння у підземній інфраструктурі. Для кількісної оцінки теплового впливу та ефективності охолодження експозицій виконано чисельне моделювання в середовищі Fire Dynamics Simulator (FDS, v.6.8.0, NIST). На основі отриманих даних сформовано та обґрунтовано тактичні рекомендації щодо розвідки, ізоляції, подачі піни та застосування водяної мли з урахуванням вимог безпеки робіт у замкнених просторах.

Формулювання цілей досліджень. Метою дослідження є розроблення методичних підходів до підвищення ефективності та безпеки гасіння пожеж у підземних резервуарах для зберігання нафтопродуктів, які враховують їхні конструктивні особливості, специфіку розвитку пожеж та сучасні виклики, пов’язані з бойовими ураженнями і техногенними ризиками.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Визначити характерні небезпеки та специфічні фактори, що ускладнюють організацію гасіння пожеж у підземних резервуарах, включно з ризиками для особового складу та інфраструктури.
2. Обґрунтувати та розробити тактичні підходи до організації гасіння пожеж у підземних резервуарах із застосуванням пінних систем, водяного охолодження та комбінованих методів.

Виклад основного матеріалу дослідження. У дослідженні прийнято припущення, що аналіз типових сценаріїв розвитку пожеж та застосування стандартних вогнегасних речовин (піна середньої та низької кратності, вода у вигляді спрею, порошкові засоби) дає змогу розробити алгоритми оперативних дій для різних ситуацій. Як спрощення розглядалися моделі резервуарів стандартних об’ємів та поширені види нафтопродуктів.

Методологія дослідження ґрунтувалася на теоретичному аналізі процесів горіння і гасіння нафтопродуктів у підземних ємностях, вивченні нормативних документів та інструкцій ДСНС України, NFPA 11, OSHA 1910.146, EN 12285-1, HSG176, а також узагальненні досвіду ліквідації пожеж на нафтобазах.

Емпіричні дані отримано з офіційних методичних рекомендацій, практичних звітів і навчально-тренувальних матеріалів, де описано застосування пінних атак, водяного охолодження й комбінованих способів гасіння.

Перевірка адекватності запропонованих рішень здійснювалася шляхом порівняння теоретичних положень з реальною практикою гасіння,

відображеною у картках оперативно-тактичних дій та звітах ДСНС. Критеріями оцінки виступали ефективність припинення горіння, запобігання поширенню пожежі та рівень безпеки особового складу. Для кількісної оцінки ефективності системи водяного охолодження було виконано чисельне моделювання розподілу теплового потоку за допомогою FDS. Модель побудовано для сценарію горіння розлитих нафтопродуктів із тепловою потужністю Q = 15 МВт, з урахуванням умов для підземних резервуарів. Джерело випромінювання описувалось згідно з урахуванням фракції випромінення χ=0.25, температури полум'я 1100 °С і коефіцієнта атмосферного пропускання τ=0.95. У моделі застосовано дві конфігурації охолодження:

1. Без зрошення – контрольний сценарій;
2. Зрошення системою водяної мли (англ. - spray/fog) з дисперсією 100–150 мкм, витратою 1,8 л·с/м² і тиском 0,6 МПа.

Поняттям для вивчення став permit-required confined space (далі - PRCS), це «замкнений простір», який:

а) має обмежені шляхи доступу/виходу;

б) не призначений для постійного перебування, і при цьому має хоча б одну ознаку підвищеної небезпеки: потенційно/фактично небезпечну атмосферу (зокрема, >10 % LFL для горючих парів; O_2<19,5 % або >23,5 %), ризик поглинання/засипання, конфігурацію, що «захоплює» чи блокує, або іншу визнану серйозну небезпеку.

До типових прикладів замкнених просторів OSHA прямо відносить підземні резервуари, колодязі, ями, сховища, а також їх інфраструктуру. Це означає, що UST (англ. – underground storage tank) – PRCS за визначенням, якщо існує потенціал для небезпечної атмосфери (пари бензину/ДП, дефіцит кисню тощо) [3]. Пари ЛЗР формують вибухонебезпечні суміші, «сповзають» у низини, можуть поширюватися до джерела запалювання з відкатом полум'я; великі ємності мають підвищену небезпеку вибуху парів. Це визначає пріоритет дистанційної роботи, контролю оточення та захисту експозицій водяною млою/спреєм [5].

На рис. 1 схематично зображено змодельовану підземну інфраструктуру з найнебезпечнішими вузлами – оглядові камери/люки, точки наливу/зливу, вентиляційні труби (англ. - vent stack) та зона дозаторів; для них існують типові небезпечні зони (Зони 0/1/2) з радіусами, які слід враховувати при розгортанні сил і засобів та при виборі тактики (підхід з навітряної сторони, відстані, іскробезпечність) [6]. Дані радіуси будуть змінюватись в залежності від критеріїв теплового випромінювання на людину, яке вимірюється в кВт/м^2. У [19] застосовуються орієнтири 2-5-10 кВт/м^2, що є прийнятим у ризик-аналізах базисом встановлення безпечних відстаней для особового складу. Відстані в табл. 1 також будуть залежати від місткості резервуару, сценарію, тобто не являються фіксованими та вибираються за аналізом небезпек, відповідно до [9]. Орієнтиром для розташування техніки є [20] в якому використовуються контури від 12,5-37,5 кВт/м^2 для оцінки ураження конструкцій та техніки, де показник 12,5 кВт/м^2 є критичним для обладнання.

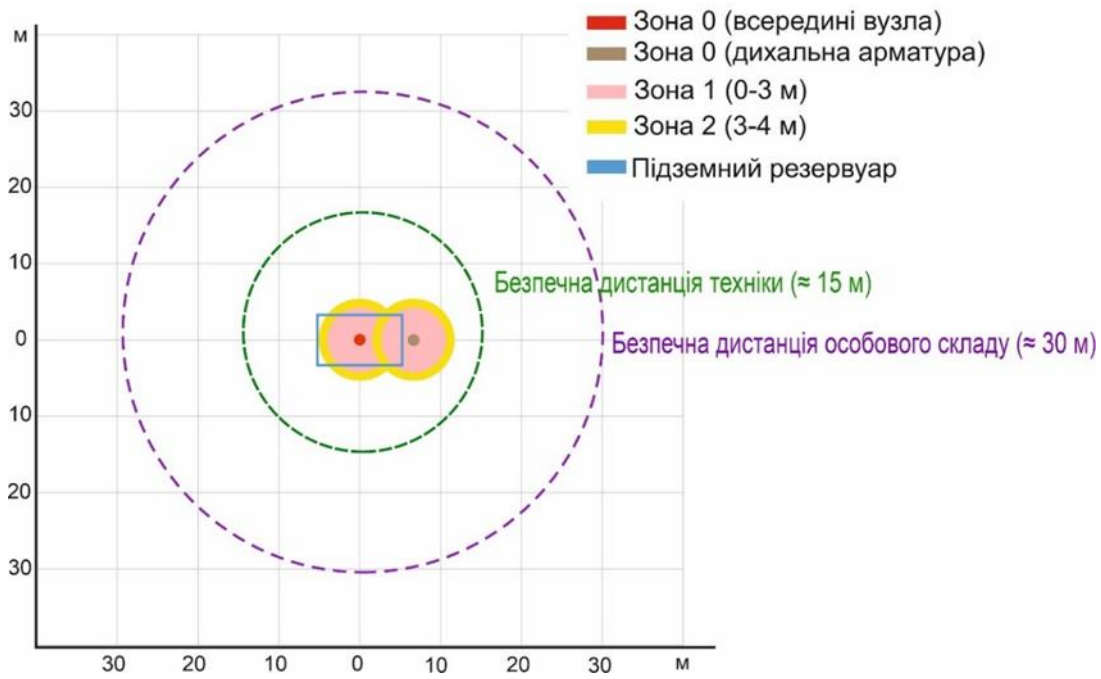

Рисунок 1 – Моделювання небезпечних зони та безпечні дистанції для особового складу та техніки до підземного резервуара і вузлів інфраструктури

Таблиця 1 – Пояснення зон і безпечних дистанцій для особового складу та техніки до підземного резервуара і вузлів інфраструктури.

Зона / Дистанція	Характеристика	Радіус (м)	Особливості дій
Зона 0	Вибухонебезпечна зона всередині люку/камери, у місці постійної наявності парів ЛЗР	≈ 0,5 м	Перебування людей заборонене; доступ лише при повній дегазації та за процедурою PRCS.
Зона 1	Зона, де пари можуть з'являтися під час нормальної експлуатації або аварії	до 3 м	Розгортання сил і засобів заборонено; допустима лише робота спеціальних іскробезпечних датчиків, приладів.
Зона 2	Зона, де пари з'являються лише у разі аварійних ситуацій	3–4 м	Можливе короткочасне перебування особового складу в ЗІЗОД; робота обладнання лише іскробезпечного виконання.
Безпечна дистанція техніки	Рекомендована відстань для розташування пожежних автомобілів, лафетних стволів, роботизованих комплексів	~15 м	Техніка встановлюється на цій відстані з урахуванням напрямку вітру та рельєфу.
Безпечна дистанція особового складу	Межа, ближче якої перебування допускається тільки в спеціальних ЗІЗОД та на короткий час	~30 м	Основний особовий склад розгортається за цією межею, дії у небезпечній зоні виконують лише підготовлені групи з допуском.

Отже, у технічних звітах [19] значення теплового випромінювання від 12,5-37,5 кВт/м2 застосовуються як проєктні критерії, що дозволяє перерахувати потрібну відстань під вихідні дані, а саме виду палива, витрати парів, впливу вітру тощо. У нормах [20] констатують, що для теплового випромінювання «немає єдиних стандартів», тому рекомендовані значення 2-5-10 кВт/м2 призначені для розрахунків та проведення моделювання.

За результатами дослідження виділено ряд тактичних підходів до

організації гасіння пожеж у підземних резервуарах із застосуванням пінних систем, водяного охолодження та комбінованих методів. Первинною дією для всіх сценаріїв є негайна ізоляція, аварійне відключення насосів/дозаторів, знеструмлення, встановлення кордонів і відведення людей у підвітряну сторону; у випадку гасіння великих ємностей (з дзеркалом горіння понад 500 м^2) – дотримання дистанцій/евакуаційних радіусів, робота з максимальної дистанції стаціонарними лафетами або наземними роботизованими комплексами типу Wolf R1, Colossus, TAF 35, LUF 60 тощо. Оперативне розгортання сил та засобів проводити зі сторони, протилежної поширенню парів; заходи з тактичної вентиляції проводиться лише навченим персоналом у ЗІЗОД; недопущення стоку в каналізацію/підземні порожнини (далі – сумпи) [5]. Сумп (sump – від англ. «поглиблення, «приямок», «збірник рідини» – це спеціально обладнана герметизована підземна камера, що розташовується під паливороздавальною колонкою або на стиках трубопроводів у складі резервуарного парку для зберігання нафтопродуктів і призначена для збирання витоків рідкого пального, контролю герметичності з'єднань та забезпечення технічного доступу до арматури і комунікацій.

Наступним тактичним підходом є ліквідація розливів у камерах доступу, сумпах, траншеях біля дозаторів. Основним засобом для цього є повітряно-механічна піна низької/середньої кратності (для полярних домішок – AR-піна або підтверджений фторвільний аналог), з укладанням пінної «ковдри»; заборонені прямі компактні струмені, щоб не розкидати пальне [5]. Пригнічення парів дозволено пінними покриттями.

Серед ключових видів ліквідації розливів став метод блокування стоку,

який полягає в локалізації розливів рідин або запобігання їх поширенню шляхом створення фізичних бар'єрів (дамб, насипів, кілець) навколо потенційного джерела розливу підвищуючи безпеку, запобігаючи забрудненню навколишнього середовища, сприяючи ефективному гасінню пожеж та охолодженню навколишніх конструкцій [5]. Усе обладнання повинно бути іскробезпечне/заземлене; робота стволів як позначено на рисунку 2 категорично обмежується розпиленим гасінням, компактні струмені використовувати забороняється.

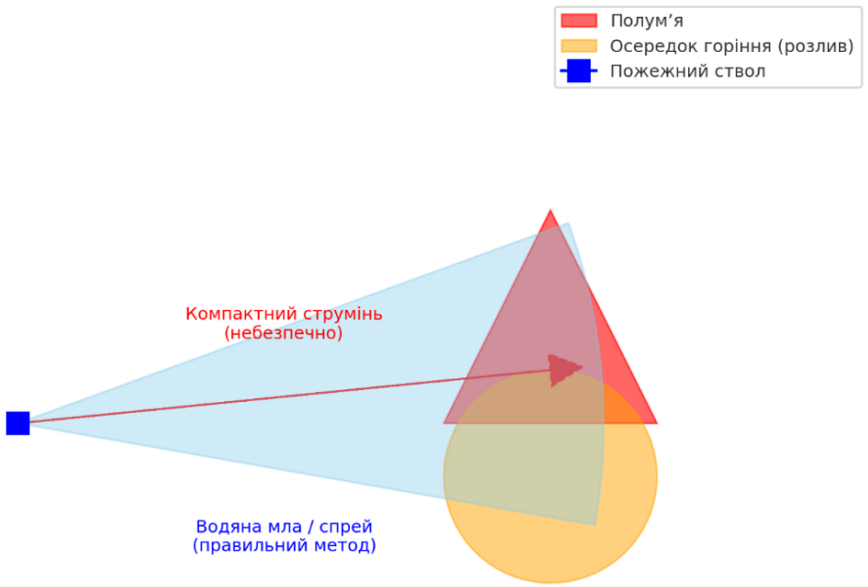

Рисунок 2 – Схематичне зображення методів роботи з різними типами вогнегасних струменів при розливі палива

Підходом до гасіння полум'я на газовідвідній трубі або при горінні випарів стала ліквідація джерела парів (зупинка подачі, герметизація шляхів надходження), охолоджуючи експозиції водяними розпиленими струменями. Газовідвідна труба підземного резервуара – це вертикальний трубопровід, що з'єднує внутрішню порожнину підземного резервуара з атмосферою і призначений для вирівнювання тиску, видалення парів легкозаймистих рідин та запобігання руйнуванню резервуара при заправці чи спорожненні (рис. 3).

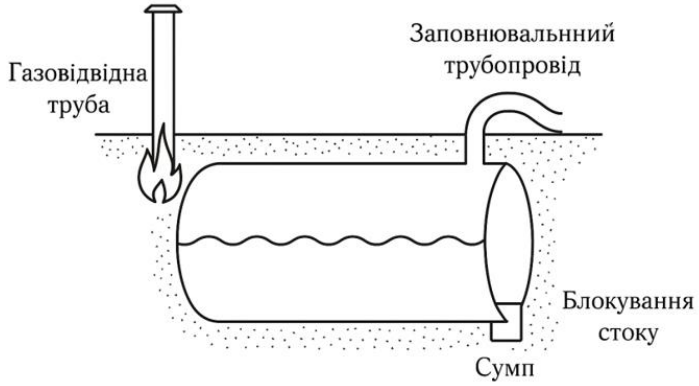

Рисунок 3 – Схематичне зображення підземного резервуара з UST-інфраструктурою

У [4, 5, 6] газовідвідна труба визначається як критичний елемент системи вентиляції підземних резервуарів, що одночасно виконує функції безпеки і є потенційним джерелом пожежної небезпеки. Поки джерело парів не усунуто, погашення факела може бути небезпечним (ризик повторного займання/зворотного удару полум'я). Для масивного горіння допускається тактика контрольованого вигоряння з дистанції, коли пряме гасіння не забезпечує безпеки персоналу [5]. Оперативне розгортання враховує небезпечні зони довкола вентилів та горловин, заборонено дії, що спричиняють турбулентне втягування повітря у простір резервуара/вентиляційної труби [6].

Ключовим підходом до гасіння залишається охолодження експозицій і інфраструктури. Для резервуарних комунікацій, арматури, будівельних конструкцій водяні системи охолодження (spray/fog) можуть бути використані як штатний елемент протипожежного захисту складів ЛЗР (рис. 4); їх застосування – базовий компонент тактики прикриття й локалізації поширення пожежі [9].

Spray/fog (від англ. spray – «розпил, струмінь дрібних крапель»; fog – «туман, імла») – це метод подачі води у вигляді дрібнодисперсного струменя, що формується спеціальними насадками чи стволами. Розмір крапель при подачі такого струменя становитиме 50-400 мкм, залежно від насадки при тиску в 5-10 бар, у системах високого тиску – до 100 бар. Кут розпилу при цьому становитиме від 90˚ до 120˚ для захисних «завіс». На відміну від компактного суцільного струменя, який подає воду у вигляді потужного потоку, spray/fog розпилює її на велику кількість дрібних краплин, збільшуючи площу контакту води з полум'ям і гарячими поверхнями. Таким чином створюється «завіса» від теплового випромінювання, що зменшує ризик для особового складу.

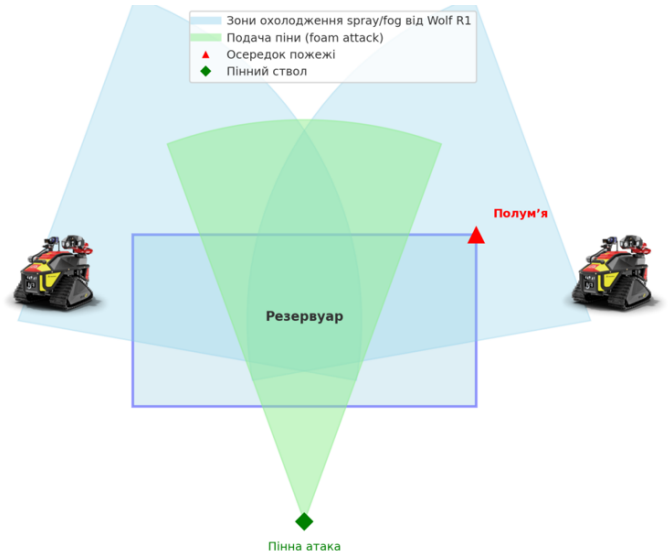

Рисунок 4 – Використання тактики spray/fog в поєднанні з наземними роботизованими комплексами при гасінні пожеж в підземних резервуарах

Водяний туман витісняє кисень із зони горіння та локалізує теплову дію на сусідні конструкції. На рис. 5 представлено дані порівняння інтенсивності теплового потоку до та після активації системи «spray/fog». Модель використана у дослідженні описує сценарій горіння нафтопродуктів з тепловою потужністю Q=15МВт, фракцією випромінення χ=0.25, коефіцієнтом прозорості τ=0.95. Система зрошення характеризується дисперсією 100–150 мкм, витратою 1.8 л·с$^{-1}$·м$^{-2}$ та тиском 0.6 МПа. Детальні результати наведено у таблиці 2.

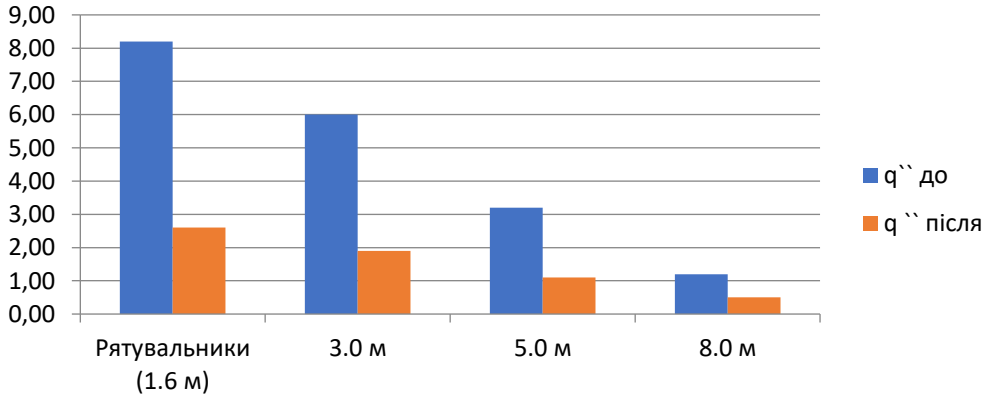

Рисунок 5 – Порівняння інтенсивності теплового потоку «q″» до і після активації системи «spray/fog»

Таблиця 2 – Модельні результати зменшення теплового потоку при застосуванні системи «spray/fog».

Відстань, м	$q_{до}''$, кВт/м^2	$q_{після}''$, кВт/м^2	Зниження, %	$T_{поверхні_до}$, C^0	$T_{поверхні_після}$, C^0	Q``<4 кВт/м^2, с
1.6 м	8.2	2.6	68.3	310	145	20.0
3.0 м	6.0	1.9	68.3	260	120	10.0
5.0 м	3.2	1.1	65.6	200	90	0.5
8.0 м	1.2	0.5	58.3	120	60	0.0

Під час проведення робіт у замкнених просторах внутрішні порожнини резервуара, сумпи/камери під дозаторами та підземні колодязі у режимі НС розглядаються як PRCS. Вхід під час гасіння заборонено, доки не виконані всі вимоги програми допуску (оцінка атмосфери, вентиляція, нагляд, рятувальні заходи). За відсутності повного дотримання заходів безпеки необхідно працювати виключно дистанційно [3].

Дані підходи до тактики гасіння враховують організаційні вимоги до планування і взаємодії. Об'єкт має передбачати водяне охолодження та/або пінні системи для сценаріїв розливів і локальних загорянь у підземній інфраструктурі. Плани реагування враховують небезпечні зони довкола газовідвідних труб, горловин/оглядових камер і дозаторів; оперативне розгортання підрозділів здійснюється з урахуванням цих меж і напрямку вітру/рельєфу. Будь-які роботи всередині сумпів/камер/резервуарів проводяться лише за процедурою PRCS після завершення аварійної фази і з повним пакетом заходів безпеки згідно з OSHA 1910.146 [7].

Суттєвою особливістю при вирішенні задачі з гасіння підземних резервуарів є визначення безпечних зон і дистанцій. Згідно з проведеним моделюванням, зона миттєвої вибухонебезпеки – «Зона 0», формується безпосередньо в межах горловин та оглядових камер, зона регулярного викиду парів – «Зона 1» сягає до трьох метрів, а потенційна зона вторинного поширення – «Зона 2» розташована в радіусі до чотирьох метрів. Це пояснює необхідність розташування пожежної техніки на відстані не менше 15 метрів, а основних сил особового складу не ближче ніж 30 метрів від осередку пожежі. Такий підхід дозволяє зменшити ризик ураження у випадку раптового вибуху чи відкату полум'я.

Порівняно з відомими методиками, отримані результати мають низку переваг. По-перше, вони інтегрують міжнародні стандарти (NFPA, HSE, EN) у національні, що забезпечує їх практичну адаптацію. По-друге, рішення враховують реалії воєнного стану, що зумовлює необхідність організації резервних систем водопостачання та облаштування укриттів для особового складу. По-третє, розроблена методика передбачає комбіноване застосування піни та порошкових засобів для гасіння локальних осередків у «карманах» і на арматурі, що дозволяє досягати більшої надійності у складних сценаріях.

Подальший розвиток дослідження може передбачати деталізацію алгоритмів дій залежно від виду нафтопродукту, сезонних умов і ступеня руйнування конструкцій. Перспективним напрямом є впровадження дистанційно керованих роботизованих комплексів для роботи в межах небезпечних зон, а також експериментальні випробування ефективності безфтористих піноутворювачів у замкнутому просторі. Це сприятиме формуванню єдиних стандартів тактики гасіння пожеж у підземних резервуарах та підвищенню рівня захисту особового складу.

Висновки та напрями подальштх досліджень. Дослідження підтверджує, що підземні резервуари для зберігання нафти та нафтопродуктів (UST) створюють комплекс специфічних небезпек, зумовлених замкненістю простору, накопиченням парів ЛЗР, а також ускладненою доступністю для аварійно-рятувальних підрозділів. Аналіз міжнародних нормативів (NFPA, OSHA, HSE, EN 12285-1) та вітчизняних рекомендацій ДСНС показав, що в Україні бракує чітко регламентованих процедур для гасіння пожеж у підземних резервуарах, зокрема щодо класифікації небезпечних зон, дистанційної подачі вогнегасних речовин та вимог до робіт у замкнених просторах.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішено такі завдання:

1. Визначено характерні небезпеки, властиві підземним резервуарам, серед яких накопичення вибухонебезпечних парів у замкнених об'ємах, утворення зон миттєвої небезпеки (Зона 0), зони регулярного викиду парів

(Зона 1) і потенційної зони поширення (Зона 2). Особливістю результатів є значення, які узгоджуються з міжнародними критеріями теплового впливу, для особового складу прийнято межі у 5 кВт/м² (рівень, при якому можливі опіки II ступеня за 60 с), для техніки – 12,5 кВт/м² (рівень, при якому можливі серйозні пошкодження матеріалів та обладнання). Запропоновані в дослідженні дистанції були розраховані для типового випадку горіння у газовідвідній трубі і становлять практичний інструмент для планування розташування сил і засобів під час гасіння пожеж у підземних резервуарах.

2. Обґрунтування та розроблення тактичних підходів до гасіння пожеж у підземних резервуарах із застосуванням пінних систем, водяного охолодження та комбінованих методів показали, що оптимальна тактика має бути багаторівневою, стандартизованою та відповідати екологічним нормам. Аналіз методів подачі вогнегасних речовин підтвердив ефективність пін середньої та низької кратності для ліквідації розливів та загорянь у замкнених просторах. Заборона використання компактних струменів пояснюється ризиком розбризкування пального, тоді як укладання пінної «ковдри» дозволяє стабілізувати осередок горіння та пригнічувати випаровування. Важливим технічним результатом стало уточнення режимів охолодження: використання систем spray/fog у вигляді водяної мли виявилося оптимальним для зниження температури арматури та комунікацій, запобіганню поширенню вогню на суміжні вузли та конструкції. Результати показали, що середня інтенсивність теплового потоку на рівні розташування рятувальників (1,6 м від поверхні) зменшилась з $q_{до}''$=8.2 кВт до $q_{після}''$=2.6 кВт, що відповідає зниженню теплового навантаження на 68%. При цьому температура зовнішніх поверхонь арматури та металевих конструкцій зменшилась з 310 °C до 145 °C протягом 90 с після активації системи. Аналіз динаміки температури в зоні дії водяного туману засвідчив, що вже через 20 с після початку зрошення тепловий потік зменшує інтенсивність нижче порогу дискомфорту 4 кВт·м$^{-2}$, що дозволяє забезпечити роботу особового складу без додаткового екранування. Додатково було зафіксовано зменшення видимості полум’я у візуальному діапазоні на 30–40 %, що вказує на ефективне розсіювання випромінювання краплями води.

Таким чином, результати дослідження мають практичне значення для формування нових нормативних документів в Україні та їх узгодження із міжнародними вимогами, що є критично важливим у контексті інтеграції у світову систему техногенної безпеки.

Конфлікт інтересів: Ніжник В.В. є членом редакційної колегії журналу «Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека», але не брав жодної участі в процесі рецензування цієї статті, обговоренні чи прийнятті рішення щодо її публікації. Процедура розгляду рукопису повністю забезпечувалася незалежними членами редколегії та зовнішніми рецензентами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wu, J., Chen, P., Fang, L. *et al.* Experimental Study on Combustion Characteristics of Transformer Oil Pool Fire and Effects of Foam-Water Spray Parameters on Fire Extinguishing Efficiency. *Fire Technol* 62, 29 (2026). https://doi.org/10.1007/s10694-025-01862-3.
2. Mrozik, W., McDonald, J., Shuttleworth, E. *et al.* Performance of Extinguishing Agents against Lithium-Ion Battery Fires. *Fire Technol* 62, 3 (2026). https://doi.org/10.1007/s10694-025-01831-w.
3. Hagenaars, A., Meyer, I. J., Herzke, D., Pardo, B. G., Martinez, P., Pabon, M., ... & Knapen, D. (2011). The search for alternative aqueous film forming foams (AFFF) with a low environmental impact: Physiological and transcriptomic effects of two Forafac® fluorosurfactants in turbot. *Aquatic toxicology*, *104*(3-4), 168-176. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2011.04.012.
4. Li, Z., Zhu, H., Zhao, J., Zhang, Y., & Hu, L. (2024). Experimental Research on the Effectiveness of Different Types of Foam of Extinguishing Methanol / Diesel Pool Fires. *Combustion Science and Technology*, *196*(12), 1791–1809. https://doi.org/10.1080/00102202.2022.2125306.

5. Huang, Z., Ding, H., Quan, S., Fu, M., Wang, G., Zeng, M., … Li, G. (2026). Preparation and Properties of Nano-Modified Silicone Foam for Extinguishing Oil Fires. *Combustion Science and Technology*, *198*(3), 755–777. https://doi.org/10.1080/00102202.2025.24647676.
6. National Fire Protection Association. NFPA 11: Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam. Quincy, MA: NFPA, 2024.
7. Occupational Safety and Health Administration. Permit-Required Confined Spaces. OSHA 1910.146. Washington, DC: OSHA, 2020. URL: https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.146.
8. European Committee for Standardization. EN 12285-1:2003. Workshop fabricated steel tanks. Part 1: Horizontal cylindrical single and double skin tanks for underground storage of flammable and non-flammable water polluting liquids. Brussels: CEN, 2003.
9. Health and Safety Executive. HSG176: The storage of flammable liquids in tanks. 2nd ed. London: HSE, 2019. URL: https://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg176.htm.
10. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Методичні рекомендації щодо організації оперативних дій підрозділів ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів, що сталися внаслідок обстрілів в умовах ведення бойових дій. Київ: ДСНС України, 2022. 42 с. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18#n8.
11. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Рекомендації щодо гасіння пожеж у резервуарах і резервуарних парках на складах нафти та нафтопродуктів: Проєкт (19.06.2024). Київ: ДСНС України, 2024. 85 с.
12. Міністерство внутрішніх справ України. Статут дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж: наказ МВС від 26.04.2018 № 340 (зареєстровано в Мін'юсті 10.07.2018 за № 801/32254). Київ: МВС України, 2018. URL:https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18#Text
13. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Про удосконалення порядку організації реагування на надзвичайні ситуації та небезпечні події: наказ ДСНС від 05.08.2022 № 441. Київ: ДСНС України, 2022. URL: https://lv.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/7/4/1/ns-441.pdf
14. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Про особливості реагування на надзвичайні ситуації під час збройної агресії: наказ ДСНС від 02.04.2024 № 375. Київ: ДСНС України, 2024. URL:https://dsns.gov.ua/upload/2/0/8/0/8/1/6/rekom.pdf
15. Правила безпеки праці в органах і підрозділах ДСНС: наказ ДСНС від 31.12.2025 №1661. Київ: ДСНС України, 2025. URL:https://kyiv.dsns.gov.ua/upload/2/5/3/4/9/1/2/pravila-bezpeki-praci-v-organax-ta-pidrozdilax-dsns.pdf
16. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Про удосконалення організації реагування на надзвичайні ситуації: окреме доручення від 15.07.2022 № В-425. Київ: ДСНС України, 2022. URL: https://lv.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/6/6/2/v-425.pdf
17. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Про удосконалення порядку організації реагування на надзвичайні ситуації та небезпечні події: окреме доручення від 14.06.2023 № В-466. Київ: ДСНС України, 2023. URL: https://lv.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/6/8/0/v-466.pdf
18. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Про заходи безпеки: окреме доручення від 24.07.2023 № В-589. Київ: ДСНС України, 2023. URL: https://lv.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/6/8/1/v-589.pdf?
19. National Oceanic and Atmospheric Administration. Thermal Radiation Levels of Concern [Електронний ресурс]. Office of Response and Restoration, 2023. URL: https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/resources/thermal-radiation-levels-concern.html
20. National Fire Protection Association. NFPA 30: Flammable and Combustible Liquids Code. Second Draft Report (A2023) [Електронний ресурс]. Quincy, MA: NFPA, 2023. URL: https://docinfofiles.nfpa.org/files/AboutTheCodes/30/30_A2023_FLC_TAN_SD_SRReport.pd

REFERENCES

1. Wu, J., Chen, P., Fang, L., et al. (2026). Experimental study on combustion characteristics of transformer oil pool fire and effects of foam-water spray parameters on fire extinguishing efficiency. *Fire Technology, 62*, 29. https://doi.org/10.1007/s10694-025-01862-3.
2. Mrozik, W., McDonald, J., Shuttleworth, E., et al. (2026). Performance of extinguishing agents against lithium-ion battery fires. *Fire Technology, 62*, 3. https://doi.org/10.1007/s10694-025-01831-w.
3. Hagenaars, A., Meyer, I. J., Herzke, D., Pardo, B. G., Martinez, P., Pabon, M., ... & Knapen, D. (2011). The search for alternative aqueous film forming foams (AFFF) with a low environmental impact: Physiological and transcriptomic effects of two Forafac® fluorosurfactants in turbot. *Aquatic Toxicology, 104*(3–4), 168–176. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2011.04.012.
4. Li, Z., Zhu, H., Zhao, J., Zhang, Y., & Hu, L. (2024). Experimental research on the effectiveness of different types of foam for extinguishing methanol/diesel pool fires. *Combustion Science and Technology, 196*(12), 1791–1809. https://doi.org/10.1080/00102202.2022.2125306.
5. Huang, Z., Ding, H., Quan, S., Fu, M., Wang, G., Zeng, M., ... & Li, G. (2026). Preparation and properties of nano-modified silicone foam for extinguishing oil fires. *Combustion Science and Technology, 198*(3), 755–777. https://doi.org/10.1080/00102202.2025.24647676.
6. National Fire Protection Association. (2024). *NFPA 11: Standard for low-, medium-, and high-expansion foam*. NFPA.
7. Occupational Safety and Health Administration. (2020). *Permit-required confined spaces (OSHA 1910.146)*. U.S. Department of Labor. https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.146.
8. European Committee for Standardization. (2003). *EN 12285-1: Workshop fabricated steel tanks - Part 1: Horizontal cylindrical single and double skin tanks for underground storage of flammable and non-flammable water polluting liquids*. CEN.
9. Health and Safety Executive. (2019). *HSG176: The storage of flammable liquids in tanks* (2nd ed.). HSE. https://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg176.htm.

10. State Emergency Service of Ukraine. (2022). *Guidelines for the organization of operational actions of SES units during firefighting at oil depots that occurred as a result of shelling in combat conditions*. SES of Ukraine. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18#n8.
11. State Emergency Service of Ukraine. (2024). *Recommendations for extinguishing fires in tanks and tank farms at oil and petroleum product depots: Draft (June 19, 2024)*. SES of Ukraine.
12. Ministry of Internal Affairs of Ukraine. (2018). *Charter of actions of management bodies and units of the Operational Rescue Service of Civil Protection during firefighting: Order of the Ministry of Internal Affairs of April 26, 2018 No. 340 (registered with the Ministry of Justice on July 10, 2018 No. 801/32254)*. MIA of Ukraine. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18#Text.
13. State Emergency Service of Ukraine. (2022). *On improving the organization of response to emergencies and hazardous events: SES Order of August 5, 2022 No. 441*. SES of Ukraine. https://lv.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/7/4/1/ns-441.pdf.
14. State Emergency Service of Ukraine. (2024). *On the peculiarities of responding to emergencies during armed aggression: SES Order of April 2, 2024 No. 375*. SES of Ukraine. https://dsns.gov.ua/upload/2/0/8/0/8/1/6/rekom.pdf.
15. State Emergency Service of Ukraine. (2025). *Safety rules in the bodies and units of the State Emergency Service of Ukraine: SES Order of December 31, 2025 No. 1661*. SES of Ukraine. https://kyiv.dsns.gov.ua/upload/2/5/3/4/9/1/2/pravila-bezpeki-praci-v-organax-ta-pidrozdilax-dsns.pdf.
16. State Emergency Service of Ukraine. (2022). *On improving the organization of response to emergencies: Special directive of July 15, 2022 No. V-425*. SES of Ukraine. https://lv.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/6/6/2/v-425.pdf.
17. State Emergency Service of Ukraine. (2023). *On improving the organization of response to emergencies and hazardous events: Special directive of June 14, 2023 No. V-466*. SES of Ukraine. https://lv.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/6/8/0/v-466.pdf.
18. State Emergency Service of Ukraine. (2023). *On safety measures: Special directive of July 24, 2023 No. V-589*. SES of Ukraine. https://lv.dsns.gov.ua/upload/2/1/9/5/6/8/1/v-589.pdf.
19. National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023). *Thermal radiation levels of concern*. Office of Response and Restoration. https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/resources/thermal-radiation-levels-concern.html.
20. National Fire Protection Association. (2023). *NFPA 30: Flammable and combustible liquids code. Second draft report (A2023)*. NFPA. https://docinfofiles.nfpa.org/files/AboutTheCodes/30/30_A2023_FLC_TAN_SD_SRReport.pdf.

TACTICAL APPROACHES TO FIRE EXTINGUISHING IN UNDERGROUND STORAGE TANKS FOR PETROLEUM PRODUCTS

Panchenko S.[1], Nizhnyk V.[2], Fedorenko D.[1], Kropyva M[1]

[1]National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine
[2]Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Frotection of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS

oil, fire, extinguishing, thermal impact, foam attack, spill, cooling.

ABSTRACT

The article substantiates tactical approaches to extinguishing fires in underground storage tanks for petroleum products and in elements of the underground infrastructure of tank farms under conditions of limited access, destruction of fixed firefighting systems, and a high probability of the formation of explosive vapor-air mixtures. The relevance of the study is determined by the fact that such fires are characterized by difficult reconnaissance, complicated application of extinguishing agents, significant thermal impact on personnel, and the risk of fire spread through underground utilities, while current practice lacks sufficiently structured tactical solutions for such scenarios. As a result of the study, algorithms for the safe deployment of personnel and equipment were developed; approaches to vapor source isolation, spill containment, and the application of low- and medium-expansion foam in confined spaces were identified; and the feasibility of combined extinguishing using water mist and dry powder agents for eliminating local fires on fittings and in hard-to-reach areas was substantiated. It was established that during the emergency phase, priority should be given to remote operations, and entry into underground voids is unacceptable without compliance with the requirements for controlled entry into confined spaces. For a scenario with a heat release rate of 15 MW, the modeling showed a decrease in heat flux density at a distance of 1.6 m from 8.2 to 2.6 kW/m², that is, by approximately 68%, while this indicator decreased to below 4 kW/m² approximately 20 s after the activation of spray cooling. The practical value of the results obtained lies in the possibility of using them for planning operational actions, training units of the State Emergency Service of Ukraine, and improving personnel safety during the extinguishment of fires in underground storage tanks.