

УДК 614

В. В. Ковалишин, д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0002-5463-0230)

Н. Р. Великий, PhD, доц. каф. (ORCID 0000-0002-7967-4491)

В. М. Марич, к.т.н., доцент, докторант (ORCID 0000-0001-7051-4494)

В. В. Ковалишин, к.т.н., нач. каф. (ORCID 0000-0003-3739-8668)

А. Є. Великий, ст. викл. каф. (ORCID 0009-0002-5987-9745)

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ В РЕЗЕРВУАРАХ

Проведено аналіз економічної ефективності застосування компресійної піни для підшарового гасіння пожеж нафтопродуктів (бензин) у сталевих вертикальних резервуарах. Дослідження базується на розрахунках для резервуара вертикального сталевого об'ємом 5000 м³, площа дзеркала горіння якого становить 346 м², змодельованого в середовищі SolidWorks Flow Simulation [1]. У роботі проведено порівняльний аналіз витрат піноутворювача при традиційному поверхневому способі гасіння та при підшаровому способі з використанням компресійної піни. Розрахунки виконувалися відповідно до рекомендованої інтенсивності подавання розчину піноутворювача для підшарового способу – 0,08 л/м²·с. Також враховано розрахунковий час гасіння бензину та трикратний запас піноутворювача згідно з чинними методичними рекомендаціями ДСНС України. Згідно проведених досліджень встановлено, що застосування компресійної піни кратністю 10 дозволяє зменшити витрати на піноутворювач майже в 4 рази порівняно з традиційним поверхневим гасінням. Додатковими перевагами є зменшення теплового навантаження на особовий склад підрозділів ДСНС, зниження ризику для пожежників та зменшення навантаження на пожежну техніку. Результати дослідження мають практичне значення для оптимізації тактики пожежогасіння на об'єктах нафтогазового комплексу, нафтобаз та складів паливно-мастильних матеріалів. Особливо актуальним є впровадження запропонованої технології в умовах воєнного часу, коли критична інфраструктура України зазнає систематичних ракетних та дронівих атак. Використання компресійної піни підшаровим способом дозволить суттєво підвищити ефективність захисту стратегічних об'єктів та знизити матеріальні збитки від пожеж. Таким чином, підшарове гасіння з використанням компресійної піни є перспективним напрямком розвитку пожежогасіння нафтопродуктів у вертикальних сталевих резервуарах.

Ключові слова: компресійна піна, підшарове гасіння, резервуар, повітряно-механічна піна, нафтопродукт, бензин

1. Вступ

Процес гасіння пожеж у резервуарах з нафтопродуктами характеризується високою складністю та потребує залучення значних матеріальних ресурсів. Такі пожежі, як правило, стрімко прогресують, мають затяжний характер і становлять підвищену загрозу безпеці персоналу та особового складу пожежно-рятувальних служб.

З початку повномасштабного вторгнення росії в Україну нафтобази стали однією з ключових і найчастіше атакованих цілей для ракетних ударів та дронів-камікадзе. Такі об'єкти є критичною інфраструктурою, що забезпечує постачання пального для економіки та населення, тому їхнє систематичне знищення завдає країні величезних економічних, логістичних та екологічних втрат.

Приклади таких атак демонструють масштаб проблеми [2–5]:

- у місті Львові (березень 2022) після ракетного удару по нафтобазі декілька резервуарів з нафтопродуктами на околиці міста були повністю знищені, а гасіння пожежі тривало понад 14 годин;

- у місті Василькові, Київської області (лютий 2022) у перші дні повномасштабного вторгнення було завдано ракетного удару по нафтобазі, в результаті яко-

го спалахнула масштабна пожежа, яку було видно навіть із Києва;

- на Рівненщині (березень 2022) серія ракетних ударів знищила ключові сховища пального, а гасіння пожежі тривало кілька діб;

- у Харкові (лютий 2024) один із найтрагічніших випадків: відбулось влучання дронів по нафтобазі, внаслідок чого стався розлив пального та спалахнула пожежа, яка швидко поширилась до найближчих приватних будинків.

Кожна така атака спричиняє багаточислові економічні збитки, які значно перевищують вартість самих зруйнованих об'єктів:

- пряме знищення інфраструктури - резервуари, насоси, трубопроводи та адміністративні будівлі коштують мільйони доларів. Наприклад, лише за перші місяці повномасштабного вторгнення атаки по нафтобазах завдали прямих збитків на суму близько \$230 млн, а окремі компанії оцінюють власні втрати за весь період війни в \$70 млн і більше [6];

- масштабні пожежі та розливи нафтопродуктів призводять до втрати сотень і тисяч тон пального, забруднення ґрунтів і водойм, а також величезних витрат на ліквідацію наслідків (очищення, рекультивацію). Екологічна шкода від окремих інцидентів оцінювалася в сотні мільйонів гривень;

- непрямі економічні наслідки - масові атаки по нафтобазах 2022 року спричинили тривалу паливну кризу по всій країні: дефіцит, черги, різке зростання цін на паливо, зупинку логістики, сільського господарства та багатьох галузей економіки;

- витрати на пожежогасіння - гасіння таких пожеж вимагає залучення величезних ресурсів: спецтехніки, піноутворювача, сотень рятувальників, іноді протягом кількох діб чи тижнів. Це відволікає сили ДСНС від інших завдань і коштує мільйони гривень щодня.

Пожежі резервуарів із нафтопродуктами характеризуються тривалим часом ліквідації та значною витратою вогнегасних речовин (води та піноутворювача). За традиційного поверхневого пінного гасіння з допомогою ГПС-600 або стволами типу СПП необхідно забезпечити нормативну інтенсивність подавання піни і підтримувати її протягом всього часу гасіння. Також, згідно з [7] необхідно забезпечити трикратний запас піноутворювача. У практичному вимірі це призводить до:

- суттєвих прямих витрат на піноутворювач, а також витрат на його доставку та зберігання;

- зростання вимог до водопостачання, насосного обладнання та рукавних ліній;
- потреби у більшій кількості технічних засобів для подавання піни та особового складу для їх обслуговування;

Тому актуальним є обґрунтування альтернативних технологій, що зменшують витрати піноутворювача та підвищують ефективність гасіння. Одним з таких підходів є підшаровий спосіб гасіння з використанням компресійної піни [8-11].

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [12] автори пропонують застосовувати для гасіння пожеж легкозаймистих та горючих рідин (ЛЗР і ГР) у резервуарах гранульоване піноскло, спучений перліт або вермикуліт у комбінації з розпиленою водою. Аналіз цієї роботи показав, що експерименти проводилися виключно на модельних осередках пожежі невеликих розмірів (класу «2В»). Такі результати можуть слугувати лише для певних попередніх висновків, але недостатні для повноцінного підтвердження надійності та ефективності запропонованого методу в реальних умовах. На сьогодні ці підходи перебувають на етапі наукових досліджень і розробок, тому дані

про їх практичне впровадження та використання в літературі практично відсутні. Водночас автори статті критикують традиційне гасіння ЛЗР та ГР за допомогою вогнегасної піни. Зокрема, вони зазначають низьку стійкість таких пін, їх екологічну небезпеку та відносно високу вартість. Проте в цій роботі не було враховано застосування компресійної піни, яка має суттєво кращі фізико-хімічні властивості та характеристики порівняно із повітряно-механічною піною. Автори роботи [13] вказують на значну вартість систем CAFS, але не проводять ґрунтовного порівняльного аналізу їх економічної доцільності в порівнянні з альтернативними способами пожежогасіння. У роботі [14] досліджувалася ефективність гасіння пожеж системою компресійної піни (CAFS) залежно від співвідношення повітря до розчину піноутворювача в діапазоні від 5:1 до 12:1.

За результатами проведеного аналізу встановлено, що на сьогодні бракує систематичних порівняльних економічних досліджень, присвячених застосуванню компресійної піни в порівнянні з класичною повітряно-механічною для гасіння пожеж в резервуарах. Окремі роботи частково торкаються лише питань різниці у вартості спеціалізованого обладнання для генерування компресійної піни та матеріальних витрат на облаштування інфраструктури для підшарового гасіння резервуарів. Тому, економічна оцінка ефективності компресійної піни для гасіння пожеж в резервуарах підшаровим способом є доцільною та актуальною.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є оцінка економічної доцільності та ефективності впровадження технології підшарового гасіння пожеж у вертикальних сталевих резервуарах з використанням компресійної піни порівняно з традиційними способами подавання повітряно-механічної піни через генератори піни середньої кратності (ГПС-600) та стволи повітряно-пінні (далі – СПП).

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз витрат піноутворювача при гасінні пожежі в РВС-5000 традиційними методами гасіння;
2. Виконати розрахунки фінансових витрат на піноутворювач для підшарового способу гасіння за допомогою компресійної піни та традиційних методів гасіння.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є аналіз економічної ефективності використання компресійної піни для підшарового гасіння нафтопродуктів (бензин) у резервуарах вертикальних сталевих (РВС). Використано теоретичні методи дослідження, а саме розрахунки для резервуара РВС-5000, змодельованого в середовищі SolidWorks Flow Simulations [1], площа дзеркала горіння якого становить 346 м^2 , а рекомендована інтенсивність подавання піни для підшарового гасіння, згідно з [8] становить $0,08 \text{ л/м}^3 \times \text{с}$.

Згідно табл. 1 [7] необхідна кількість ГПС-600 для гасіння нафтопродуктів для РВС-5000 становить 5 шт. Орієнтовний час подавання піни при гасінні бензину взято з табл. 2 [7].

В табл. 3 зазначено необхідну кількість ГПС-600 для поверхневого гасіння пожежі [15].

Згідно з табл. 3 для гасіння пожежі площею 346 м^2 при інтенсивності подавання піни $0,08 \text{ л/м}^3 \times \text{с}$ необхідно забезпечити роботу 5 ГПС-600, що збігається з даними табл. 1.

Табл. 1. Геометричні параметри резервуарів та необхідна кількість стволів для охолодження резервуарів і генераторів піни для гасіння нафтопродуктів в них

Геометричні параметри резервуарів				Кількість водяних стволів для охолодження резервуара:		Кількість генераторів піни	
об'єм ($V_{рез}$), м ³	діаметр ($D_{рез}$), м	висота ($H_{рез}$), м	площа дзеркала горіння ($S_{рез}$), м ²	що горить	сусіднього	бензин, гас	дизпаливо
				А або аналог/ лафетні			
100	4,7	6	17,3	3/-	2/-	1/-	1/-
200	6,6	6	34,2	3/-	2/-	1/-	1/-
300	7,6	7,5	45,3	3/-	2/-	1/-	1/-
400	8,5	7,5	56,7	3/-	2/-	1/-	1/-
700	10,4	9	84,9	4/-	2/-	2/-	1/-
1 000	10,4	12	84,9	4/-	2/-	2/-	1/-
2 000	15,2	12	181,4	6/3	2/2	3/1	2/1
3 000	19	12	283,4	7/3	2/2	4/2	3/1
5 000	21	15	346,2	-/3	-/2	5/2	3/1
10 000	28,5	18	637,6	-/4	-/2	9/3	6/2
20 000	40	18	1256	-/5	-/2	17/5	11/4
30 000	45,6	18	1632,3	-/6	-/2	22/7	14/5
40 000	56,9	18	2541,5	-/8	-/2	34/11	22/7
50 000	60,7	18	2892,3	-/8	-/2	39/12	25/8

Табл. 2. Орієнтовний час подавання піни для гасіння нафтопродуктів в резервуарах

Вид та засоби подавання піни	Розрахунковий час (хв.) гасіння:		
	бензин, гас	дизпаливо	мазут
Піна середньої кратності (ГПС-600, ГПС-2000)	50	30	25
Піна низької кратності (ПЛС, СПП)	60	50	35

В табл. 4 [15] зазначено необхідну кількість стволів типу СПП для гасіння за встановленою площею пожежі.

Згідно табл. 4 необхідна кількість стволів типу СПП становить: СПП – 6 шт; СПП-4 – 5 шт; СПП-8 – 3 шт; Також, згідно [7, 15] при розрахунку сил та засобів для гасіння пожеж необхідно враховувати запас вогнегасних засобів від розрахункової кількості вогнегасних речовин на гасіння. У табл. 5 зазначено запас вогнегасних засобів, який враховується при розрахунку сил та засобів для гасіння пожежі.

Згідно даних із табл. 5 для гасіння пожеж нафти і нафтопродуктів в резервуарах необхідно забезпечити трикратний запас піноутворювача.

5. Дослідження витрат піноутворювача при гасінні пожеж РВС-5000 традиційними методами

Загальну витрату по піноутворювачу вираховуємо за формулою:

$$W_{ЗАГ}^{ПУ} = N_{ПР}^{\Gamma} \times q_{ПР} \times 60 \times \tau_p \times K_3, \quad (1)$$

де $W_{ЗАГ}^{ПУ}$ – загальна витрата піноутворювача, кг; $N_{ПР}^{\Gamma}$ – необхідна кількість технічних приладів подавання вогнегасної речовини (СПП, ГПС); $q_{ПР}$ – подавання (витрата) вогнегасної речовини, що визначається із технічного приладу подавання, л/с; τ_p – розрахунковий час гасіння пожежі, хв; K_3 – коефіцієнт запасу вогнегасної речовини.

Відповідно до формули (1) та згідно даних з табл. 1, 2, 3 та 5 загальна витрата піноутворювача для ГПС-600 становить:

$$W_{\text{ЗАГ}}^{\text{ПУ}} = 5 \times 0,36 \times 60 \times 50 \times 3 = 16200 \text{ кг}, \quad (2)$$

Загальні витрати піноутворювача для стволів СПП, СПП-4 та СПП-8 визначаємо за тією ж формулою. Дані по кількості необхідних СПП взято з табл. 4. Для СПП витрати ПУ становлять 15552 кг; для СПП-4 – 25920 кг; для СПП-8 – 31104 кг.

Табл. 3. Необхідне число ГПС для поверхневого гасіння пожежі

Площа пожежі, м ²	Необхідне число пінних генераторів для поверхневого гасіння пожеж					
	ГПС-200		ГПС-600		ГПС-2000	
	При подачі розчину, л/(м ³ ·с)					
	0,05	0,08	0,05	0,08	0,05	0,08
1	2	3	4	5	6	7
до 25	1	1	1	1	-	-
40	1	2	1	1	-	-
75	2	3	1	1	-	-
100	3	4	1	2	-	-
120	3	5	1	2	-	-
150	4	6	2	2	-	-
180	5	8	2	3	-	-
200	5	8	2	3	1	1
250	7	10	3	4	1	1
300	8	-	3	4	1	2
350	9	-	3	5	1	2
400	10	-	4	6	1	2
450	-	-	4	6	2	2
500	-	-	5	7	2	2
600	-	-	5	8	2	3
700	-	-	6	10	2	3
800	-	-	7	11	2	4
900	-	-	8	12	3	4
1000	-	-	9	14	3	4
1100	-	-	10	15	3	5
1200	-	-	10	16	3	5
1300	-	-	11	18	4	6
1400	-	-	12	19	4	6
1500	-	-	13	20	4	6
1600	-	-	14	-	4	7
1700	-	-	15	-	5	7
1800	-	-	15	-	5	8
1900	-	-	16	-	5	8
2000	-	-	17	-	5	8

6. Визначення економічної ефективності застосування компресійної піни для підшарового гасіння резервуарів

Для підшарового гасіння за допомогою КП, при використанні піни К5 та К10 при тиску 4 МПа значення витрат піноутворювача взято з [1]. Для піни К10 ви-

трата піноутворювача на гасіння становить 1389 кг, а для піни К5 4319 кг. З урахуванням трикратного запасу загальні витрати становлять 4167 кг та 12957 кг відповідно.

Табл. 4. Необхідне число повітряно-пінних стволів для поверхневого гасіння пожежі

Площа пожежі, м ²	Необхідне число пінних генераторів для поверхневого гасіння пожеж								
	СПП			СПП-4 (СППС - 4)			СПП-8 (СППС-8)		
	При подачі розчину, л/(м ³ ·с)								
	0,1	0,12	0,15	0,1	0,12	0,15	0,1	0,12	0,15
до 25	1	1	1	1	1	1	1	1	1
40	1	1	1	1	1	1	1	1	1
50	1	1	2	1	1	1	1	1	1
60	1	2	2	1	1	2	1	1	1
80	2	2	2	1	2	2	1	1	1
90	2	2	3	2	2	2	1	1	1
100	2	2	3	2	2	2	1	1	1
120	2	3	3	2	2	3	1	1	2
160	3	4	4	2	3	3	1	2	2
180	3	4	4	3	3	4	2	2	2
200	4	4	5	3	4	4	2	2	2
220	4	5	6	3	4	5	2	2	2
240	4	5	6	3	4	5	2	2	3
260	5	6	7	4	4	5	2	2	3
280	5	6	7	4	5	6	2	3	3
300	5	6	8	4	5	6	2	3	3
320	6	7	8	4	5	6	2	3	3
350	6	7	9	5	6	7	3	3	4
400	7	8	10	5	7	8	3	3	4
450	8	9	12	6	7	9	3	4	5
500	9	10	13	7	8	10	4	4	5

Табл. 5. Запас вогнегасних засобів, який враховується при розрахунку сил та засобів для гасіння пожежі

Вид пожежі, вогнегасна речовина	Коефіцієнт запасу K_z від розрахункової кількості ВР на гасіння	Розрахунковий час запасу τ_z , год
Більшість пожеж:		
вода на період гасіння	5	-
вода на період догашування (розбирання конструкцій, проливання місця горіння та ін.)	-	3
Пожежі для об'ємного гасіння яких застосовують:		
Діоксид вуглецю, інші газові вогнегасні речовини	1,3	-
Пожежі на судах (піноутворювач для гасіння в МКВ, трюмах і надбудовах)	3	-
Пожежі нафти і нафтопродуктів в резервуарах:		
піноутворювач	3	-
вода для гасіння піною	5	-
вода на охолодження наземних резервуарів:		
пересувними засобами	-	6
стаціонарними засобами	-	3
вода на охолодження підземних резервуарів	-	3
Пожежі на технологічних установках переробки нафти і нафтопродуктів (піноутворювач)	3	-
Пожежі в підвалах і інших заглиблених приміщеннях при об'ємному гасінні пінами середньої та високої кратності (піноутворювач)	2...3	-

Згідно отриманих даних прораховано вартість гасіння пожежі в РВС-5000 при використанні різних технічних приладів подавання піни. Вартість ПУ «Барс S-2» становить орієнтовно 40 грн/кг.

Табл. 6. Результати проведених розрахунків

Технічний прилад	ГПС-600	СПП	СПП-4	СПП-8	КП К10	КП К5
Витрата, кг	16200	15552	25920	31104	4167	12957
Вартість, грн	648000	622080	1036800	1244160	166680	518280

Згідно отриманих даних можна зробити висновок, що гасіння пожежі в РВС-5000 за допомогою компресійної піни К10 із застосуванням підшарового способу обходиться майже в 4 рази дешевше ніж при застосуванні традиційних технічних засобів.

7. Обговорення економічної ефективності підшарового гасіння РВС компресійною піною

У межах проведеного дослідження було здійснено порівняльний аналіз економічної ефективності застосування компресійної піни для підшарового гасіння пожеж нафтопродуктів (бензину) у РВС-5000. Аналіз базувався на даних моделювання пожежі в середовищі SolidWorks Flow Simulations [1], де площа дзеркала горіння становила 346 м², а також на нормативних рекомендаціях щодо інтенсивності подавання вогнегасних речовин, розрахункового часу гасіння та трикратного запасу піноутворювача відповідно до методичних рекомендацій ДСНС України [7, 15]. Методика розрахунків включала визначення загальної витрати піноутворювача за формулою (1), яка враховує кількість технічних засобів подавання (ГПС-600, стволи СПП різних модифікацій), їхню питому витрату, розрахунковий час гасіння бензину та коефіцієнт запасу ($K_3=3$). Для традиційного поверхневого способу гасіння були використані дані табл. 1-5, які визначають необхідну кількість генераторів піни (5 шт. ГПС-600 для площі 346 м² при інтенсивності 0,08 л/м²·с) та стволів СПП (від 3 до 6 шт. залежно від модифікації). Для підшарового способу з компресійною піною К5 К10 при тиску 4 МПа витрати піноутворювача були взяті безпосередньо з результатів моделювання [1] і становили 4319 кг (К5) та 1389 кг (К10) на етап гасіння з подальшим урахуванням трикратного запасу.

Отримані результати чітко демонструють перевагу підшарового способу гасіння з використанням компресійної піни. Загальна витрата піноутворювача при традиційному поверхневому гасінні коливається в діапазоні 15552-31104 кг залежно від типу стволів (ГПС-600 – 16200 кг, СПП – 15552 кг, СПП-4 – 25920 кг, СПП-8 – 31104 кг. Натомість для компресійної піни К10 загальна витрата становить лише 4167 кг, а для К5 – 12957 кг. Таким чином, використання компресійної піни кратністю 10 дозволяє зменшити прямі фінансові витрати на піноутворювач мінімум у 4 рази.

Ця економічна перевага пояснюється кількома фізичними та технологічними чинниками. По-перше, компресійна піна має більшу стійкість, що забезпечує ефективніше витіснення горючих парів і швидше охолодження поверхні горіння при підшаровому подаванні безпосередньо під шар нафтопродукту. По-друге, підшаровий спосіб гасіння зменшує загальне навантаження на водопостачання, рукавні лінії та кількість особового складу.

Особливо важливим є практичне значення результатів у умовах воєнного часу та систематичних атак на критичну інфраструктуру. Як показано в прикладах

[2–6], гасіння пожеж на нафтобазах може тривати від кількох годин до кількох діб, потребує сотень тонн піноутворювача та вимагає залучення значних сил ДСНС. Запровадження технології гасіння підшаровим способом за допомогою компресійної піни дозволяє суттєво скоротити час ліквідації пожежі, зменшити витрати на логістику та зберігання вогнегасних засобів, а також знизити ризики для особового складу. Це робить технологію не лише економічно доцільною, а й стратегічно важливою для захисту об'єктів нафтогазового комплексу.

8. Висновки

1. Відповідно до проведеного дослідження встановлено, що впровадження технології підшарового гасіння пожеж у вертикальних сталевих резервуарах з використанням компресійної піни є значно ефективнішим і економічно доцільним рішенням порівняно з традиційними способами подавання повітряно-механічної піни через генератори ГПС-600 та стволи типу СПП. Підшаровий спосіб забезпечує безпосереднє введення вогнегасної речовини в нижню частину резервуара, що сприяє швидкому утворенню суцільного ізолювального шару піни на поверхні нафтопродукту, суттєво зменшує тепловий вплив на конструкцію резервуара, мінімізує ризик повторного займання та дозволяє швидше локалізувати та ліквідувати пожежу. Завдяки цьому технологія не тільки демонструє високу технічну ефективність, але й забезпечує значне зниження прямих фінансових витрат, роблячи її економічно виправданою та стратегічно доцільною для широкого впровадження на об'єктах нафтогазового комплексу.

2. Отримані розрахунки свідчать, що витрати на піноутворювач при гасінні пожежі в РВС-5000 за допомогою компресійної піни К10 підшаровим способом становлять приблизно 166 680 грн, тоді як застосування традиційних способів потребує витрат на рівні 640 000 грн. Це означає економію майже в чотири рази за вартістю витратних матеріалів та засобів гасіння. Така суттєва різниця в витратах у поєднанні з кращими технічними характеристиками гасіння створює вагомі підстави для переходу на сучасні технології підшарового гасіння компресійною піною на підприємствах нафтогазової галузі.

Література

1. Kovalyshyn V., Velykyi N., Kovalyshyn V., Voitovych T., Bun R., Novitskyi Y., Firman V. Devising technology for extinguishing oil tanks using compressed foam by sub-layer technique. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 3(10(129)). С. 6–20. doi: 10.15587/1729-4061.2024.305684

2. Zaxid.net. Після ракетного удару пожежу на нафтобазі у Львові гасили 13 годин. URL: https://zaxid.net/pozhezhu_na_naftobazi_u_lvovi_gasili_blyzko_13_godin_n1539591

3. Радіо Свобода. У Василькові після авіаудару горить нафтобаза. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/news-naftobaza-vasylkiv-obstril/31749379.html>

4. Громадське радіо. На Рівненщині загасили пожежу на нафтобазі, яка виникла внаслідок влучання російської ракети. URL: <https://hromadske.radio/news/2022/03/30/na-rivnenshchyni-zahasyly-pozhezhu-na-naftobazi-iaka-vynykla-vnaslidok-vluchannia-rosiys-koi-rakety>

5. Укрінформ. У Харкові ліквідували пожежу на нафтобазі, яка виникла внаслідок удару вночі 10 лютого. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-regions/3826044-u-harkovi-likvidovali-pozezu-na-naftobazi-aka-vinikla-vnaslidok->

udaru-vnoci-10-lutogo.html

6. Економічна правда. Атаки окупантів на нафтобази завдали Україні \$230 мільйонів збитків. URL: <https://epravda.com.ua/news/2022/05/11/686921/>

7. Методичні рекомендації щодо організації оперативних дій підрозділів ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів, що сталися внаслідок обстрілів в умовах ведення бойових дій: наказ ДСНС України від 23.05.2022 р. № В-269;

8. Войтович Т. М. Вдосконалення технології «підшарового» пожежогасіння в резервуарах з нафтопродуктами : дис. ... д-ра філософії : 261. Львів, 2020. 216 с.

9. Kodryk A., Nikulin O., Titienko O., Kurtov A., Shakhov S. Залежність властивостей компресійної піни від робочих параметрів процесу генерування піни. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2019. 1(1(7)). С. 54–63.

10. Velykyi N., Kovalyshyn V., Voitovych T., Pastukhov P. Дослідження стійкості та кратності компресійної піни. Пожежна безпека. 2023. № 43. С. 34–40.

11. Войтович Т. М., Гусар Б. М., Ковалишин В. В., Кошеленко В. В., Грушовінчук О. В. Дослідження вітчизняних піноутворювачів для «підшарового» гасіння. Пожежна безпека. 2018. 32. С. 5–14.

12. Макаренко В. С., Кіреєв О. О., Чиркіна-Харламова М. А., Мінська Н. В., Шаршанов А. Я. Дослідження гасіння модельного вогнища пожежі класу «В» сипкими матеріалами. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 2(38). С. 281–296. doi: 10.52363/2524-0226-2023-38-19

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

14. Rie D.-H., Lee J.-W., Kim S. Class B fire extinguishing performance evaluation of a compressed air foam system at different air-to-aqueous foam solution mixing ratios. Applied Sciences. 2016. № 6(7). P. 191. URL: <https://doi.org/10.3390/app6070191>

15. Довідник керівника гасіння пожеж / за заг. ред. В. С. Кропивницького. Київ : ТОВ «Літера-Друк», 2016. 320 с.

V. Kovalyshyn, DSc, Professor, Professor of the Department

N. Velykyi, PhD, Associate Professor of the Department

V. Marych, PhD, Associate Professor, Doctoral student

Vol. Kovalyshyn, PhD, Head of Department

A. Velykyi, Senior Lecturer of the Department

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

APPLICATION OF COMPRESSION FOAM FOR EXTINGUISHING FIRES IN TANKS

An analysis of the economic efficiency of using compression foam for subsurface extinguishing of oil product fires (gasoline) in steel vertical tanks has been conducted. The study is based on calculations for a vertical steel tank with a volume of 5000 m³, whose burning mirror area is 346 m², modeled in the SolidWorks Flow Simulation environment [1]. The paper presents a comparative analysis of foam concentrate consumption for the traditional surface extinguishing method and the subsurface method using compression foam. Calculations were performed in accordance with the recommended supply intensity of the foam solution for the subsurface method – 0.08 l/m²·s. The calculated extinguishing time for gasoline and a triple reserve of foam concentrate according to the current methodological recommendations of the State Emergency Service of Ukraine were also taken into account. According to the conducted research, it was established that the use of compression foam with an expansion ratio of

10 allows reducing foam concentrate consumption by almost 4 times compared to traditional surface extinguishing. Additional advantages include reduced thermal stress on the personnel of the State Emergency Service units, lower risk to firefighters, and decreased load on fire-fighting equipment. The results of the study have practical significance for optimizing fire-fighting tactics at oil and gas complex facilities, oil depots, and petroleum product storage warehouses. The implementation of the proposed technology is particularly relevant under martial law conditions, when Ukraine's critical infrastructure is subjected to systematic rocket and drone attacks. The use of compression foam via the subsurface method will significantly increase the efficiency of protecting strategic facilities and reduce material losses from fires. Thus, subsurface extinguishing using compression foam is a promising direction for the development of oil product fire suppression in vertical steel tanks.

Keywords: compression foam, subsurface extinguishing, tank, air-mechanical foam, petroleum product, gasoline

References

1. 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. doi: 10.15587/1729-4061.2024.305684
2. Zaxid.net. (2022, March 27). Pislia raketnoho udaru pozhezhu na naftobazi u Lvovi hasyly 13 hodyn. Available at: https://zaxid.net/pozhezhu_na_naftobazi_u_lvovi_gasili_blizko_13_godin_n1539591
3. Radio Svoboda. (2022, March 12). U Vasylkovi pislia avioudaru horyt naftobaza. Available at: <https://www.radiosvoboda.org/a/news-naftobaza-vasylkiv-obstril/31749379.html>
4. Hromadske radio. (2022, March 30). Na Rivnenshchyni zahasyly pozhezhu na naftobazi, yaka vynykla vnaslidok vluchannia rosiiskoi rakety. Available at: <https://hromadske.radio/news/2022/03/30/na-rivnenshchyni-zahasyly-pozhezhu-na-naftobazi-iaka-vynykla-vnaslidok-vluchannia-rosiys-koi-rakety>
5. Ukrinform. (2024, February 12). U Kharkovi likviduvaly pozhezhu na naftobazi, yaka vynykla vnaslidok udaru vnochi 10 liutoho. Available at: <https://www.ukrinform.ua/rubric-regions/3826044-u-harkovi-likvidovali-pozezu-na-naftobazi-aka-vinikla-vnaslidok-udaru-vnoci-10-lutogo.html>
6. Ekonomichna pravda. (2022, May 11). Ataky okupantiv na naftobazy zavdaly Ukraini \$230 milioniv zbytkiv. Available at: <https://epravda.com.ua/news/2022/05/11/686921/>
7. Metodychni rekomendatsiyi shchodo orhanizatsiyi operatyvnykh diy pidrozdiliv DSNS pid chas hasinnia pozhezhu na skladakh naftoproduktiv, shcho stalysia vnaslidok obstriliv v umovakh vedennia boiovykh diy. (2022). DSNS Ukrainy V-269. Available at: <https://if.dsns.gov.ua/upload/1/1/9/3/3/4/7/Vr00vOSx9wVORgnKSrdVA Ynz6P9sLaTd1EVLmisK.pdf>
8. Voitovych, T. M. (2020). Vdoskonalennia tekhnolohii «pidsharovoho» pozhezhasinnia v rezervuarakh z naftoproduktamy. Unpublished qualifying scientific work. Lviv.
9. 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(7), 54–63. doi: 10.33269/nvcz.2019.1.54-63
10. Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovych, T., Pastukhov, P. (2023). Research of stability and expansion of compression foam. *Fire Safety*, 43, 34–40. doi:

10.32447/20786662.43.2023.05

11. Voytovych, T. M., Husar, B. M., Kovalyshyn, V. V., Koshelenko, V. V., Hrushovynchuk, O. V. (2018). Investigation of domestic foam agents for sublayer extinguishing. *Fire Safety*, 32, 5–14.

12. Makarenko, V. S., Kireev, O. O., Chyrkina-Kharlamova, M. A., Minska, N. V., Sharshanov, A. Ya. (2023). Study of extinguishing a model fire of class "B" with bulk materials. *Problems of Emergency Situations*, 2(38), 281–296. doi: 10.52363/2524-0226-2023-38-19

13. Vilinskyi, R. V., Havrylyuk, A. F. (2020). Analysis of the use of compression foam. In *Problems and prospects of life safety system development: Proceedings of the XV International Research and Practical Conference of Young Scientists, Cadets and Students*, 16–17. Available at: <https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/6990/1/1-16-46.pdf>

14. 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. doi: 10.3390/app6070191

15. Кropyvnytskyi, V. S. (Ed.). (2016). *Handbook of the fire extinguishing leader*. Ltd «Litera-Druk».

Надійшла до редколегії: 10.03.2026

Прийнята до друку: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення): 31.05.2026