

УДК 519.6

О. Є. Басманов, д.т.н., професор, головн.н.с. відділу (ORCID 0000-0002-6434-6575)

М. В. Максименко, ад'юнкт (ORCID 0000-0002-1888-4815)

В. В. Олійник, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-5193-1775)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ОПТИМАЛЬНИЙ ВИБІР СИЛ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПОЖЕЖІ В РЕЗЕРВУАРНІЙ ГРУПІ

Розглянуто оптимальний вибір сил і засобів для охолодження резервуарів в резервуарній групі при пожежі в одному із резервуарів. Під оптимальністю розуміється вибір сил та засобів, які будуть забезпечувати таку інтенсивність подачі води на охолодження стінок і покрівлі резервуарів, що не горять, при якій відповідні частини резервуарів не будуть нагріватися до критичних значень температури. В якості критерію оптимальності можуть бути обрані: мінімальні витрати води, мінімальна кількість особового складу або мінімальна кількість автоцистерн, що забезпечують подання води. Запропонований підхід спирається на модель охолодження резервуара водною плівкою, яка враховує променевий і конвекційний теплообмін стінки або покрівлі резервуара з осередком горіння, водною плівкою, навколишнім середовищем і внутрішнім простором резервуара. Для розв'язання задачі спочатку розраховується така інтенсивність подачі води, що забезпечує охолодження стінки і покрівлі резервуара до безпечних значень температури. Далі, виходячи з характеристик пожежних стволів, розраховується їх кількість, яка забезпечує розраховану інтенсивність подачі води стволами даного типу. Це дозволяє визначити оптимальний вибір сил та засобів за обраним критерієм. Показано, що на найбільшу небезпеку наражається резервуар з навітряного боку відносно резервуара, що горить. При цьому тепловий потік до його покрівлі при горінні горючої рідин сягає максимальних значень при легкому вітрі (1,6÷3,4) м/с, а для легкозаймистих монотонно зростає із зростанням швидкості вітру в діапазоні (0÷10) м/с. Показано, що в залежності від обраного критерію оптимізації (мінімальні витрати води, мінімальна кількість задіяного особового складу або автоцистерн) задача має різні розв'язки. Отримані результати можуть бути використані для побудови плану локалізації і ліквідації пожежі в резервуарній групі з нафтою і нафтопродуктами.

Ключові слова: пожежа в резервуарі, тепловий вплив пожежі, локалізація пожежі, охолодження водою

1. Вступ

Резервуарні парки є основним місцем зберігання нафтопродуктів в процесі їх переробки і транспортування. Гасіння пожежі в резервуарних парках ускладнено небезпекою вибуху сусідніх з пожежею резервуарів, що відбувається внаслідок теплового впливу на них. Поширення пожежі на сусідні резервуари призводить не лише до збільшення матеріальних втрат, а й становить загрозу життю особового складу, що приймає участь у гасінні пожежі. Одним із таких прикладів є пожежа на нафтобазі БРСМ-Нафта (м. Васильків, Київська обл., 2015 р.), коли під час її ліквідації загинули четверо рятувальників. В [1] проаналізовано 224 великих аварій і відзначено, що багатьом з них був притаманний «ефект доміно» тобто таких ситуацій, коли одна аварія, навіть відносно незначна, створює підґрунтя для іншої. В [2] відзначається, що пожежі спричиняють майже 43 % усіх «ефектів доміно», причому найбільш поширеним сценарієм є пожежа в резервуарі або розливу горючої рідини.

Таким чином, актуальною проблемою є розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок впливу теплового потоку на них.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [3] проведено статистичний аналіз 1144 аварій, що мали місце в резервуарних парках. З них 100 класифіковано як аварії, які супроводжувалися ефектом доміно.

но. Визначено найбільш вірогідні послідовності причинних факторів для ініціювання аварій типу «доміно». Але питання щодо запобігання розповсюдженню аварії залишається відкритим. В [4] з використанням методу пробіт-функцій визначено критичну теплову дозу для відмови обладнання. Це дозволяє враховувати вплив первинного та кількох вторинних сценаріїв пожежі на подальше спричинення ефекту доміно, і отримати час до подальших відмов. Але такий підхід не враховує метеорологічних умов і, зокрема, напрямку і швидкості вітру, що істотно впливають на тепловий потік від пожежі до певного технологічного об'єкта. В [5] проведено ймовірнісний аналіз відмов, які здатні призвести до каскадного розповсюдження аварії. Такий підхід дозволяє виявити слабкі місця в системі пожежної безпеки, але не дає відповіді про шляхи її покращення. В [6] за допомогою нейронної мережі визначається критичний час перебування резервуара з горючої рідиною під тепловим впливом пожежі. Недоліком такого підходу є те, що він спирається на статистику, а не на фізичні процеси. Як наслідок, побудована модель є вірною лише в діапазоні тих статистичних даних, на які вона спирається. Ймовірнісна модель розповсюдження ланцюга доміно розглянута в [7], але і тут без відповіді залишається питання щодо вибору сил і засобів для локалізації аварії. Прогнозуванню і попередженню каскадних аварій присвячено [8], але запобігання розглянуто лише з точки зору профілактики, а не ліквідації аварії.

В [9] досліджено безпечну відстань між пожежею горючої рідини і резервуаром. Але такий підхід не є ефективним для переробних підприємств, де концентрація значних об'ємів горючих рідин на відносно невеликій площі обумовлено технологічними процесами. В [10] побудовано модель теплового впливу пожежі на резервуар зі скрапленим природним газом. Але питання захисту резервуара залишається не розглянутим. В [11] побудовано модель нагріву резервуара з горючою рідиною під тепловим впливом від кількох осередків горіння. Але захист резервуара шляхом його охолодження залишено поза увагою.

В [12] наведено вимоги щодо інтенсивності подачі води на охолодження резервуара, що горить, і сусідніх з ним резервуарів, але вони не враховують впливу вітру і типу рідини, що горить, на тепловий потік від пожежі. В [13] побудовано модель охолодження стінки резервуара водною плівкою, що стікає по ній. Модель враховує променевий і конвекційний теплообмін з осередком горіння, навколишнім середовищем та внутрішнім простором резервуара. Але визначення інтенсивності подачі води, що забезпечує охолодження до безпечних значень температури, в роботі не розглядається. В [14] побудовано алгоритм визначення інтенсивності подачі води на охолодження резервуара в умовах пожежі, але сили і засоби, які можуть забезпечити визначений режим, залишено поза увагою. В той же час на початковій стадії локалізації пожежі має місце дефіцит сил та засобів.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок впливу теплового потоку на них є вибір сил та засобів для подачі води на охолодження стінок і покрівлі резервуара.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є оптимізація вибору сил та засобів для подачі води на охолодження стінки і покрівлі резервуара в умовах пожежі в сусідньому резервуарі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- визначити інтенсивність подачі води на охолодження при пожежі в резервуарній групі;
- визначити витрати води на охолодження сусідніх резервуарів;

– провести розрахунок сил та засобів для охолодження сусідніх резервуарів.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є дії пожежно-рятувальних підрозділів щодо охолодження резервуарів в умовах пожежі нафтопродукту в одному із резервуарів резервуарної групи. Предметом дослідження є оптимізації сил та засобів для подачі води на охолодження резервуарів, які не горять. Основна гіпотеза дослідження – перерозподіл сил та засобів для охолодження резервуарів, сусідніх з тим, що горить, дозволяє зробити це меншими силами, забезпечивши при цьому достатню ефективність охолодження. Для знаходження розподілу температур по стінці і покрівлі резервуара використано модель теплового балансу резервуара в умовах теплового впливу пожежі і охолодження водою. Для чисельного розв'язання системи рівнянь теплового балансу використано метод скінчених різниць. Програмну реалізацію моделей і алгоритмів виконано за допомогою середовища розробки Delphi 11 (Community Edition).

5. Вибір сил та засобів для охолодження сусідніх резервуарів

5.1. Визначення інтенсивності подачі води на охолодження резервуарів

Розглянемо пожежу в резервуарній групі з чотирьох резервуарів РВС (рис. 1), що знаходяться на нормативній відстані $0,75D$ один від одного, де D – діаметр резервуара.

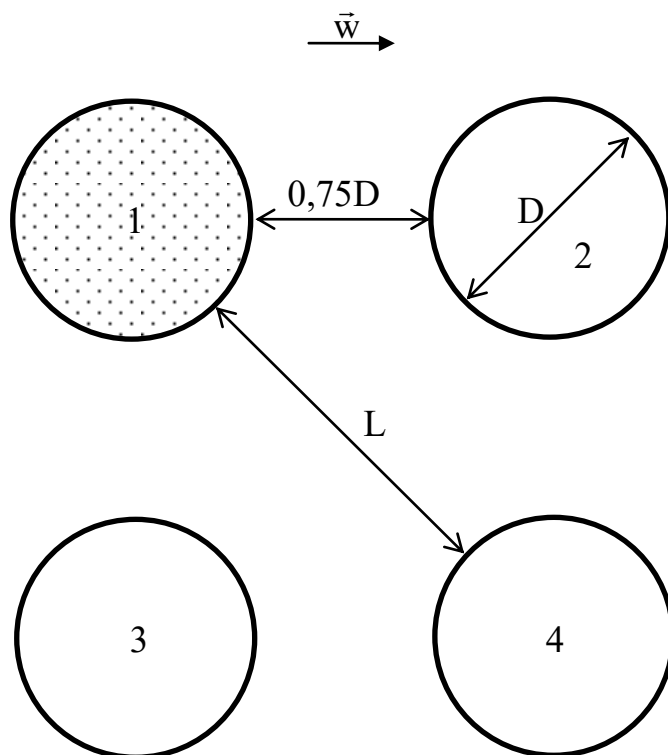


Рис. 1. Пожежа в резервуарній групі із чотирьох резервуарів РВС: 1 – резервуар, що горить; 2, 3, 4 – інші резервуари в групі

Напрямок вітру співпадає з напрямком від резервуара 1, що горить, до резервуара 2. При цьому відстань між резервуаром 1 і 4 буде складати:

$$L = (1,75\sqrt{2} - 1)D \approx 1,47D. \quad (1)$$

В [14] побудовано модель вибору оптимальної інтенсивності подачі води на охолодження резервуара в залежності від напрямку та швидкості вітру. Результати її застосування до резервуарної групи з чотирьох резервуарів РВС-10000 (діаметром 28,5 м і висотою 18 м) для різних швидкостей вітру (за 12-бальною шкалою Бофорта) наведені в табл. 1.

Табл. 1. Інтенсивність подачі води на охолодження стінки сусідніх резервуарів

Продукт	Резервуар	Розрахована інтенсивність, л/(м·с)			
		Штиль, u=(0÷0,3) м/с	Легкий, u=(1,6÷3,4) м/с	Помірний, u=(5,5÷7,9) м/с	Свіжий, u=(8,0÷10,7) м/с
Нафта	2	0,27	0,35	0,37	0,37
	3	0,27	0,21	0,08	0,03
	4	0,14	0,14	0,07	0,03
Бензин	2	0,47	0,90	1,05	1,09
	3	0,47	0,38	0,16	0,11
	4	0,26	0,27	0,17	0,12
Дизельне паливо	2	0,30	0,55	0,58	0,58
	3	0,30	0,24	0,09	0,05
	4	0,16	0,16	0,09	0,05
Мазут	2	0,19	0,35	0,37	0,37
	3	0,19	0,15	0,04	–
	4	0,09	0,10	0,05	–

Інтенсивність подачі води на охолодження покрівлі резервуара наведена в табл. 2.

Табл. 2. Інтенсивність подачі води на охолодження покрівлі сусідніх резервуарів

Продукт	Резервуар	Розрахована інтенсивність, л/(м·с)			
		Штиль, u=(0÷0,3) м/с	Легкий, u=(1,6÷3,4) м/с	Помірний, u=(5,5÷7,9) м/с	Свіжий, u=(8,0÷10,7) м/с
Нафта	2	0,44	0,62	0,56	0,48
	3	0,41	0,31	0,11	0,04
	4	0,17	0,16	0,04	–
Бензин	2	0,80	1,33	1,44	1,45
	3	0,73	0,54	0,21	0,14
	4	0,33	0,32	0,14	0,09
Дизельне паливо	2	0,50	0,70	0,64	0,54
	3	0,46	0,34	0,12	0,06
	4	0,19	0,18	0,07	0,01
Мазут	2	0,32	0,45	0,41	0,35
	3	0,29	0,21	0,06	–
	4	0,12	0,11	0,01	–

Особливістю подачі води на охолодження резервуару за допомогою пересувної техніки або стаціонарно встановлених гідромоніторів є те, що частина води після удару струменя об стінку відскакує, не приймаючи участі в охолодженні.

5.2. Визначення витрати води на охолодження сусідніх резервуарів

Оскільки охолоджуватися має півпериметр сусіднього резервуара, обернений в бік пожежі, то витрати води на його охолодження описуються виразами:

$$G_w = 0,5\pi I_w D; \quad G_r = 0,5\pi I_r D,$$

де I_w, I_r – інтенсивності подачі води на охолодження стінки і покрівлі відповідно; G_w, G_r – витрати води на охолодження стінки і покрівлі.

Витрати води стволом залежать від його діаметру і напору – табл. 3 [15].

Табл. 3. Витрати води пожежними стволами

Ствол	Діаметр ствола, мм	Напір води, м		
		20	40	60
Лафетний	25	9,7	13,6	21
А	19	5,4	7,4	9
Б	13	2,7	3,7	4,5

З урахуванням коефіцієнта використання води k_s ствол може забезпечити подачу води на охолодження стінки:

$$Q_w = k_s Q,$$

де Q – витрати води пожежним стволом (табл. 3).

При охолодженні покрівлі будемо вважати коефіцієнт використання води рівним 1, оскільки в цьому випадку не відбувається відбиття води при ударі. Тоді необхідна кількість стволів для подачі води на охолодження стінки n_w і покрівлю n_r може бути обчислена за формулою:

$$n_w = \left[\frac{G_w}{Q_w} \right] = \left[\frac{\pi I_w D}{2k_s Q} \right], \quad (2)$$

$$n_r = \left[\frac{G_r}{Q} \right] = \left[\frac{\pi I_r D}{2Q} \right], \quad (3)$$

де квадратні дужки означають округлення до цілого.

5.3. Розрахунок сил та засобів для охолодження сусідніх резервуарів

Задача оптимального вибору сил та засобів для охолодження резервуарів в резервуарній групі має вигляд:

$$\begin{aligned} f(n, d, h_w) &\rightarrow \min_{n, d, h_w}; \\ T_w(n, d, h_w) &< T_{\max}; \\ T_{wc}(n, d, h_w) &< T_b; \\ T_r(n, d, h_w) &< T_{\max}; \\ T_{rc}(n, d, h_w) &< T_b, \end{aligned}$$

де $n=n_w+n_r$ – загальна кількість стволів, що приймає участь в охолодженні сусідніх резервуарів; d – діаметр насадка; h_w – напір води; T_w, T_r – температура стінки та покрівлі резервуара, що охолоджується; T_{wc}, T_{rc} – температура води, що стікає по стінці і покрівлі резервуара; T_{\max} – максимально припустима температура нагріву сталевих конструкцій резервуара; $T_b=100^\circ\text{C}$ – температура кипіння води. В якості функції $f(n, d, h_w)$ може бути обрано:

- кількість особового складу, залученого до охолодження;
- кількість пожежних автомобілів, що забезпечують роботу даного типу пожежних стволів;

- витрати води пожежними стволами.

Розглянемо в якості приклада горіння в резервуарній групі РВС-10000 з нафтою в умовах легкого вітру ($u=(1,6\div 3,4)$ м/с), направленою від резервуара 1 в бік резервуара 2 (рис. 1). Підстанова в формулу (2) інтенсивності подачі води із табл. 1 і витрат води стволом із табл. 3 дозволяє розрахувати кількість стволів, необхідних для охолодження певного резервуара. Із умови про охолодження всього півпериметра з боку пожежі випливає, що необхідно задіяти щонайменше два стволи. Результати розрахунків наведені в табл. 4.

Табл. 4. Сили і засоби для охолодження стінок сусідніх резервуарів

Резервуар	Ствол	Напір, м	Нафта; вітер легкий, $u=(1,6\div 3,4)$ м/с			
			Стволів	Особовий склад	Автомобілів	Витрати води, л/с
2	А	40	7	14	3,5	51,8*
		60	6	12	3*	54,0
	Б	40	14	14	3,5	51,8*
		60	12	12	3*	54,0
	Лаф.	40	4	12	4	54,4
		60	3	9*	3*	63,0
3	А	40	5	10	2,5	37,0
		60	4	8	2	36,0
	Б	40	9	9	2,25	33,3
		60	7	7	1,75*	31,5*
	Лаф.	40	3	9	3	40,8
		60	2	6*	2	42,0
4	А	40	3	6	1,5	22,2*
		60	3	6	1,5	27,0
	Б	40	6	6	1,5	22,2*
		60	5	5*	1,25*	22,5
	Лаф.	40	2	6	2	27,2
		60	2	6	2	42

Табл. 5. Сили і засоби для охолодження покрівель сусідніх резервуарів

Резервуар	Ствол	Напір, м	Нафта; вітер легкий, $u=(1,6\div 3,4)$ м/с			
			Стволів	Особовий склад	Автомобілів	Витрати води, л/с
2	А	40	4	8	2	29,6
		60	3	8	1,5	27,0
	Б	40	8	8	2	29,6
		60	6	6	1,5	27,0
	Лаф.	40	2	6	2	27,2
		60	1	3*	1*	21,0*
3	А	40	2	4	1	14,8
		60	2	4	1	18,0
	Б	40	4	4	1	14,8
		60	3	3*	0,75*	13,5*
	Лаф.	40	1	3*	1	13,6
		60	1	3*	1	21,0
4	А	40	1	2*	0,5*	7,4*
		60	1	2*	0,5*	9,0
	Б	40	2	2*	0,5*	7,4*
		60	2	2	0,5*	9,0
	Лаф.	40	1	3	1	13,6
		60	1	3	1	21,0

Розрахунок сил і засобів було проведено в припущенні, що ствол Б потребує одного ствольщика, ствол А – 2, лафетний ствол – 3; автомобіль АЦ-40 забезпечує роботу одного лафетного ствола або 2-х стволів А, або 4-х стволів Б [15]. Зірочкою (*) відмічені мінімальні значення для даного резервуара за відповідним критерієм.

6. Обговорення результатів вибору сил та засобів для охолодження сусідніх резервуарів

Чинні рекомендації щодо гасіння пожеж в резервуарних парках з нафтою і нафтопродуктами [12] при розрахунку часу, протягом якого стінка сусіднього резервуара може досягти критичної температури, спираються на експериментальні дані щодо пожежі в резервуарі РВС-5000 з мазутом. При цьому не враховано ні відмінностей теплового потоку при пожежі різних видів нафтопродуктів, ні впливу вітру. Тому при розгляді пожежі в резервуарній групі (рис. 1) було використано модель охолоджуючої дії водної плівки на резервуар, що нагрівається під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі [13]. Вказана модель враховує променевий і конвекційний теплообмін стінки резервуара з пожежею, навколишнім середовищем, внутрішнім простором резервуара, а також бере до уваги нахил полум'я вітром.

Для кожного з резервуарів, що не горять (рис. 1), для чотирьох видів нафтопродукту (сира нафта, бензин, дизельне паливо, мазут) було визначено оптимальну інтенсивність подачі води на охолодження стінки (табл. 1) та покрівлі (табл. 2). Під оптимальною розуміється мінімальна інтенсивність подачі води, що забезпечує охолодження стінки і покрівлі резервуара до безпечних значень температури.

Аналіз даних, наведених в табл. 1 свідчить, що наявність вітру збільшує тепловий потік до резервуару 2, тим самим потребуючи більшої інтенсивності подачі води на охолодження цього резервуара. Зокрема, при помірному і свіжому вітрі (за шкалою Бофорта) потреби в охолодженні зростають в 1,5÷2 рази. В той же час потреба в охолодженні резервуара 3 спадає із зростанням швидкості вітру. Наприклад, вже при помірному вітрі необхідна інтенсивність подачі води на охолодження стінки зменшується приблизно в 3 рази. Для резервуара 4 потреби в охолодженні при штилі і легкому вітрі знаходяться на приблизно однаковому рівні, але вже при помірному вітрі необхідна інтенсивність падає майже в 2 рази.

Наявність вітру також збільшує тепловий потік до покрівлі резервуара 2, внаслідок чого вона потребує більшого охолодження (табл. 2). При цьому максимальна потреба в охолодженні для горючих рідини (нафта, дизельне паливо, мазут) має місце при легкому вітрі. Подальше зростання його швидкості призводить до деякого зменшення теплового потоку від пожежі. Для легкозаймистих рідин (бензин) тепловий потік від пожежі до резервуара 2 монотонно зростає із збільшенням швидкості вітру. Причиною цього є більша довжина факела при горінні легкозаймистих рідин порівняно з горючими. Для резервуара 3 потреба в охолодженні спадає зі збільшенням швидкості вітру. Зокрема, для помірного вітру необхідна інтенсивність охолодження в 2÷4 рази менша порівняно зі штилем. Інтенсивність подачі води на охолодження покрівлі резервуара 4 при штилі і легкому вітрі знаходиться приблизно на одному рівні (як і для охолодження його стінки – табл. 1). Але при подальшому зростанні швидкості вітру потреба в охолодженні стрімко падає, а для випадку пожежі сирової нафти або мазуту при свіжому вітрі взагалі немає необхідності в охолодженні покрівлі.

Для подачі води на охолодження резервуарів за допомогою пересувної техні-

ки можуть бути використані стволи різних типів: А, Б, лафетні. Вони відрізняються один від одного як витратами води (табл. 3), так і кількістю особового складу, що забезпечує їх роботу. Отже забезпечити подачу води з інтенсивністю, наведеною в табл. 1 і табл. 2 можна різними способами. Враховуючи дефіцит сил та засобів на початковій стадії локалізації пожежі, виникає необхідність забезпечити достатню інтенсивність подачі води, задіявши мінімальну кількість сил та засобів.

Особливістю подачі води на охолодження стінки є відбиття частини води після удару об неї, внаслідок чого відбитий об'єм води вже не приймає участі в охолодженні. Експериментальні дослідження свідчать, що в діапазоні швидкостей, які має струмінь води в момент удару о стінку резервуара, коефіцієнт використання води складає близько 30 %.

На прикладі пожежі в резервуарній групі з сировою нафтою в умовах легкого вітру для стволів різного типу розраховано їх кількість при напорі води 40 м і 60 м – табл. 4 і табл. 5. Виходячи з кількості стволів, визначено кількість особового складу і автомобілів, що забезпечують їх роботу. Відзначимо, що обрати тип ствола і напір води так, щоб одночасно мінімізувати кількість задіяного особового складу, кількість пожежних автомобілів та витрати води, не завжди можливо. Наприклад, за критерієм мінімуму задіяного особового складу для охолодження резервуара 2 доцільно обрати 3 лафетних стволи з напором 60 м. Це призводить до витрат води 63 л/с у той час, як мінімальні витрати води (51,8 л/с) досягаються використанням 14 стволів Б, тобто різниця складає 1,2 рази.

Обмеженням запропонованого підходу є те, що він може бути застосований до резервуарної групи із резервуарів типу РВС зі стаціонарною покрівлею.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з визначенням безпечного місця для розташування особового складу і техніки, задіяних у локалізації і ліквідації пожежі.

7. Висновки

1. З використанням моделі теплового впливу пожежі в резервуарі на сусідні резервуари визначено необхідні інтенсивності подачі води на охолодження стінок і покрівлі резервуарів в резервуарній групі. На найбільшу небезпеку наражається резервуар, розташований з навітряного боку. При помірному і свіжому вітрі (за шкалою Бофорта) потреби в охолодженні його стінки зростають в 1,5÷2 рази порівняно зі штилем. Наявність вітру також збільшує тепловий потік до покрівлі навітряного резервуара, внаслідок чого він потребує більшого охолодження. При цьому максимальна потреба в охолодженні для горючих рідин (нафта, дизельне паливо, мазут) має місце при легкому вітрі. Для легкозаймистих рідин (бензин) тепловий потік від пожежі до цього резервуара монотонно зростає зі збільшенням швидкості вітру. Причиною цього є більша довжина факела при горінні легкозаймистих рідин.

2. Визначено кількість пожежних стволів, що забезпечують необхідну інтенсивність охолодження стінок або покрівлі резервуара в залежності від типу ствола і напору води. Враховано, що частина води після удару об стінку відбивається і не приймає участі в її охолодженні. Виходячи з кількості пожежних стволів визначено кількість особового складу і автомобілів АЦ-40, що забезпечують їх роботу. Показано, що витрати води в залежності від обраного типу ствола і напору можуть відрізнитися до 50 %.

3. Сформульовано задачу оптимального вибору сил та засобів для охолодження

резервуарів, сусідніх з тими, що горять. Показано, що в залежності від обраного критерію оптимізації (мінімальні витрати води, мінімальна кількість задіяного особового складу або автоцистерн) задача має різні розв'язки. Дискретний характер зміни таких параметрів, як діаметр насадка і кількість пожежних стволів, дозволяє розв'язати задачу оптимізації шляхом повного перебору.

Література

1. Abdolhamidzadeh B., Abbasi T., Rashtchian D., Abbasi S. A. Domino effect in process-industry accidents – An inventory of past events and identification of some patterns. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2011. Vol. 24(5). P. 575–593. doi: 10.1016/j.jlp.2010.06.013
2. Amin M. T., Scarponi G. E., Cozzani V., Khan F. Improved pool fire-initiated domino effect assessment in atmospheric tank farms using structural response. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 242. P. 109751. doi: 10.1016/j.ress.2023.109751
3. Hou L., Wu X., Wu Z., Wu S. Pattern identification and risk prediction of domino effect based on data mining methods for accidents occurred in the tank farm. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. Vol. 193. P. 106646. doi: 10.1016/j.ress.2019.106646
4. Zhou J., Reniers G., Cozzani V. Improved probit models to assess equipment failure caused by domino effect accounting for dynamic and synergistic effects of multiple fires. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 154. P. 306–314. doi: 10.1016/j.psep.2021.08.020
5. Ovidi F., Zhang L., Landucci G., Reniers G. Agent-based model and simulation of mitigated domino scenarios in chemical tank farms. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. Vol. 209. P. 107476. doi: 10.1016/j.ress.2021.107476
6. Tamascelli N., Scarponi G. E., Amin M. T., Sajid Z., Paltrinieri N., Khan F., Cozzani V. A neural network approach to predict the time-to-failure of atmospheric tanks exposed to external fire. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 245. P. 109974. doi: 10.1016/j.ress.2024.109974
7. Men J., Chen G., Yang Y., Reniers G. An event-driven probabilistic methodology for modeling the spatial-temporal evolution of natural hazard-induced domino chain in chemical industrial parks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 226. P. 108723. doi: 10.1016/j.ress.2022.108723
8. Khan F., Amin M. T., Cozzani V., Reniers G. Domino effect: Its prediction and prevention – An overview. *Methods in Chemical Process Safety*. 2021. P. 1–35. doi: 10.1016/bs.mcps.2021.05.001
9. Yang R., Khan F., Neto E. T., Rusli R., Ji J. Could pool fire alone cause a domino effect? *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. Vol. 202. P. 106976. doi: 10.1016/j.ress.2020.106976
10. Iannaccone T., Scarponi G. E., Landucci G., Cozzani V. Numerical simulation of LNG tanks exposed to fire. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 149. P. 735–749. doi: 10.1016/j.psep.2021.03.027
11. Yang J., Zhang M., Zuo Y., Cui X., Liang C. Improved models of failure time for atmospheric tanks under the coupling effect of multiple pool fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2023. Vol. 81. P. 104957. doi: 10.1016/j.jlp.2022.104957
12. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою і

нафтопродуктами. НАПБ 05.02. 2003.

13. Максименко М. В. Модель охолодження стінки резервуара водою при пожежі в сусідньому резервуарі. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 1(37). С. 156–170. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-11

14. Basmanov O., Maksymenko M. Model for choosing optimal water flow rate for tank wall cooling. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. Vol. 2(38). P. 4–16. doi: 10.52363/2524-0226-2023-38-1

15. Довідник керівника гасіння пожеж / За заг. ред. В. С. Кропивницького. 2016.

O. Basmanov, DSc, Professor, Chief Researcher of the Department

M. Maksymenko, Adjunct

V. Oliinyk, PhD, Associated Professor, Head of Department

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

THE OPTIMAL CHOICE OF FORCES AND MEANS FOR COOLING THE TANK IN CASE OF FIRE IN THE TANK GROUP

The optimal choice of forces and means for cooling tanks in a tank group in the event of a fire in one of the tanks is considered. Optimality means the choice of forces and means that will ensure such intensity of water supply for cooling the walls and roofs of non-burning tanks, at which the corresponding parts of the tanks will not heat up to critical temperature values. As a criterion of optimality, the following can be selected: minimum water consumption, minimum number of personnel or minimum number of tankers providing water supply. The proposed approach is based on the model of cooling the tank with a water film, which takes into account the radiation and convection heat exchange of the wall or roof of the tank with the combustion center, the water film, the environment and the internal space of the tank. To solve the problem of optimal selection of forces and means, the intensity of water supply is first calculated, which ensures cooling of the wall and roof of the tank to safe temperature values. Next, based on the characteristics of the fire hydrants, their number is calculated, which ensures the calculated intensity of water supply through the hydrants of this type. This, in turn, allows determining the optimal choice of forces and means according to the selected criterion. It is shown that the tank on the windward side relative to the burning tank is exposed to the greatest danger. At the same time, the heat flow to its roof during the burning of combustible liquids reaches maximum values in light wind – (1.6÷3.4) m/s, and for flammable liquids it increases monotonically with increasing wind speed in the range of (0÷10) m/s. The obtained results can be used to build a plan for the localization and elimination of a fire in a tank group with oil and oil products.

Keywords: tank fire, thermal influence of fire, fire localization, water cooling

References

1. Abdolhamidzadeh, B., Abbasi, T., Rashtchian, D., Abbasi, S. A. (2011). Domino effect in process-industry accidents – An inventory of past events and identification of some patterns. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24(5), 575–593. doi: 10.1016/j.jlp.2010.06.013

2. Amin, M. T., Scarponi, G. E., Cozzani, V., Khan, F. (2024). Improved pool fire-initiated domino effect assessment in atmospheric tank farms using structural response. *Reliability Engineering & System Safety*, 242, 109751. doi: 10.1016/j.ress.2023.109751

3. Hou, L., Wu, X., Wu, Z., Wu, S. (2020). Pattern identification and risk prediction of domino effect based on data mining methods for accidents occurred in the tank farm. *Reliability Engineering & System Safety*, 193, 106646. doi: 10.1016/j.ress.2019.106646

4. Zhou, J., Reniers, G., Cozzani, V. (2021). Improved probit models to assess equipment failure caused by domino effect accounting for dynamic and synergistic ef-

fects of multiple fires. *Process Safety and Environmental Protection*, 154, 306–314. doi: 10.1016/j.psep.2021.08.020

5. Ovidi, F., Zhang, L., Landucci, G., Reniers, G. (2021). Agent-based model and simulation of mitigated domino scenarios in chemical tank farms. *Reliability Engineering & System Safety*, 209, 107476. doi: 10.1016/j.ress.2021.107476

6. Tamascelli, N., Scarponi, G. E., Amin, M. T., Sajid, Z., Paltrinieri, N., Khan, F., Cozzani, V. (2024). A neural network approach to predict the time-to-failure of atmospheric tanks exposed to external fire. *Reliability Engineering & System Safety*, 245, 109974. doi: 10.1016/j.ress.2024.109974

7. Men, J., Chen, G., Yang, Y., & Reniers, G. (2022). An event-driven probabilistic methodology for modeling the spatial-temporal evolution of natural hazard-induced domino chain in chemical industrial parks. *Reliability Engineering & System Safety*, 226, 108723. doi: 10.1016/j.ress.2022.108723

8. Khan, F., Amin, M. T., Cozzani, V., Reniers, G. (2021). Domino effect: Its prediction and prevention – An overview. *Methods in Chemical Process Safety*, 1–35. doi: 10.1016/bs.mcps.2021.05.001

9. Yang, R., Khan, F., Neto, E. T., Rusli, R., Ji, J. (2020). Could pool fire alone cause a domino effect? *Reliability Engineering & System Safety*, 202, 106976. doi: 10.1016/j.ress.2020.106976

10. Iannaccone, T., Scarponi, G. E., Landucci, G., Cozzani, V. (2021). Numerical simulation of LNG tanks exposed to fire. *Process Safety and Environmental Protection*, 149, 735–749. doi: 10.1016/j.psep.2021.03.027

11. Yang, J., Zhang, M., Zuo, Y., Cui, X., Liang, C. (2023). Improved models of failure time for atmospheric tanks under the coupling effect of multiple pool fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 81, 104957. doi: 10.1016/j.jlp.2022.104957

12. Instructions for extinguishing fires in tanks with oil and oil products. NAPB 05.02.

13. Maksymenko, M. (2023). A model of cooling the tank shell by water in the case of a fire in an adjacent tank. *Problems of emergency situations*, 1(37), 156–170. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-11

14. Basmanov, O., Maksymenko, M. (2023). Model for choosing optimal water flow rate for tank wall cooling. *Problems of emergency situations*, 2(38), 4–16. doi: 10.52363/2524-0226-2023-38-1

15. Handbook of the head of fire fighting / In general ed. V. Kropyvnytskyi, 320.

Надійшла до редколегії: 02.03.2024

Прийнята до друку: 12.04.2024