

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)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ НА РЕЗЕРВУАР З НАФТОПРОДУКТОМ В УМОВАХ ВІТРУ

Розглянуто прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій, обумовлених пожежею вертикального сталевих резервуара з нафтопродуктом в резервуарній групі в умовах вітру. Побудовано модель нагріву стінки резервуара з нафтопродуктом під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі. Запропонована модель враховує променевий теплообмін (з факелом, навколишнім середовищем і внутрішнім простором резервуара), конвекційний теплообмін (з навколишнім повітрям в режимі вимушеної конвекції і з пароповітряною сумішшю в газовому просторі в режимі вільної конвекції). Модель являє собою диференціальне рівняння, що описує процес передачі тепла всередині стінки резервуара, з крайовими умовами на зовнішній і внутрішній поверхнях стінки. Нахил факела вітром в напрямку сусіднього резервуара призводить до збільшення коефіцієнта взаємного опромінення між факелом і верхнім краєм стінки сусіднього резервуара. При цьому, коефіцієнт взаємного опромінення монотонно зростає із збільшенням швидкості вітру. Показано, що для вертикальних сталевих резервуарів, місткістю до 20000 м³ включно, в безрозмірних координатах коефіцієнт опромінення залежить лише від типу рідини, що горить. Шляхом використання методів теорії подібності в роботі отримано оцінку коефіцієнта конвекційного теплообміну в умовах вимушеної конвекції на зовнішній поверхні стінки резервуара. Із застосуванням методу скінчених різниць до рівняння теплового балансу знайдено розподіл температур по стінці резервуара в довільний момент часу, що дозволяє визначити область на поверхні стінки, що нагрівається до небезпечних значень температури. Вітер в бік резервуара, що нагрівається, істотно підвищує небезпеку розповсюдження пожежі. У випадку пожежі в резервуарі з нафтою і швидкістю вітру 5 м/с температура стінки сусіднього резервуара досягає величини 250 °С вже через 5 хв.

Ключові слова: пожежа в резервуарі, тепловий вплив пожежі, променевий теплообмін, конвекційний теплообмін

1. Вступ

Резервуарні парки є основним місцем зберігання нафти і нафтопродуктів в процесі їх зберігання і транспортування. Найбільш поширеним типом резервуарів є вертикальні сталеві резервуари (РВС) зі стаціонарною покрівлею (з понтоном, або без понтона).

Одними із найнебезпечніших надзвичайних ситуацій, що виникають в резервуарних парках, є ситуації, пов'язані з пожежами нафтопродуктів. Причиною пожежі може бути як технологічний збій, наприклад, переповнення резервуара під час його заповнення, так, і самоспалахування відкладень сульфідів [1]. Особливу небезпеку складає розповсюдження пожежі на сусідні об'єкти, зокрема на резервуари з нафтопродуктами.

Такі пожежі носять затяжний характер і призводять як до значних матеріальних збитків, так, і людських втрат [2]. Причиною каскадного поширення пожежі є тепловий вплив на сталеві конструкції, що призводить не лише до втрати ними міцності [3], а й до перетворення їх у джерело запалення, якщо їх температура досягає температури самоспалахування горючої рідини.

Якщо концентрація парів нафтопродукту в газовому просторі резервуара знаходиться між нижньою і верхньою концентраційними межами розповсюдження полум'я, то наявність такого джерела запалення призводить до вибуху паропо-

вітряної суміші. Якщо ж концентрація парів перевищує верхню концентраційну межу, то виникає горіння парів на виході із дихальних отворів.

Окрім завдання збитків технологічним об'єктам і природним ландшафтам [4], це призводить до викиду забруднюючих речовин в атмосферу [5]. Розповсюджуючись на великі відстані, вони істотно впливають на стан повітря і створюють ризики для населення [6].

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

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [7] наведено результати теоретичного і експериментального дослідження структури факела над резервуаром з нафтою, що горить. Зокрема, визначено висоту полум'я і умови, при яких факели над двома резервуарами можуть з'єднуватися в один. Але тепловий вплив пожежі на інші об'єкти резервуарного парку в роботі не розглядається.

В [8] на основі експериментальних досліджень з горіння n-гептану, дизеля, гасу і бензину побудовано модель швидкості вигорання рідини в нестационарних умовах. Але тепловий вплив пожежі на навколишні об'єкти в роботі не розглядається. В [9] за допомогою середовища моделювання динаміки пожежі (FDS) розглянуто горіння розливу і його вплив на сусідній резервуар. Визначено зони безпечного розташування сил та засобів, що задіяні у ліквідації пожежі. До недоліків слід віднести неможливість узагальнення отриманих результатів.

В [10] досліджується тепловий вплив пожежі в резервуарі з нафтопродуктом на сусідній резервуар. Розглянуто рівняння теплопровідності всередині стінки резервуара, з крайовими умовами третього роду, що описують променевий теплообмін з факелом пожежі і розігрітими стінками резервуара, що горить. Але конвекційна складова теплообміну в роботі не розглянута.

В [11] розглянуто двозонну модель полум'я: нижня високотемпературна частина полум'я і низькотемпературна верхня частина. Побудовано модель теплового впливу на сусідній резервуар з нафтопродуктом, але не враховано різні температури на зовнішній і внутрішній поверхнях стінки резервуара.

В [12] досліджено вплив пульсацій полум'я на тепловий потік і міцність сталевих конструкцій резервуара, що нагрівається. Але безпеку досягнення температури самоспалахування парів нафтопродукту в роботі не розглянуто.

В [13] проведено порівняння теплового впливу пожежі в резервуарі і пожежі в обвалуванні на сусідній резервуар і зроблено висновок про більшу безпеку горіння в обвалуванні. Але вплив вітру в роботі не розглянуто. В [14] побудовано модель теплового впливу пожежі розливу горючої рідини в обвалуванні на резервуар з нафтопродуктом, але випадок горіння рідини в резервуарі залишено поза увагою.

В [15] побудовано модель нагріву резервуара від пожежі розливу, яка враховує нагрів стінки резервуара під впливом випромінювання пожежі, охолодження зовнішньої і внутрішньої поверхонь стінки за рахунок конвекції, охолодження внаслідок теплового випромінювання в навколишнє середовище. Але вплив вітру на зміну форми факела і збільшення інтенсивності охолодження внаслідок вимушеної конвекції в роботі не розглянуто.

В [16] побудовано модель теплового балансу в стінці резервуара, що нагрівається від пожежі в сусідньому резервуарі з нафтопродуктом. Модель додатково враховує нерівномірність нагріву внутрішньої і зовнішньої поверхонь стінки. Але

і в цьому випадку розглядається лише випадок відсутності вітру.

Аналіз моделей теплового впливу пожежі нафтопродукту в резервуарі на сусідні резервуари засвідчив, що вплив вітру враховано недостатньо. Це, в свою чергу, може призводити до похибки в оцінці наслідків теплового впливу пожежі на сусідні резервуари.

Таким чином, не вирішеною частиною проблеми розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок теплового потоку до них є недостатнє врахування впливу вітру на тепловий потік від факела.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є прогнозування наслідків надзвичайної ситуації, обумовленої пожежею горючої рідини в вертикальному сталевому резервуарі, шляхом побудови математичної моделі теплового впливу пожежі на сусідні резервуари, яка враховує наявність вітру.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- оцінити значення коефіцієнта взаємного опромінення факела і точки на стінці резервуара за умови зміни форми факела під впливом вітру;
- оцінити значення коефіцієнта конвекційного теплообміну між стінкою резервуара і зовнішнім повітряним середовищем в умовах вимушеної конвекції;
- розв'язати рівняння теплового балансу для стінки резервуара.

4. Побудова моделі нагріву стінки резервуара під тепловим впливом пожежі

4.1. Побудова оцінки коефіцієнта взаємного опромінення в умовах вітрового впливу

Розташуємо систему координат таким чином, щоб вісь X перетинала вісі обох резервуарів, вісь Z співпадала з віссю резервуара, що горить, а початок координат знаходився на висоті резервуара, що горить (рис. 1). Тоді, вісь резервуара, що не горить, буде перетинати вісь X у точці x_0 .

Коефіцієнт взаємного опромінення між довільною точкою і випромінюючою поверхнею полум'я визначається формулою:

$$\varphi = \frac{1}{\pi} \iint_S \frac{\cos \psi_1 \cos \psi_2}{r^2} dS,$$

де ψ_1 – кут між нормальним вектором до поверхні факела \vec{n}_1 і радіус-вектором \vec{r} , що з'єднує точку на поверхні факела і точку на стінці резервуара; ψ_2 – кут між нормальним вектором до поверхні резервуара \vec{n}_2 і радіус-вектором \vec{r} (рис. 1). При цьому інтеграл обчислюється лише по тій частині поверхні факела, яка видна із даної точки на стінці резервуара (тобто $\cos \psi_1 > 0$, $\cos \psi_2 > 0$).

Численні експериментальні дані свідчать [17], що наявність вітру призводить до нахилу факела, зберігаючи його довжину. Отже, виходячи із припущення про кінчну форму факела за відсутності вітру [16] запишемо рівняння випромінюючої поверхні факела в параметричному вигляді:

$$\begin{cases} x_1 = u \cos v + c(R_f - u) \sin \beta \cos \gamma; \\ y_1 = u \sin v + c(R_f - u) \sin \beta \sin \gamma; \\ z_1 = c(R_f - u) \cos \beta; \\ 0 \leq u \leq R_f, 0 \leq v \leq 2\pi, \end{cases}$$

де β – кут нахилу полум'я відносно вертикальної вісі, а напрямок вектора $(\cos \gamma, \sin \gamma)$ співпадає з напрямком вітру; R_f – радіус резервуара.

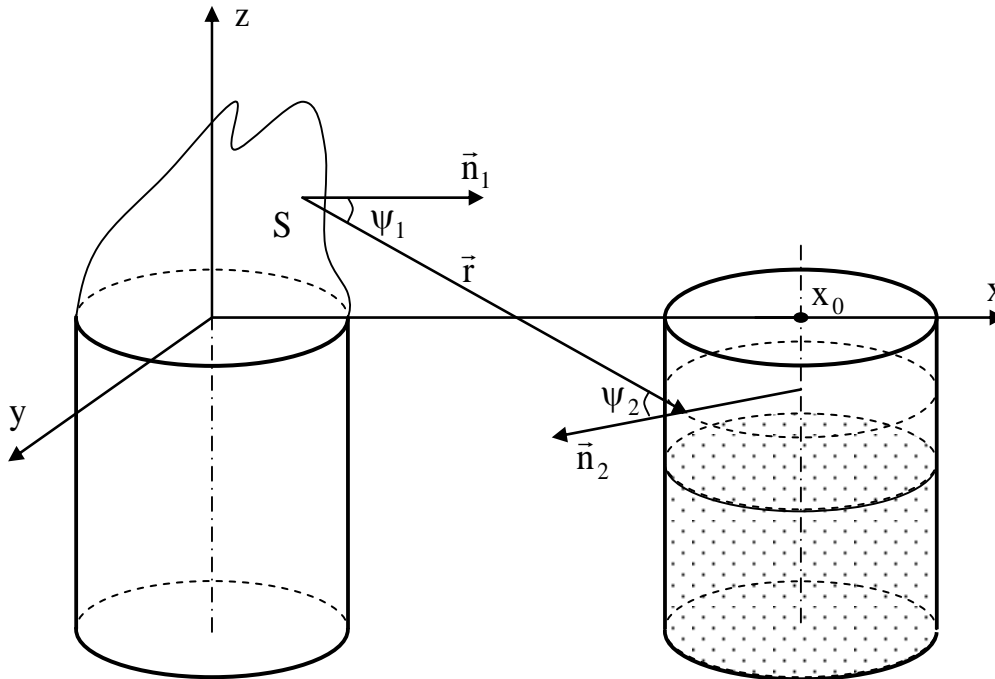


Рис. 1. Обчислення коефіцієнта взаємного опромінення між факелом і точкою на стіні резервуара

При цьому кут нахилу полум'я може бути апроксимований залежністю:

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{w}{2},$$

де w – швидкість вітру.

Обчислимо частинні похідні до функцій, що описують поверхню факела у параметричному вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_1}{\partial u} &= \cos v - c \sin \beta \cos \gamma; & \frac{\partial x_1}{\partial v} &= -u \sin v; \\ \frac{\partial y_1}{\partial u} &= \sin v - c \sin \beta \sin \gamma; & \frac{\partial y_1}{\partial v} &= u \cos v; \\ \frac{\partial z_1}{\partial u} &= -c \cos \beta; & \frac{\partial z_1}{\partial v} &= 0, \end{aligned}$$

де враховано припущення про тотожність резервуара, що горить, і резервуара, що нагрівається: $R_f = R$.

Тоді коефіцієнти А, В, С [16] набудуть вигляду:

$$A = \frac{\partial y_1}{\partial u} \frac{\partial z_1}{\partial v} - \frac{\partial z_1}{\partial u} \frac{\partial y_1}{\partial v} = c u \cos v \cos \beta;$$

$$B = \frac{\partial z_1}{\partial u} \frac{\partial x_1}{\partial v} - \frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial z_1}{\partial v} = c u \sin v \cos \beta;$$

$$C = \frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial y_1}{\partial v} - \frac{\partial y_1}{\partial u} \frac{\partial x_1}{\partial v} = u - u c \sin \beta \cos(v - \gamma).$$

Позначимо:

$$\tilde{x}_1 = \frac{x_1}{R} = s \cos v + c(1-s) \sin \beta \cos \gamma;$$

$$\tilde{y}_1 = \frac{y_1}{R} = s \sin v + c(1-s) \sin \beta \sin \gamma;$$

$$\tilde{z}_1 = \frac{z}{R} = c(1-s) \cos \beta;$$

$$\tilde{A} = \frac{A}{R} = c s \cos v \cos \beta;$$

$$\tilde{B} = \frac{B}{R} = c s \sin v \cos \beta;$$

$$\tilde{C} = \frac{C}{R} = s - s c \sin \beta \cos(v - \gamma),$$

де $s = \frac{u}{R}$.

Тоді коефіцієнт взаємного опромінення набуде вигляду:

$$\varphi = \frac{1}{\pi} \int_0^R \int_0^{2\pi} \frac{R^2 \tilde{A}(x_0/R + \cos \alpha - \tilde{x}_1) + R^2 \tilde{B}(\sin \alpha - \tilde{y}_1) + R^2 \tilde{C}(z/R - \tilde{z}_1)}{R^4 \left[(\tilde{x}_1 - x_0/R - \cos \alpha)^2 + (\tilde{y}_1 - \sin \alpha)^2 + (\tilde{z}_1 - z/R)^2 \right]^{3/2}} \times$$

$$\times \left[(\tilde{x}_1 - x_0/R) \cos \alpha + \tilde{y}_1 \sin \alpha - 1 \right] R^2 d(u/R) dv =$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^1 ds \int_0^{2\pi} dv \frac{\tilde{A}(x_0/R + \cos \alpha - \tilde{x}_1) + \tilde{B}(\sin \alpha - \tilde{y}_1) + \tilde{C}(z/R - \tilde{z}_1)}{\left[(\tilde{x}_1 - x_0/R - \cos \alpha)^2 + (\tilde{y}_1 - \sin \alpha)^2 + (\tilde{z}_1 - z/R)^2 \right]^{3/2}} \times$$

$$\times \left[(\tilde{x}_1 - x_0/R) \cos \alpha + \tilde{y}_1 \sin \alpha - 1 \right], \quad (1)$$

де інтегрування проводиться лише по тим точкам (s, v) , в яких обидва множники в чисельнику є додатними:

$$\tilde{A}(x_0/R + \cos \alpha - \tilde{x}_1) + \tilde{B}(\sin \alpha - \tilde{y}_1) + \tilde{C}(z/R - \tilde{z}_1) > 0;$$

$$(\tilde{x}_1 - x_0/R) \cos \alpha + \tilde{y}_1 \sin \alpha - 1 > 0.$$

Аналіз виразу (1) показує, що максимальна температура досягається на верхньому краї стінки резервуара $(z=0)$. На рис. 2 показано залежність розподілу кое-

фіцієнту взаємного опромінення по верхньому краю стінки резервуара від швидкості вітру за умови пожежі горючої рідини і вітру, який нахилляє факел в бік резервуара, що розглядається ($\gamma=0$).

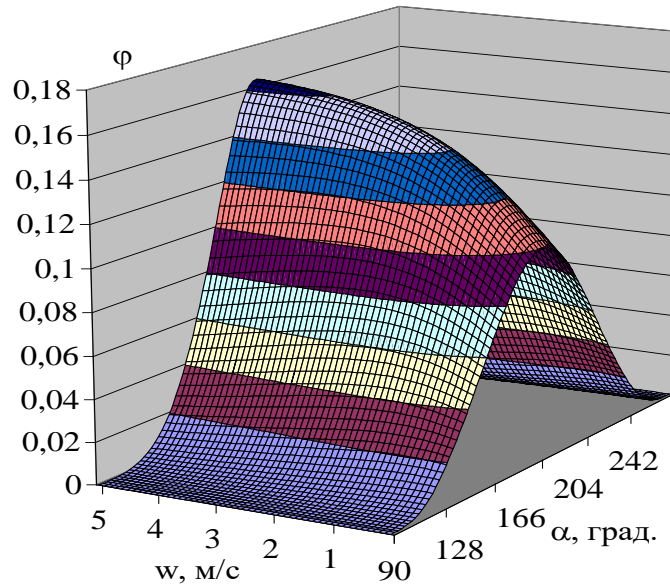


Рис. 2. Розподіл коефіцієнта взаємного опромінення по верхньому краю стінки підвітряного резервуара в залежності від швидкості вітру при горінні сусіднього резервуара с горючою рідиною

На рис. 3 проілюстровано залежність коефіцієнта взаємного опромінення для точки на верхньому краю стінки резервуара у випадку горіння легкозаймистої рідини.

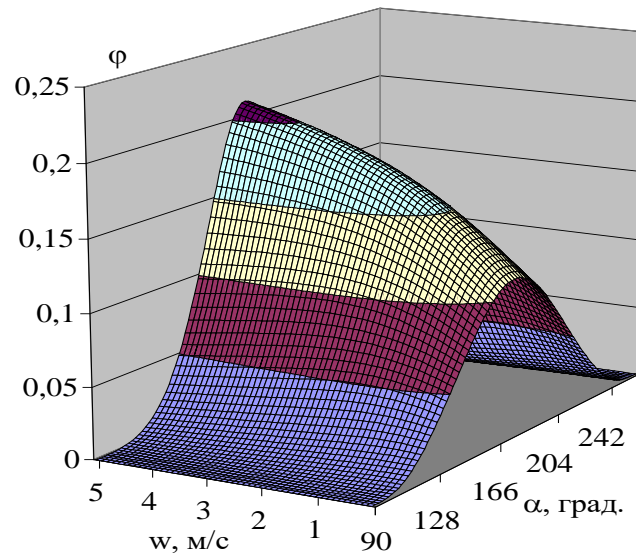


Рис. 3. Розподіл коефіцієнта взаємного опромінення по верхньому краю стінки підвітряного резервуара в залежності від швидкості вітру при горінні сусіднього резервуара с легкозаймистою рідиною

Залежність коефіцієнта взаємного опромінення на верхньому краю стінки резервуара від напрямку вітру проілюстровано на рис. 4 (горюча рідина) і на рис. 5 (легкозаймиста рідина). В обох випадках швидкість вітру була прийнята $w=2$ м/с.

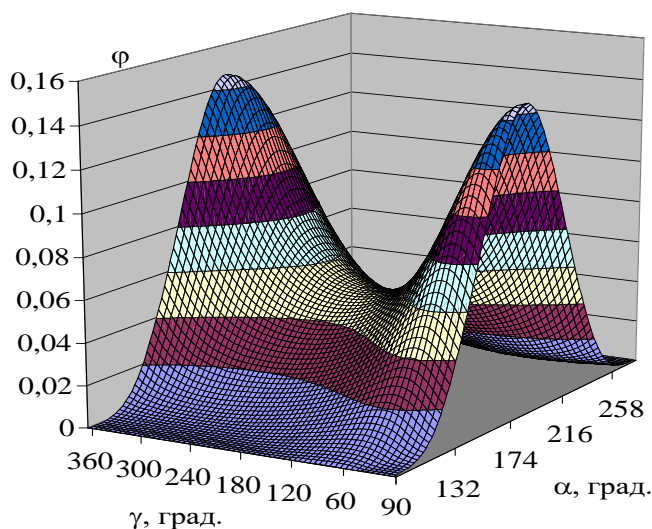


Рис. 4. Розподіл коефіцієнта взаємного опромінення по верхньому краю стінки резервуара в залежності від напрямку вітру при горінні сусіднього резервуара с горючою рідиною

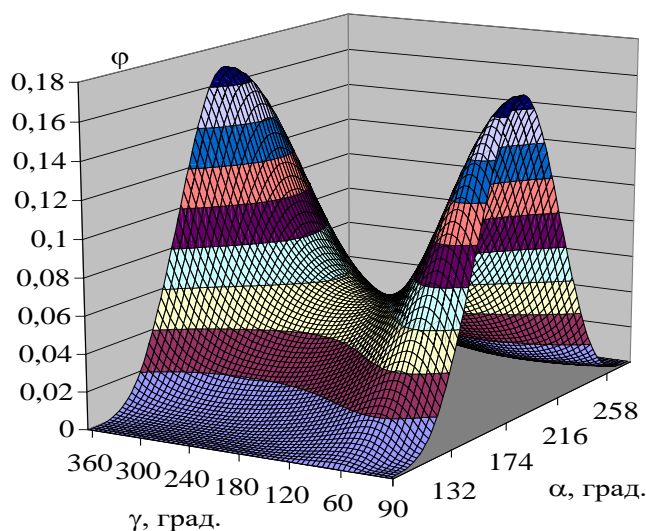


Рис. 5. Розподіл коефіцієнта взаємного опромінення по верхньому краю стінки резервуара в залежності від напрямку вітру при горінні сусіднього резервуара с легкозаймистою рідиною

Аналіз графічних залежностей, наведених на рис. 4–5, свідчить, що коефіцієнт взаємного опромінення досягає максимального значення, коли вітер направлений від резервуара, що горить, до сусіднього ($\gamma=0$).

Мінімального значення, коли вітер направлений в протилежному напрямку від резервуара, що горить, до сусіднього ($\gamma=180^\circ$).

4.2. Побудова оцінки коефіцієнта конвекційного теплообміну

Характер обтікання резервуара вітровим потоком визначається значенням числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{w_f D}{\nu},$$

де w_f – швидкість вітру; D – діаметр резервуара; ν – кінематична в'язкість повітря. Для резервуарів РВС-700 і більше (діаметром $D \geq 10$ м) і швидкості вітру $w \geq 1$ м/с

значення числа Рейнольдса $Re \geq 6 \cdot 10^5$, що відповідає турбулентному режиму обтікання.

Для вказаного діапазону значень числа Рейнольда усереднене за периметром окружності резервуара значення числа Нусельта описується залежністю:

$$\overline{Nu} = 0,3 + \frac{0,62 Re^{0,5} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{2,82 \cdot 10^5}\right)^{5/8}\right]^{4/5}.$$

Тоді, середнє за периметром значення коефіцієнту конвекційної тепловіддачі набуде вигляду:

$$\overline{\alpha}_{out} = \frac{\lambda_f}{D} \left[0,3 + \frac{0,62 Re^{0,5} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{2,82 \cdot 10^5}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \right]. \quad (2)$$

В [18] показано, що в діапазоні температур $T = (273 \div 1273)$ К залежність (2) може бути апроксимована виразом:

$$\overline{\alpha}_{out} = 198 T_f^{-0,7655} w_f^{0,9227} D^{-0,0773}. \quad (3)$$

Аналіз виразу (3) показує, що коефіцієнт конвекційної тепловіддачі майже лінійно зростає зі збільшенням швидкості вітру, зменшується при збільшенні температури повітряного потоку і слабо залежить від діаметру резервуара: збільшення діаметра резервуара з 10 м до 60 м призводить до зменшення коефіцієнта тепловіддачі лише на 15 %.

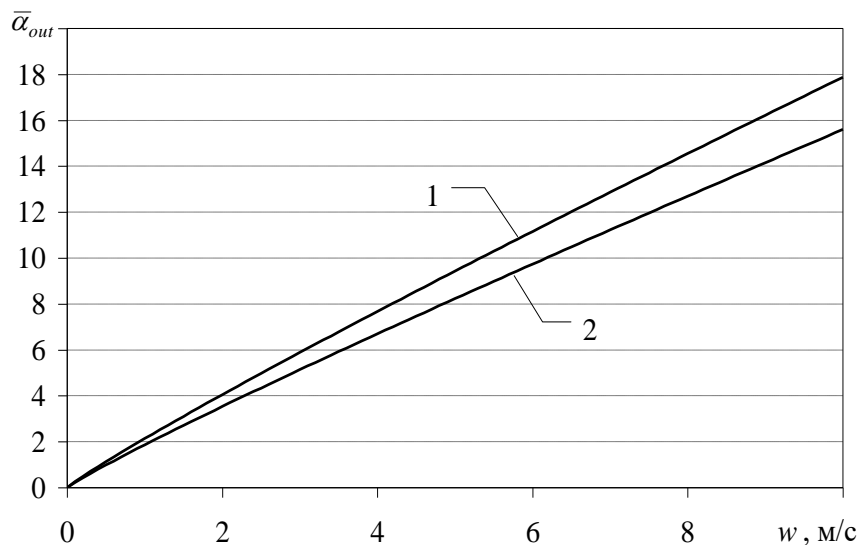


Рис. 6. Залежність середнього значення коефіцієнта конвекційного теплообміну від швидкості вітру: 1 – РВС-1000; 2 – РВС-50000

В якості приклада на рис. 6 наведено залежність середнього значення коефіцієнта конвекційної тепловіддачі від швидкості вітру для резервуарів РВС-1000 ($D=10,4$ м) і РВС-50000 ($D=60,7$ м).

Порівняння коефіцієнтів вільної конвекції показує, що при швидкості вітру понад 5 м/с коефіцієнт конвекційного теплообміну вимушеної конвекції перевищує відповідний коефіцієнт вільної конвекції. А в діапазоні температур стінки резервуара $T \leq 250$ °С і діапазоні швидкості вітру $w \leq 5$ м/с коефіцієнт конвекційного теплообміну не перевищує 9 Вт/м² К.

Значення локального коефіцієнта конвекційної тепловіддачі α_{out} (значення в конкретній точці вздовж периметра резервуара) може бути отримано із співвідношення:

$$\alpha_{out} = u(\varphi) \bar{\alpha}_{out}, \quad (4)$$

де φ – кут, який відраховується від лобової точки. Залежність $u(\varphi)$ визначається емпірично.

4.3. Розв'язання рівняння теплопровідності в стінці резервуара

Розповсюдження тепла в глибину стінки описується одномірним рівнянням теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \delta, \quad t > 0, \quad (5)$$

де $T(x,t)$ – температура у точці x в момент часу t ; a – коефіцієнт температуропровідності; λ , c , ρ – коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність і густина сталі, відповідно; $x=0$ – відповідає точці на зовнішній поверхні стінки; $x=\delta$ – точці на внутрішній поверхні стінки.

В початковий момент часу (до початку пожежі) температура всередині стінки дорівнює температурі навколишнього середовища T_0 :

$$T(x,0) = T_0, \quad 0 \leq x \leq \delta, \quad (6)$$

Крайова умова на зовнішній поверхні стінки буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = & -\frac{c_0 \varepsilon_f \varepsilon_w}{\lambda} \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{out}}{100} \right)^4 \right] \varphi + \frac{c_0 \varepsilon_w}{\lambda} \left[\left(\frac{T_{out}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] (1 - \varphi) + \\ & + \frac{\alpha_{out}}{\lambda} (T_{out} - T_0), \end{aligned} \quad (7)$$

а на внутрішній:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta} = -\frac{c_0 \varepsilon_w}{\lambda} \left[\left(\frac{T_{in}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] - \frac{\alpha_{in}}{\lambda} (T_{in} - T_0). \quad (8)$$

Таким чином, диференціальне рівняння параболічного типу (5) разом з крайовими умовами (7) і (8), а також початковою умовою (6) описують динаміку зміни температури в стінці вертикально сталевого резервуара.

В залежності від швидкості вітру, його напрямку, температури на зовнішній

поверхні стінки резервуара може переважати вільна конвекція, обумовлена підйомом розігрітого повітря вздовж стінки, або вимушена конвекція, обумовлена вітром. Отже, для визначення коефіцієнта конвекційного теплообміну будемо обирати максимальне із значень коефіцієнта конвекційної тепловіддачі в режимі вільної і вимушеної конвекції:

$$\bar{\alpha}_{\text{out}} = \max \left\{ 198 T_f^{-0,7655} w_f^{0,9227} D^{-0,0773} u(\varphi), \left(15,904 - 0,0082 \frac{T_w + T_0}{2} \right) \left(\frac{T_w - T_0}{T_w + T_0} \right)^{1/3} \right\}.$$

В якості прикладу на рис. 7 наведено динаміку зміни температури верхнього краю зовнішньої поверхні стінки резервуара РВС-10000, оберненої в бік пожежі в аналогічному резервуарі з нафтою, для різних швидкостей вітру. При цьому були прийняті наступні значення параметрів: $T_f=1100$ °C; $\varepsilon_f 0,85$; $\varepsilon_f=0,8$; $\delta=8$ мм; вітер направлений в бік резервуара, що нагрівається.

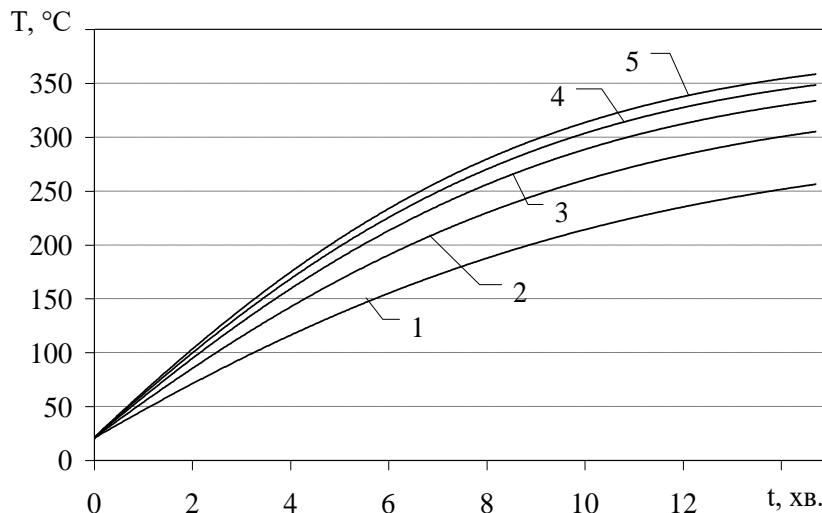


Рис. 7. Динаміка зміни температури верхнього краю стінки резервуара, оберненої в бік пожежі при різних швидкостях вітру: 1 – $w=0$; 2 – $w=1$ м/с; 3 – $w=2$ м/с; 4 – $w=3$ м/с; 5 – $w=5$ м/с

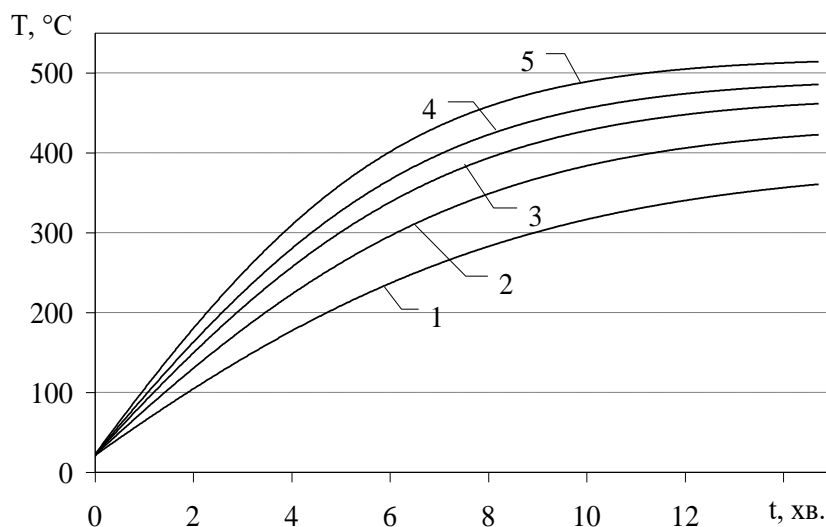


Рис. 8. Динаміка зміни температури верхнього краю стінки резервуара, оберненої в бік пожежі при різних швидкостях вітру: 1 – $w=0$; 2 – $w=1$ м/с; 3 – $w=2$ м/с; 4 – $w=3$ м/с; 5 – $w=5$ м/с

На рис. 8 наведено динаміку зміни температури верхнього краю зовнішньої поверхні стінки резервуара РВС-10000 за аналогічних умов, але при горінні резервуара з бензином. При цьому були прийняті наступні значення параметрів: $T_f=1200\text{ }^\circ\text{C}$; $\varepsilon_f=0,97$; $\varepsilon_r=0,8$; $\delta=8\text{ мм}$.

5. Обговорення результатів побудови моделі теплового впливу пожежі на сусідній резервуар в умовах вітру

Модель нагріву стінки резервуара з нафтопродуктом під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі враховує:

- променевий теплообмін зовнішньої стінки резервуара з факелом і навколишнім середовищем;
- променевий теплообмін внутрішньої поверхні з внутрішнім простором резервуара;
- теплообмін з навколишнім повітрям в режимі вимушеної конвекції;
- теплообмін з пароповітряною сумішшю в режимі вільної конвекції.

Модель спирається на припущення, що під впливом вітру полум'я нахилиється, зберігаючи свою довжину. Для визначення теплового потоку випромінюванням від факела побудовано оцінку коефіцієнта взаємного опромінення. Показано (рис. 2), що нахил факела вітром в бік сусіднього резервуара призводить до збільшення коефіцієнта взаємного опромінення.

У випадку горючої рідини коефіцієнт взаємного опромінення монотонно зростає від 0,0996 (за відсутності вітру, $w=0$) до 0,1642 (при швидкості вітру $w=5\text{ м/с}$), збільшуючись в 1,65 рази. У випадку легкозаймистої рідини коефіцієнт взаємного опромінення монотонно зростає від 0,1095 (при $w=0$) до 0,2109 (при $w=5\text{ м/с}$), збільшуючись в 1,93 рази (рис. 3). Подальше зростання швидкості вітру практично не змінює коефіцієнт взаємного опромінення внаслідок того, що кут нахилу факела майже не змінюється. Вираз для коефіцієнта взаємного опромінення (1) містить безрозмірні координати x_0/R , z/R у підінтегральній функції. Це означає, що для всіх резервуарів з діаметром $D \leq 30/0,75=40\text{ (м)}$, можуть бути використані графічні залежності (рис. 2–5). З практичної точки зору це означає, що всі резервуари до РВС-20000 включно.

Показано, що для резервуарів РВС-700 і більше, і швидкості вітру $w \geq 1\text{ м/с}$, режим обтікання резервуара вітровим потоком носить турбулентний характер. При цьому коефіцієнт конвекційної тепловіддачі майже лінійно зростає зі збільшенням швидкості вітру, зменшується при збільшенні температури повітряного потоку і слабо залежить від діаметру резервуара: збільшення діаметра резервуара з 10 м до 60 м призводить до зменшення коефіцієнта лише на 15 %.

Для визначення розподілу температур всередині стінки резервуара розв'язується рівняння теплопровідності. Крайовими умовами на зовнішній і внутрішній поверхнях стінки резервуара є теплові потоки (випромінюванням і конвекцією). Для чисельного розв'язання рівняння теплопровідності використовується метод скінчених різниць, в якому при заданому кроку по просторовим осям крок по вісі часу обирається з урахуванням умови Куранта-Фрідрікса-Леві.

Із отриманого розв'язку впливають наступні результати:

- наявність вітру в бік резервуара, що нагрівається, істотно підвищує небезпеку розповсюдження пожежі. Зокрема, у випадку пожежі в резервуарі з нафтою і швидкістю вітру 5 м/с температура стінки сусіднього резервуара досягає величини $250\text{ }^\circ\text{C}$ через 5 хв. А в умовах штиля цей час складає близько 15 хв;

– скорочення часу досягнення небезпечних значень температури стінкою резервуара вимагає початку охолодження сусідніх резервуарів не пізніше, ніж через 5 хв. після початку пожежі.

Обмеженням побудованої моделі є те, що вона не враховує нагріву покрівлі резервуара. Внаслідок цього зменшується інтенсивність охолодження внутрішньої поверхні стінки резервуара за рахунок променевого теплообміну. Крім того, нахил факела вітром може призводити до того, що покрівля резервуара буде нагріватися швидше, ніж його стінка. В цьому випадку першочергові зусилля мають бути спрямовані на охолодження покрівлі резервуара. Таким чином, подальші перспективи дослідження пов'язані з побудовою моделі нагріву покрівлі резервуара під тепловим впливом пожежі, а також визначенням інтенсивності подачі води, що забезпечує охолодження до безпечної температури.

6. Висновки

1. Нахил факела вітром в напрямку сусіднього резервуара призводить до збільшення коефіцієнта взаємного опромінення між факелом і верхнім краєм стінки сусіднього резервуара. При цьому коефіцієнт взаємного опромінення монотонно зростає із збільшенням швидкості вітру. Показано, що для вертикальних сталевих резервуарів, місткістю до 20000 м³ включно, в безрозмірних координатах коефіцієнт опромінення залежить лише від типу рідини, що горить. Значення коефіцієнта взаємного опромінення на верхньому краї стінки резервуара для горючих рідин досягає 0,1642 (при швидкості вітру 5 м/с), збільшуючись в 1,65 рази порівняно з випадком вітрового штилю. Для легкозаймистих рідин це значення сягає 0,2109 (при швидкості вітру 5 м/с), збільшуючись в 1,93 рази.

2. Показано, що режим обтікання резервуара вітровим потоком носить турбулентний характер. З використанням методів теорії подібності проведено оцінку коефіцієнта конвекційного теплообміну на зовнішній поверхні стінки резервуара в режимі вимушеної конвекції. Коефіцієнт теплообміну майже лінійно зростає зі збільшенням швидкості вітру, зменшується при збільшенні температури повітряного потоку і слабо залежить від діаметру резервуара: збільшення діаметра резервуара з 10 м до 60 м призводить до зменшення коефіцієнта лише на 15 %.

3. Розв'язання рівняння теплового балансу для стінки резервуара, проведене методом скінчених різниць, дозволяє визначити розподіл температур по стінці резервуара. Наявність вітру в бік резервуара, що нагрівається, істотно підвищує небезпеку розповсюдження пожежі на резервуари, що не горять. Зокрема, у випадку пожежі в резервуарі з нафтою і швидкістю вітру 5 м/с температура стінки сусіднього резервуара досягає величини 250 °С вже через 5 хв. А в умовах штиля цей час складає близько 15 хв.

Література

1. Yang R., Wang Z., Jiang J., Shen S., Sun P., Lu Y. Cause analysis and prevention measures of fire and explosion caused by sulfur corrosion. *Engineering Failure Analysis*. 2020. Vol. 108. P. 104342. doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.104342

2. Ni Z., Wang Y. Relative risk model for assessing domino effect in chemical process industry. *Safety Science*. 2016. Vol. 87. P. 156–166. doi: 10.1016/j.ssci.2016.03.026

3. Otrosh Yu., Semkiv O., Rybka E., Kovalov A. About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. *IOP Conference Series*

ries: *Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708(1). doi: 10.1088/1757-899X/708/1/012065

4. Kustov M. V., Kalugin V. D., Tutunik V. V., Tarakhno E. V. Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Chemistry and Chemical Technology Issues*. 2019. Vol. 1. P. 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99

5. Mygalenko K., Nuyanzin V., Zemlianskyi A., Dominik A., Pozdieiev S. Development of the technique for restricting the propagation of fire in natural peat ecosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1(10). P. 31–37. doi: 10.15587/1729-4061.2018.121727

6. Popov O., Iatsyshyn A., Kovach V., Artemchuk V., Kameneva I., Taraduda D., Sobyna V., Sokolov D., Dement M., Yatsyshyn T. Risk assessment for the population of Kyiv, Ukraine as a result of atmospheric air pollution. *Journal of Health and Population*. 2020. Vol. 10(25). doi: 10.5696/2156-9614-10.25.200303

7. Zhang Z., Zong R., Tao C., Ren J., Lu S. Experimental study on flame height of two oil tank fires under different lip heights and distances. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020. Vol. 139. P. 182–190. doi: 10.1016/j.psep.2020.04.019

8. Mukunda H. S., Shivakumar A., Bhaskar Dixit C. S. Modelling of unsteady pool fires – fuel depth and pan wall effects. *Combustion Theory and Modelling*. 2021. doi: 10.1080/13647830.2021.1980229

9. 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: 10.1016/j.psep.2020.12.002

10. Semerak M., Pozdeev S., Yakovchuk R., Nekora O., Sviatkevich O. Mathematical modeling of thermal fire effect on tanks with oil products. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 247(00040). doi: 10.1051/mateconf/201824700040

11. 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(103990). doi:10.1016/j.jlp.2019.103990

12. Li Y., Jiang J., Zhang Q., Yu Y., Wang Z., Liu H., Shu C.-M. Static and dynamic flame model effects on thermal buckling: Fixed-roof tanks adjacent to an ethanol pool-fire. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019. Vol. 127. P. 23–35. doi: 10.1016/j.psep.2019.05.001

13. Ahmadi O., Mortazavi S. B., Pasharshahri H., Mohabadi H. A. Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational fluid dynamic (CFD). *Process Safety and Environmental Protection*. 2019. Vol. 123. P. 379–389. doi: 10.1016/j.psep.2019.01.006

14. Abramov Y. A., Basmanov O. E., Mikhayluk A. A., Salamov J. Model of thermal effect of fire within a dike on the oil tank. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2018. Vol. 2. P. 95–100. doi: 10.29202/nvngu/2018-2/12

15. Lackman T., Hallberg M. A dynamic heat transfer model to predict the thermal response of a tank exposed to a pool fire. *Chemical engineering transactions*. 2016. Vol. 48. P. 157–162. doi: 10.3303/CET1648027

16. Басманов О. Є., Максименко М. В., Олійник В. В. Моделювання теплового впливу пожежі в резервуарі з нафтопродуктом на сусідній резервуар. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2021. № 2 (34). С. 4–20. doi: 10.52363/2524-0226-2021-34-1

17. Довідник керівника гасіння пожежі. Київська книжково-журнальна фабрика. 2017. 320 с.

18. Саламов Д. О., Абрамов Ю. О., Басманов О. Є. Оцінка коефіцієнта конвекційного теплообміну між стінкою резервуара і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара. Проблеми пожежної безпеки. 2020. № 47. С. 99–104. Available online: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11117>

*O. Basmanov, DSc, Professor, Chief Researcher of the Department
M. Maksymenko, Adjunct
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

MODELING THE THERMAL EFFECT OF FIRE TO THE TANK IN THE PRESENCE OF WIND

Forecasting the consequences of emergencies caused by the fire in a vertical steel tank with oil in the presence of wind is considered. A model of heating the shell of a tank with oil under the thermal influence of a fire in an adjacent tank is built. The model takes into account radiant heat transfer, convective heat transfer (to ambient air in forced mode and to steam-air mixture in gas space in free mode). The model is a differential equation that describes the process of heat transfer inside the tank shell, with boundary conditions on the outer and inner shell surfaces. The inclination of the flame by the wind to adjacent tank leads to increasing the coefficient of mutual irradiation between the flame and the upper edge of the tank shell. In this case, the mutual irradiation coefficient increases monotonically while wind speed is increasing. It is shown that for vertical steel tanks with a capacity of up to 20,000 m³, the irradiation coefficient depends only on the type of flammable liquid (in dimensionless coordinates). By using the methods of similarity theory, the estimation of the convective heat transfer coefficient of forced convection on the outer surface of the tank shell is obtained. Applying the finite difference method for solving the heat balance equation allows obtaining the temperature distribution on the tank shell at arbitrary time. It allows determining the area on the shell surface that needs to be cooled. The presence of wind in the direction of the heated tank significantly increases the risk of spreading the fire. In particular, in the case of a fire in an oil tank and wind speed of 5 m/s, the shell temperature of the adjacent tank reaches 250 °C after 5 minutes.

Keywords: emergency, tank fire, fire heat impact, radiant heat transfer, convective heat transfer

References

1. Yang, R., Wang, Z., Jiang, J., Shen, S., Sun, P., Lu, Y. (2020). Cause analysis and prevention measures of fire and explosion caused by sulfur corrosion. *Engineering Failure Analysis*, 108, 104342. doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.104342
2. Ni, Z., Wang, Y. (2016). Relative risk model for assessing domino effect in chemical process industry. *Safety Science*, 87, 156–166. doi: 10.1016/j.ssci.2016.03.026
3. Otrosh, Yu., Semkiv, O., Rybka, E., Kovalov, A. (2019). About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708(1). doi: 10.1088/1757-899X/708/1/012065
4. Kustov, M. V., Kalugin, V. D., Tutunik, V. V., Tarakhno, E. V. (2019). Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Chemistry and Chemical Technology Issues*, 1, 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99
5. Mygalenko, K., Nuyanzin, V., Zemlianskyi, A., Dominik, A., Pozdieiev, S. (2018). Development of the technique for restricting the propagation of fire in natural peat ecosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10), 31–37. doi: 10.15587/1729-4061.2018.121727

6. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Kameneva, I., Taraduda, D., Sobyna, V., Sokolov, D., Dement, M., Yatsyshyn, T. (2020). Risk assessment for the population of Kyiv, Ukraine as a result of atmospheric air pollution. *Journal of Health and Population*, 10(25). doi: 10.5696/2156-9614-10.25.200303
7. Zhang, Z., Zong, R., Tao, C., Ren, J., Lu, S. (2020). Experimental study on flame height of two oil tank fires under different lip heights and distances. *Process Safety and Environmental Protection*, 139, 182–190. doi: 10.1016/j.psep.2020.04.019
8. Mukunda, H. S., Shivakumar, A., Bhaskar Dixit, C. S. (2021). Modelling of unsteady pool fires – fuel depth and pan wall effects. *Combustion Theory and Modelling*. doi: 10.1080/13647830.2021.1980229
9. 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: 10.1016/j.psep.2020.12.002
10. Semerak, M., Pozdeev, S., Yakovchuk, R., Nekora, O., Sviatkevich, O. (2018). Mathematical modeling of thermal fire effect on tanks with oil products. *MATEC Web of Conferences*, 247(00040). doi: 10.1051/mateconf/201824700040
11. 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:10.1016/j.jlp.2019.103990
12. Li, Y., Jiang, J., Zhang, Q., Yu, Y., Wang, Z., Liu, H., Shu, C.-M. (2019). Static and dynamic flame model effects on thermal buckling: Fixed-roof tanks adjacent to an ethanol pool-fire. *Process Safety and Environmental Protection*, 127, 23–35. doi: 10.1016/j.psep.2019.05.001
13. Ahmadi, O., Mortazavi, S. B., Pasdarshahri, H., Mohabadi, H. A. (2019). Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational fluid dynamic (CFD). *Process Safety and Environmental Protection*, 123, 379–389. doi: 10.1016/j.psep.2019.01.006
14. Abramov, Y. A., Basmanov, O. E., Mikhayluk, A. A., Salamov, J. (2018). Model of thermal effect of fire within a dike on the oil tank. *Naukovyi Visnyk NHU*, 2, 95–100. doi: 10.29202/nvngu/2018-2/12
15. Lackman, T., Hallberg, M. (2016). A dynamic heat transfer model to predict the thermal response of a tank exposed to a pool fire. *Chemical engineering transactions*, 48, 157–162. doi: 10.3303/CET1648027
16. Basmanov, O., Maksymenko, M., Oliinik, V. (2021). Modeling the thermal effect of a fire in an oil tank to the next tank. *Problems of Emergency Situations*, 2(34), 4–20. doi: 10.52363/2524-0226-2021-34-1
17. Fire Fighting Leader Handbook. (2017). Kyiv book and magazine factory, 2017, 320.
18. Salamov, J., Abramov, Y., Basmanov, O. (2020). Estimating the convective heat transfer coefficient of the tank shell and the vapor-air mixture in the gas space of the tank. *Problems of fire safety*, 47, 99–104. Available online: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11117>

Надійшла до редколегії: 18.04.2022

Прийнята до друку: 13.06.2022