

УДК 614.84:536.7

МОДЕЛЬ НАГРІВУ РЕЗЕРВУАРА З НАФТОПРОДУКТОМ ПІД ВПЛИВОМ ПОЖЕЖІ В КІЛЬКОХ РЕЗЕРВУАРАХ РЕЗЕРВУАРНОЇ ГРУПИ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2.4-13>

Басманов О. Є.^{1*}, ORCID iD 0000-0002-6434-6575

Карпова Д. І.², ORCID iD 0000-0002-1692-3630

Бенедюк В. С.¹, ORCID iD 0000-0002-5109-5295

Зазимко О. В.¹, ORCID iD 0000-0002-7225-5606

Забаровський В. А.³, ORCID iD 0009-0000-9883-2419

*E-mail: basmanov@ukr.net

¹Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України, Україна

²Національний університет цивільного захисту України, Україна

³2 державний пожежно-рятувальний загін ГУ ДСНС у м. Києві, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

10.09.2025

Пройшла рецензування:

25.09.2025

Опубліковано:

11.12.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

пожежа в резервуарі,
рівняння теплового балансу,
тепловий потік
випромінюванням,
конвекція.

АНОТАЦІЯ

Об'єктом дослідження є теплові процеси, що мають місце в вертикальному сталевому резервуарі з нафтопродуктом в умовах теплового впливу пожежі в кількох сусідніх резервуарах резервуарної групи. Для визначення розподілу температури по поверхні резервуара, а також для розрахунку часу досягнення стінкою або покрівлею температури самоспалахування рідини, яка зберігається в резервуарі, використано рівняння теплового балансу для стінки і покрівлі резервуара. Модель враховує теплообмін випромінюванням і конвекцією з пожежею, навколишнім середовищем і внутрішнім простором резервуара. Розглянуто сценарії пожежі в резервуарній групі з чотирьох однакових резервуарів РВС. На прикладі резервуарів РВС-10000 з бензином показано, що вітер помірної швидкості, якої недостатньо для нахилу осі полум'я, призводить до збільшення теплового потоку до резервуара і зменшення часу досягнення ним небезпечних значень температури навіть тоді, коли напрям вітру не співпадає з напрямом від пожежі до резервуара. Зокрема, при швидкості вітру 2 м/с час досягнення температури самоспалахування парів бензину зменшується в приблизно в 1,5 рази порівняно з ситуацією, коли вітер відсутній. При швидкості вітру, достатній для нахилу осі полум'я, час досягнення небезпечного значення температури значно зменшується, якщо вітер нахилиє полум'я в бік резервуара, що нагрівається. При швидкості вітру понад 4 м/с цей час зменшується в 2÷3 рази. Показано, що у випадку горіння двох резервуарів з резервуарної групи більш небезпечною є ситуація, коли горять два діагонально розташовані резервуари. Тепловий вплив пожежі в трьох резервуарах є подібним до теплового впливу пожежі в двох діагонально розташованих резервуарах, але час досягнення резервуаром, що не горить, критичних значень температури є в середньому на 20% меншим. Побудована модель може бути використана для визначення частин стінки і покрівлі резервуара, які підлягають охолодженню, а також визначення граничного часу початку подачі води на охолодження.

Постановка проблеми. В умовах воєнного часу суттєво зростає ймовірність надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах зберігання нафтопродуктів, що належать до критичної інфраструктури держави. Їх руйнування внаслідок бойових дій чи диверсій може спричинити масштабні пожежі, вибухи та забруднення довкілля, створюючи загрозу

життю населення, енергетичній безпеці та стійкості економіки. У ході війни резервуарні парки перетворилися на одні з найбільш уразливих об'єктів енергетичної інфраструктури. Саме ракетні та артилерійські обстріли стали ключовим джерелом аварійних ситуацій на таких об'єктах протягом останніх років, а їх наслідком майже завжди є пожежі.

Характерною рисою цих подій є розвиток ефекту «доміно», коли одна аварія створює умови для виникнення наступної. Причиною цього є висока щільність зберігання легkozаймистих і горючих продуктів на відносно невеликих площах, що значно підвищує ризик масштабних надзвичайних ситуацій.

Прогнозування розвитку пожежі в резервуарній групі спирається на експериментальні дослідження горіння одного резервуара із групи РВС-5000 [1]. Але особливістю пожеж, викликаних обстрілами, є одночасне горіння кількох резервуарів, що призводить до збільшення щільності теплового потоку до сусідніх резервуарів. Відповідно до Кодексу цивільного захисту України [2] реагування на надзвичайні ситуації включає в себе дії щодо локалізації зони надзвичайної ситуації, а також ліквідації або мінімізації її наслідків. Стосовно резервуарних парків це означає, по-перше, охолодження резервуарів, що горять, та сусідніх з ними, а по-друге, підготовку і проведення пінної атаки. Основним способом захисту резервуарів є їх охолодження водою. Недостатнє або невчасне охолодження сусідніх з пожежею резервуарів призводить до нагріву сталевих конструкцій резервуара до температури самоспалахування парів нафтопродукту, що в залежності від концентрації парів в газовому просторі резервуара викликає вибух пароповітряною сумішшю в резервуарів або її горіння на виході з дихальних пристроїв.

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

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз 595 пожеж в резервуарних парках, наведений в [3], свідчить, що близько 30% з них супроводжувалися горінням більш ніж одного резервуара. В [4] відзначено, що теплове випромінювання від пожежі в резервуарі або розливу горючої рідин є основною причиною «ефекту доміно» при аваріях на складах зберігання нафти і

нафтопродуктів. В [5] методом Монте-Карло моделюється розповсюдження пожежі в резервуарному парку. При цьому для ймовірності вибуху або спалахування сусіднього резервуара використовується пробіт-функція, яка не враховує температури самоспалахування рідини та її рівень в резервуарі. В [6] для прогнозування поширення пожежі в резервуарному парку під впливом вітру використано нейронну мережу. Але загальним недоліком такого підходу є складнощі з його застосуванням за межами набору даних, на якому проводилося навчання нейронної мережі.

В [7] за допомогою пакета Fire Dynamics Simulator досліджено горіння сирої нафти: визначено швидкість вигорання рідини, геометричну форму полум'я, щільність теплового випромінювання. Але тепловий вплив пожежі на сусідні технологічні об'єкти залишено поза увагою. В [8] побудовано модель полум'я над рідиною, що горить. Модель враховує зміну температури полум'я вздовж осі, утворення диму та його вплив на зменшення теплового випромінювання. В [9] розглянуто щільність теплового потоку на горизонтальну поверхню від пожежі в вертикальному сталевому резервуарі, але наслідки теплового впливу пожежі на сусідні резервуари не розглянуто. В [10] досліджено втрату міцності сталевими конструкціями резервуара внаслідок теплового впливу пожежі в сусідніх резервуарах у випадку горіння кількох резервуарів. В [11] проаналізовано вплив рівня рідини в резервуарі, що нагрівається, на втрату міцності його стінками. Показано, що при рівні рідини менше певного значення резервуар зазнає вигину, інакше – текучої деформації. В [12] також досліджено тепловий вплив пожежі на вигин стінки в сусідньому резервуарі з нафтою в залежності від товщини стінки і співвідношення між діаметром і висотою резервуара. В той же час характерна температура самоспалахування легkozаймистих і горючих рідин є меншою, ніж температура, при якій

можлива втрата міцності конструкціями резервуара. В [13] побудовано модель нагріву вертикального сталевго резервуара під тепловим впливом пожежі. Модель враховує променевий і конвекційний теплообмін і дозволяє знайти розподіл температури по стінці і покрівлі резервуара в довільний момент часу. В [14] побудовано модель нагріву резервуара від полум'я, випромінююча поверхня якого складається з двох зон: – нижнього прозорого шару полум'я з високою температурою та темнішого верхнього шару, який містить сажу та дим. – Але випадок горіння кількох сусідніх резервуарів та його вплив на час – досягнення сталевими конструкціями резервуара температури самоспалахування парів рідини, що зберігається в ньому, не розглянуто.

Найпростішим способом захисту резервуара від теплового випромінювання пожежі в сусідньому резервуарі є їх розміщення на безпечній відстані один від одного. Але така відстань виявляється занадто великою [15] і не відповідає економічним і технологічним вимогам. Згідно з чинними вимогами [16] вертикальні сталеві резервуари зі стаціонарною покрівлею об'ємом до 50 тис. м³ розташовуються на відстані не більше 30 м один від одного. З огляду на це основним методом захисту резервуарів від теплового впливу пожежі є їх охолодження водою [17], при цьому важливе значення має граничний час початку охолодження.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок теплового потоку на них є визначення граничного часу початку охолодження в умовах горіння кількох резервуарів.

Формулювання цілей

дослідження. Метою роботи є визначення часу нагріву стінки або покрівлі вертикального сталевго резервуара з нафтопродуктом до небезпечного значення температури внаслідок теплового впливу пожежі в сусідніх резервуарах резервуарної групи. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання: побудувати рівняння теплового балансу стінки і покрівлі резервуара, що нагрівається під впливом пожежі; визначити тепловий потік від резервуарів, що горять, до резервуара, що нагрівається; чисельно розв'язати рівняння теплового балансу і визначити час досягнення небезпечного значення температури.

Методи дослідження. Об'єктом дослідження є теплові процеси в вертикальному сталевому резервуарі (РВС) з нафтопродуктом, що нагрівається під впливом пожежі в одному або кількох сусідніх резервуарах резервуарної групи із чотирьох резервуарів. Для розрахунку розподілу температури по стінці резервуара, що не горить, використано рівняння теплового балансу, яке враховує променевий і конвекційний теплообмін з пожежею і навколишнім середовищем, а також теплопровідність сталевго оболонки резервуара. Рівняння теплового балансу розв'язано чисельно за допомогою метода скінчених різниць. Програмну реалізацію метода виконано в середовищі програмування Delphi 12.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розподіл температури по стінці вертикального сталевго резервуара за умови пожежі в сусідніх резервуарах визначається рівняннями теплового балансу для сталевго стінки резервуара та покрівлі [13].

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_s \left(\frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T_1}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) + \frac{q_1}{\delta_s c_s \rho_s}; \quad 0 \leq \varphi < 2\pi; \quad 0 < z < H, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_s \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_2}{\partial \varphi^2} + \text{tg}^2 \beta \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} \right) + \frac{q_2}{\delta_s c_s \rho_s}; \quad 0 < r < R; \quad 0 \leq \varphi < 2\pi, \quad (2)$$

де $T_1(\varphi, z, t)$ – температура стінки у точці (φ, z) в момент часу t ; δ_s – товщина стінки; a_s , c_s , ρ_s – коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність і густина сталі відповідно; q_1 , q_2 – щільність теплового потоку на стінку та покрівлю резервуара відповідно; R , H – радіус і висота резервуара; β – кут, який утворює конічна поверхня покрівлі з горизонтальною площиною.

Щільності теплового потоку на поверхню резервуара q_1 і q_2 визначаються сумою щільностей теплових потоків:

- випромінюванням від пожежі;
- випромінюванням в навколишнє середовище;
- випромінюванням від внутрішньої поверхні стінки та покрівлі резервуара;
- конвекцією з навколишнім повітрям
- конвекцією з пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара;
- конвекцією з рідиною в резервуарів (для частини стінки нижче рівня нафтопродукту).

Для визначення щільності теплового випромінювання від полум'я над резервуаром було прийнято, що під впливом вітру основа полум'я витягується в підвітряному напрямку (рис. 1), утворюючи еліпс з меншою віссю, рівною діаметру резервуара, і більшою віссю, що дорівнює [11]

$$D' = 2,506D \cdot Fr^{0,067} Re^{-0,03} \left(\frac{\rho_v}{\rho_a} \right)^{0,145}, \quad (3)$$

де Re , Fr – числа Рейнольдса і Фруда

$$Re = \frac{wD}{\nu_a}; \quad Fr = \frac{w^2}{gD};$$

ρ_a – густина повітря; ρ_v – густина парів рідини при температурі кипіння; w – швидкість вітру; D – діаметр резервуара; ν_a – кінематична в'язкість повітря.

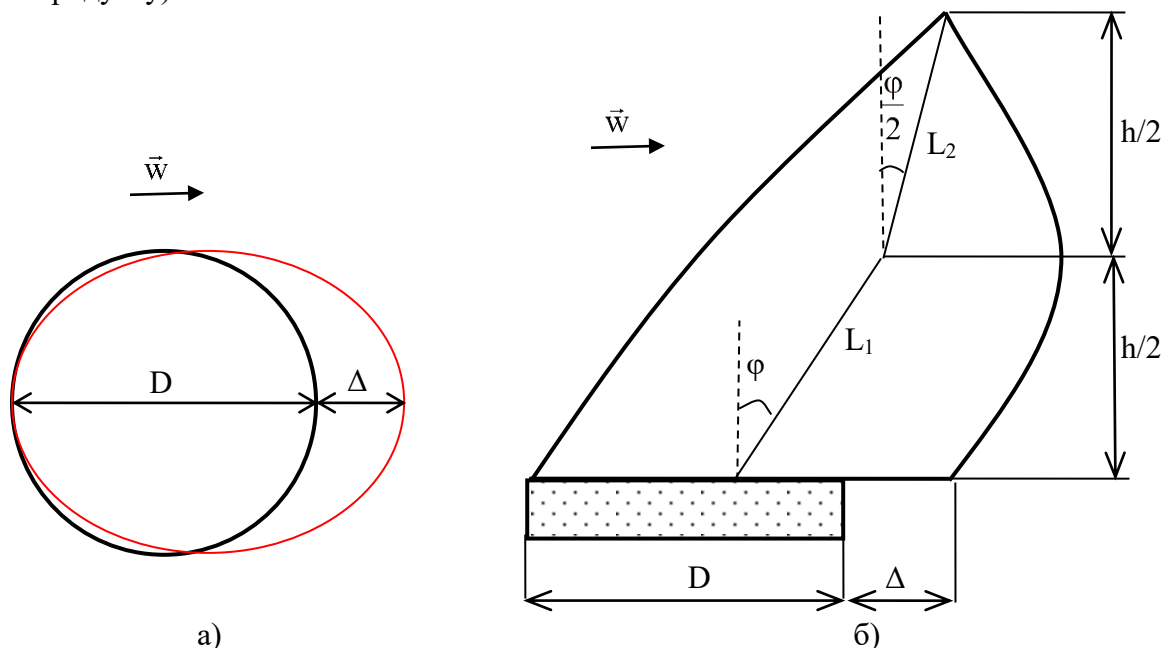


Рисунок 1 – Деформація полум'я над вертикальним сталевим резервуаром під впливом вітру: а) витягування основи полум'я в підвітряний бік; б) нахил осі полум'я

Під впливом вітру нижня половина полум'я відхиляється від вертикалі на кут φ , а верхня – на кут $\varphi/2$ (рис. 1). Загальна довжина полум'я L і кут нахилу φ описувалися залежностями

$$L = L_1 + L_2 = 10,615D \left(\frac{\eta}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0,305} (w^*)^{-0,03}; \quad (4)$$

$$\cos \varphi = (w^*)^{-0,5}, \quad (5)$$

де η – питома масова швидкість вигорання;
 L_1, L_2 – довжини вздовж осі полум'я, що
 відповідають половині його висоти; w^* –
 безрозмірна швидкість вітру:

$$w^* = \max \left\{ 1, w \left(\frac{\rho_a}{g\eta D} \right)^{1/3} \right\}. \quad (6)$$

Із залежностей (4)–(6) випливає, що
 вітер відхиляє полум'я від вертикалі лише
 починаючи з певної швидкості $w_{\min}$. При
 менших значеннях швидкості вісь полум'я
 залишається вертикальною. В той же час,
 розширення основи полум'я (3) в
 підвітряний бік має місце для будь-який
 значень швидкості вітру $w > 0$.

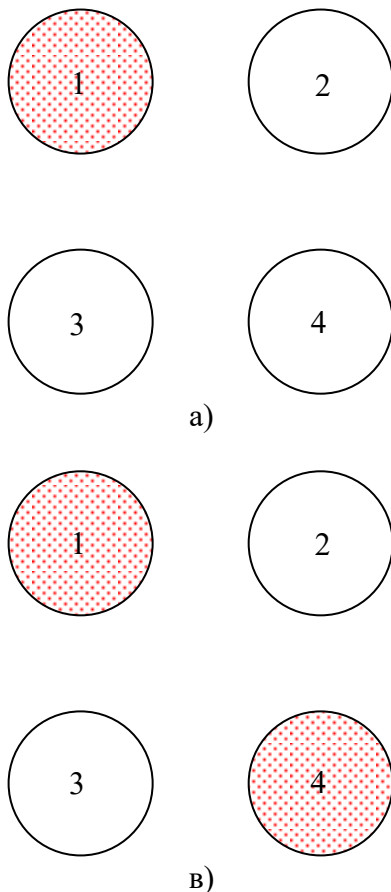


Рисунок 2 – Варіанти пожежі в резервуарній групі з чотирьох резервуарів

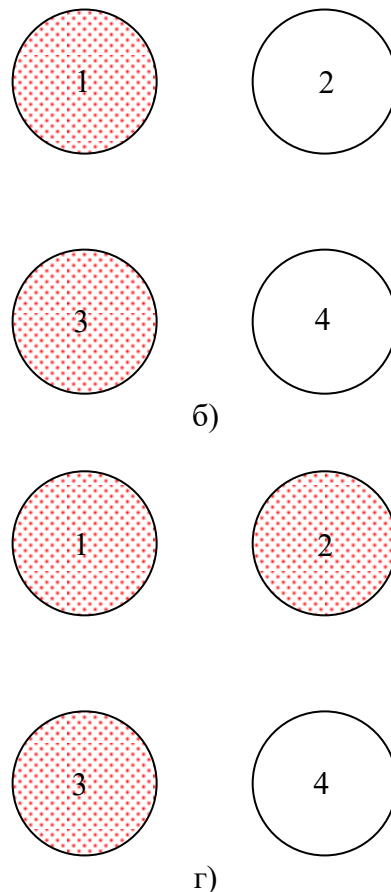
У випадку горіння одного резервуара
 (рис 2а) в залежності від напрямку вітру
 найбільша небезпека має місце для
 резервуарів 2 і 3, оскільки відстань до них
 є меншою, ніж до резервуара 4. При
 відстані між сусідніми резервуарами L_{12} ,

У випадку горіння кількох
 резервуарів тепловий потік
 випромінюванням від пожежі буде являти
 собою суму теплового потоку
 випромінюванням від окремих факелів:

$$q_f = \sum_{i=1}^N q_f^{(i)},$$

де $q_f^{(i)}$ – щільність теплового потоку від
 пожежі в i -му резервуарі; N – кількість
 резервуарів, що горить. З урахуванням
 симетрії для резервуарної групи з чотирьох
 резервуарів можливі наступні ситуації
 (рис. 2):

- горіння одного з резервуарів;
- горіння двох сусідніх або двох
 розташованих по діагоналі резервуарів;
- горіння трьох резервуарів.



відстань між резервуарами,
 розташованими по діагоналі, складе

$$L_{14} = (L_{12} + D)\sqrt{2} - D,$$

що для резервуарів РВС-10000 ($D=28,5$ м) і відстані між сусідніми резервуарами $L_{12}=30$ м, дає відстань між резервуарами 1 і 4 майже вдвічі більшу

$$L_{14} = (30 + 28,5)\sqrt{2} - 28,5 \approx 54,2 \text{ (м)}.$$

У випадку пожежі в двох резервуарах (рис. 2 а, б) резервуари, що не горять, знаходяться в однакових умовах, якщо не враховувати вітер.

Основною небезпекою нагріву сусідніх резервуарів є досягнення їх стінками або покрівлею температури самоспалахування парів рідини, що зберігається в резервуарі. Розв'язання системи диференціальних рівнянь (1)–(2) з відповідними крайовими і початковими умовами дозволяє визначити розподіл температури по поверхні резервуара в довільний момент часу. Це, в свою чергу, дає можливість оцінити час досягнення сталого оболонкою резервуара

небезпечних значень температури. Для бензину температура самоспалахування знаходиться в діапазоні $(246 \div 280)^\circ\text{C}$, для зимового дизельного пального – $(210 \div 260)^\circ\text{C}$, для літнього – $(250 \div 300)^\circ\text{C}$ [18].

На рис. 3 для випадку горіння одного резервуара в резервуарній групі з чотирьох резервуарів РВС-10000 (діаметр 28,5 м, висота 18 м) з бензином (рис. 2а) показано час, через який температурою стінки або покрівлі резервуара 2 буде досягнуто значення 250°C в залежності від напрямку і швидкості вітру. Система координат обрана таким чином, що кут $\gamma=0$ відповідає напрямку вітру від резервуара 1 до резервуара 2, додатнім значенням кута відповідає рух проти годинникової стрілки, а від'ємним – за годинниковою. Припускалося, що всі резервуари заповнені до рівня 15 м, ступінь чорноти резервуара прийнято 0,8, відстань між сусідніми резервуарами – 30 м.

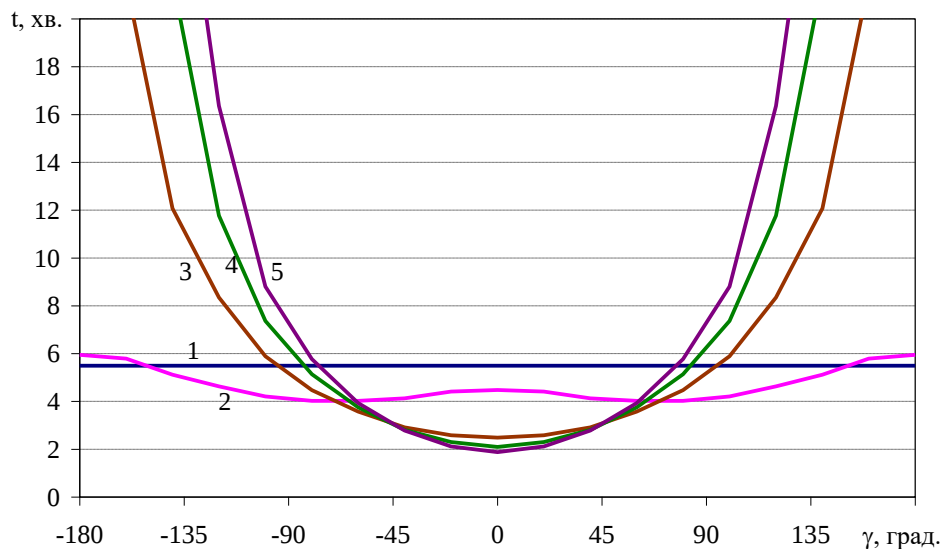


Рисунок 3 – Час досягнення температурою стінки або покрівлі резервуара РВС-10000 величини 250°C при пожежі в сусідньому резервуарі з бензином в залежності від кута напрямку вітру і його швидкості: 1 – $w=0$; 2 – $w=2$ м/с; 3 – $w=4$ м/с; 4 – $w=6$ м/с; 5 – $w=8$ м/с

Аналіз графічних залежностей на рис. 3 свідчить, що наявність невеликого вітру (2 м/с), який не нахиляє полум'я, призводить до підвищення щільності теплового потоку від пожежі і зменшенню часу досягнення сусіднім резервуаром критичного значення температури. Це має місце для будь-якого напрямку вітру, окрім

невеликого діапазону кутів, коли вітер направлений в бік, протилежний резервуару 2. Вплив напрямку вітру збільшується із зростанням його швидкості: для швидкостей вітру $w=(4 \div 8)$ м/с час досягнення критичного значення температури зменшується майже втричі за умови, якщо вітер направлений від

резервуара 1 до резервуара 2. Для протилежного напрямку вітру критичне значення температури резервуаром 2 не досягається. На рис. 4 наведено час

досягнення того ж самого значення температури, але в умовах горіння в двох сусідніх резервуарах (рис. 2б).

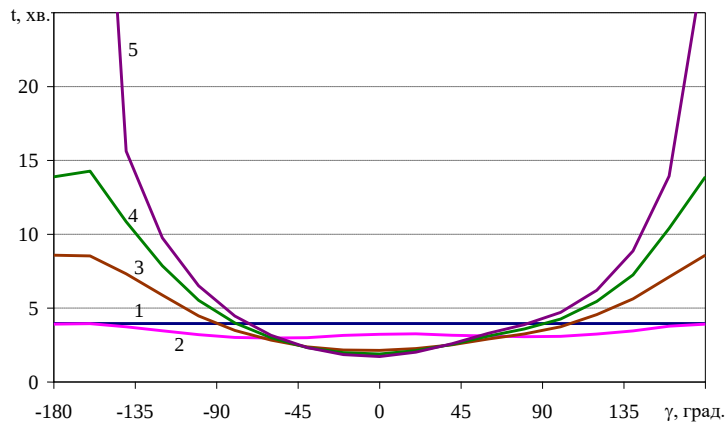


Рисунок 4 – Час досягнення температурою стінки або покрівлі резервуара РВС-10000 величини 250 °С при пожежі в двох сусідніх резервуарах з бензином в залежності від кута напрямку вітру і його швидкості: 1 – $w=0$; 2 – $w=2$ м/с; 3 – $w=4$ м/с; 4 – $w=6$ м/с; 5 – $w=8$ м/с

Як і для випадку горіння одного резервуара, при горінні двох резервуарів найгіршою є ситуація, коли вітер нахилиє полум'я і направлений від резервуара 1 до резервуара 2. Але на відміну від рис. 3 мінімум на рис. 4 не настільки чіткий. При цьому для найгіршого напрямку вітру ($\gamma=0$) час досягнення критичного значення

температури приблизно однаковий як при пожежі лише в резервуарі 1, так і при одночасній пожежі в резервуарах 1 і 3.

Інший варіант пожежі в двох резервуарах резервуарної групи з чотирьох резервуарів (рис. 2в) проілюстровано на рис. 5.

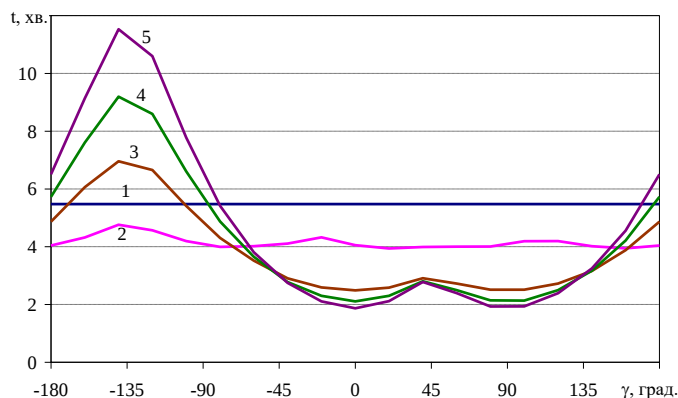


Рисунок 5 – Час досягнення температурою стінки або покрівлі резервуара РВС-10000 величини 250 °С при пожежі в двох діагонально розташованих резервуарах з бензином в залежності від кута напрямку вітру і його швидкості: 1 – $w=0$; 2 – $w=2$ м/с; 3 – $w=4$ м/с; 4 – $w=6$ м/с; 5 – $w=8$ м/с

Аналіз графічних залежностей на рис 5 свідчить, що найнебезпечнішими є ситуації, коли вітер нахилиє полум'я і направлений від резервуара 1 до резервуара 2 або від резервуара 4 до резервуара 1. При таких напрямках вітру час досягнення резервуаром 2 небезпечної

температури приблизно співпадає з відповідним часом при пожежі лише в одному резервуарі (рис. 3). Найгірший випадок – одночасне горіння в трьох резервуарах резервуарної групи (рис. 2г) – наведено на рис. 6.

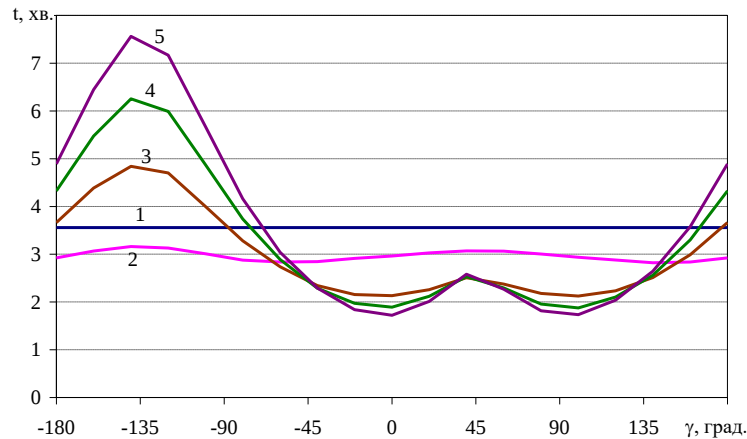


Рисунок 6 – Час досягнення температурою стінки або покрівлі резервуара РВС-10000 величини 250 °С при пожежі в трьох резервуарах резервуарної групи з бензином в залежності від кута напрямку вітру і його швидкості: 1 – $w=0$; 2 – $w=2$ м/с; 3 – $w=4$ м/с; 4 – $w=6$ м/с; 5 – $w=8$ м/с

Порівняння графічних залежностей на рис. 5 і рис 6 свідчить, що вони є подібними, але час досягнення резервуаром 2 критичних значень температури при горінні 3-х резервуарів є в середньому на 20% меншим порівняно з випадком горіння резервуарів 1 і 4 (рис. 5).

Висновки та напрями подальших досліджень. Побудовано модель нагріву стінки і покрівлі вертикального сталевго резервуара з нафтопродуктом в умовах пожежі в кількох сусідніх резервуарах. Модель спирається на рівняння теплового балансу для стінки і покрівлі резервуара і враховує променевий теплообмін з пожежею і променевий і конвекційний теплообмін з навколишнім середовищем і внутрішнім простором резервуара. Визначено можливі сценарії пожежі в резервуарній групі з чотирьох резервуарів. На прикладі пожежі в резервуарній групі з чотирьох РВС-10000 з бензином, показано, що наявність невеликого вітру (до 2 м/с) призводить до збільшення теплового потоку від пожежі в

бік резервуара, навіть коли напрямок вітру не співпадає з напрямом на резервуар, що нагрівається. При більших швидкостях вітру (понад 4 м/с) має місце збільшення теплового потоку і скорочення часу досягнення температурою стінки або покрівлі резервуара небезпечного значення, якщо вітер направлений на резервуар, що нагрівається. При горінні двох резервуарів з групи більш небезпечною є ситуація з горінням двох діагонально розташованих резервуарів. Тепловий вплив пожежі в трьох резервуарах з групи є подібним до теплового впливу пожежі в двох діагонально розташованих резервуарах, але час досягнення резервуаром, що не горить, критичних значень температури є в середньому на 20% меншим. Побудована модель може бути використана для визначення частин стінки і покрівлі резервуара, які підлягають охолодженню, а також визначення граничного часу початку подачі води на охолодження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами. НАПБ 05.035 – 2004.
2. Кодекс цивільного захисту України. 2012. Url: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text>
3. Paula H. M. Insights from 595 tank farm fires from around the world. Process Safety and Environmental Protection. 2023. Vol. 171. P. 773–782. doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.058>
4. 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: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104957>

5. Su M., Wei L., Zhou S., Yang G., Wang R., Duo Y., Chen S., Sun M., Li J., Kong X. Study on Dynamic Probability and Quantitative Risk Calculation Method of Domino Accident in Pool Fire in Chemical Storage Tank Area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19 (24). P. 16483. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph192416483>
6. Malik A. A., Nasif M. S., Arshad U., Mokhtar A. A., Tohir M. Z. M., Al-Waked R. Predictive Modelling of Wind-Influenced Dynamic Fire Spread Probability in Tank Farm Due to Domino Effect by Integrating Numerical Simulation with ANN. *Fire*. 2023. Vol. 6 (3). P. 85. doi: <https://doi.org/10.3390/fire6030085>
7. Elhelw M., El-Shobaky A., Attia A., El-Maghlany W. M. Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 146. P. 670–685. doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.002>
8. Yang J., Zhang B., Chen L., Diao X., Hu Y., Suo G., Li R., Wang Q., Li J., Zhang J., Dou Z. Improved solid radiation model for thermal response in large crude oil tanks. *Energy*. 2023. Vol. 284. P. 128572. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128572>
Басманов О. Є., Карпова Д. І., Гарбуз С. В., Бенедюк В. С., Зазимко О. В. Моделювання теплового потоку від резервуарів з нафтопродуктами, що горять. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2025. № 1 (41). С. 32–49. doi: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2025-41-2>
9. Zhang F., Zhang M., Tan X., Yang J., Zhu J. Modeling failure time of atmospheric tanks with safety barriers under multiple pool fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2025. Vol. 96. P. 105619. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105619>
10. Xiao S., Mo L., Tan X., Zeng T., Wang H., Yang G., Wei L., Chen C. Thermodynamic failure analysis of HAZMAT tanks exposed to multiple fires: The role of stored liquid. *Applied Thermal Engineering*. 2025. Vol. 264. P. 125485. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125485>
11. Li Y., Jiang J., Yu Y., Wang Z., Xing Z., Zhang Q. Thermal buckling of oil-filled fixed-roof tanks subjected to heat radiation by a burning tank. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 138. P. 106393. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106393>
12. Басманов О. Є., Карпова Д. І., Гарбуз С. В., Володченко М. А. Модель нагріву резервуара з нафтопродуктом під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2025. № 1(19). С. 109–119. doi: [https://doi.org/10.33269/nvz.2025.1\(19\).109-119](https://doi.org/10.33269/nvz.2025.1(19).109-119)
13. Espinosa S. N., Jaca R. C., Godoy L. A. Thermal effects of fire on a nearby fuel storage tank. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 62. P. 103990. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103990>
14. Santos F. d. S., Landesmann A. Thermal performance-based analysis of minimum safe distances between fuel storage tanks exposed to fire. *Fire Safety Journal*. 2014. Vol. 69. P. 57–68. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.08.010>
15. ВБН В.2.2-58.1-94. Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. 1994. Url: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/pdf/proektuvannya_skladiv_nafti_i_na-3-464085.pdf
16. Oliinyk V., Basmanov O., Shevchenko O., Khmyrova A., Rushchak I. Building a model of choosing water supply rate to cool a tank in the case of a fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 1/10 (133). P. 45–51. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.323197>
17. ASTM D975 – Standard Specification for Diesel Fuel Oils. 2022.

REFERENCES

1. Instructions for extinguishing fires in tanks with oil and petroleum products. NAPB 05.035 – 2004 [in English]
2. Civil Protection Code of Ukraine. 2012. Url: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text>
3. Paula, H. M. (2023). Insights from 595 tank farm fires from around the world. *Process Safety and Environmental Protection*, 171, 773–782. doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.058> [in English]
4. 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: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104957> [in English]
5. Su, M., Wei, L., Zhou, S., Yang, G., Wang, R., Duo, Y., Chen, S., Sun, M., Li, J., & Kong, X. (2022). Study on Dynamic Probability and Quantitative Risk Calculation Method of Domino Accident in Pool Fire in Chemical Storage Tank Area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19 (24), 16483. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph192416483> [in English]
6. Malik, A. A., Nasif, M. S., Arshad, U., Mokhtar, A. A., Tohir, M. Z. M., & Al-Waked, R. (2023). Predictive Modelling of Wind-Influenced Dynamic Fire Spread Probability in Tank Farm Due to Domino Effect by Integrating Numerical Simulation with ANN. *Fire*, 6 (3), 85. doi: <https://doi.org/10.3390/fire6030085> [in English]
7. Elhelw, M., El-Shobaky, A., Attia, A., & El-Maghlany, W. M. (2021). Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 670–685. doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.002> [in English]
8. Yang, J., Zhang, B., Chen, L., Diao, X., Hu, Y., Suo, G., Li, R., Wang, Q., Li, J., Zhang, J., & Dou, Z. (2023). Improved solid radiation model for thermal response in large crude oil tanks. *Energy*, 284, 128572. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128572> [in English]
9. Basmanov, O., Karpova, D., Morshch, E., Harbuz, S., Benediuk, V., & Zazymko, O. (2025). Modeling of heat flow from burning oil tanks. *Problems of Emergency Situations*, (41), 32–49. doi: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2025-41-2>
10. Zhang, F., Zhang, M., Tan, X., Yang, J., & Zhu, J. (2025). Modeling failure time of atmospheric tanks with safety barriers under multiple pool fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 96, 105619. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105619> [in English]

11. Xiao, S., Mo, L., Tan, X., Zeng, T., Wang, H., Yang, G., Wei, L., & Chen, C. (2025). Thermodynamic failure analysis of HAZMAT tanks exposed to multiple fires: The role of stored liquid. *Applied Thermal Engineering*, 264, 125485. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125485> [in English]
12. Li, Y., Jiang, J., Yu, Y., Wang, Z., Xing, Z., & Zhang, Q. (2022). Thermal buckling of oil-filled fixed-roof tanks subjected to heat radiation by a burning tank. *Engineering Failure Analysis*, 138, 106393. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106393> [in English]
13. Basmanov, O., Karpova, D., Harbuz, S., & Volodchenko, M. (2025). Model of heating an oil tank under the thermal influence of a fire in an adjacent tank. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 1(19), 109–119. doi: [https://doi.org/10.33269/nvcs.2025.1\(19\).109-119](https://doi.org/10.33269/nvcs.2025.1(19).109-119)
14. Espinosa, S. N., Jaca, R. C., & Godoy, L. A. (2019). Thermal effects of fire on a nearby fuel storage tank. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 62, 103990. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103990> [in English]
15. Santos, F. d. S., & Landesmann, A. (2014). Thermal performance-based analysis of minimum safe distances between fuel storage tanks exposed to fire. *Fire Safety Journal*, 69, 57–68. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.08.010> [in English]
16. VBN V.2.2-58.1-94. Design of oil and oil product storage facilities with saturated vapor pressure not higher than 93.3 kPa. 1994. Url: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/pdf/proektuvannya_skladiv_nafti_i_na-3-464085.pdf
17. Oliinyk, V., Basmanov, O., Shevchenko, O., Khmyrova, A., & Rushchak, I. (2025). Building a model of choosing water supply rate to cool a tank in the case of a fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/10 (133), 45–51. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.323197>
18. ASTM D975 – Standard Specification for Diesel Fuel Oils. 2022.[in English]

MODELING THE HEATING OF AN OIL PRODUCT TANK UNDER FIRE EXPOSURE FROM ADJACENT TANKS IN A TANK GROUP

O. Basmanov¹, D. Karpova², V. Benediuk¹, O. Zazymko¹, V. Zabarovskiy³

¹*Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine*

²*National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine*

³*2 State Fire and Rescue Squad of the Main Directorate of the State Emergency Service of Ukraine, Ukraine*

KEYWORDS

tank fire, heat balance equation, radiation heat transfer, convection.

ANNOTATION

The object of this study is the thermal processes occurring in a vertical steel tank containing petroleum products under the thermal influence of fires in several neighboring tanks within a tank group. To determine the temperature distribution over the tank surface and to calculate the time required for the wall or roof to reach the autoignition temperature of the stored liquid, the heat balance equations for the tank wall and roof were applied. The model accounts for radiative heat transfer from the fire, as well as radiative and convective heat exchange with the environment and the internal space of the tank. The radiating flame surface is modeled as a conical surface whose base expands leeward, and whose axis tilts when the wind speed exceeds a certain threshold. Fire scenarios involving a tank group of four identical tanks are considered. Using the example of RVS-10000 gasoline tanks, it is shown that a moderate wind speed – insufficient to tilt the flame axis – increases the heat flux to the tank and reduces the time required to reach hazardous temperature levels, even when the wind direction does not coincide with the direction from the fire to the target tank. In particular, at a wind speed of 2 m/s, the time to reach the autoignition temperature of gasoline vapors decreases by approximately 1.5 times compared to the calm conditions. At wind speeds sufficient to tilt the flame axis, the time to reach hazardous temperatures is significantly reduced if the wind tilts the flame toward the heated tank. At wind speeds above 4 m/s, this time decreases by 2–3 times. It is shown that when two tanks in a group are burning, the scenario in which the two burning tanks are located diagonally is more dangerous. The thermal impact of fires in three tanks is similar to that of two diagonally burning tanks, but the time for the remaining tank to reach critical temperatures is on average 20% shorter. The developed model can be used to identify the parts of the tank wall and roof that require cooling and to determine the maximum allowable time before initiating water cooling