

УДК 519.6

*М. В. Максименко, ад'юнкт (ORCID 0000-0002-1888-4815)
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

МОДЕЛЬ НАГРІВУ ПОКРІВЛІ РЕЗЕРВУАРА ПІД ВПЛИВОМ ПОЖЕЖІ В СУСІДНЬОМУ РЕЗЕРВУАРІ

Розглянуто тепловий вплив пожежі в резервуарі з нафтопродуктом на аналогічній сусідній резервуар. Побудовано модель нагріву покрівлі резервуара, яка враховує променевий теплообмін її зовнішньої поверхні з факелом пожежі і навколишнім середовищем, променевий теплообмін внутрішньої поверхні з простором всередині резервуара, конвекційний теплообмін з навколишнім повітрям і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара. Особливістю моделі є врахування впливу вітру, що проявляється в нахилі факела і зміні режиму конвекції з вільної на вимушену. Нахил факела в напрямку сусіднього резервуара під впливом вітру призводить до збільшення коефіцієнта взаємного опромінення між факелом і покрівлею сусіднього резервуара. Зокрема, при швидкості вітру 2 м/с цей коефіцієнт зростає на 64 % порівняно з випадком, коли вітер відсутній. Показано, що за умови виконання нормативних вимог щодо відстаней між вертикальними сталевими резервуарами, місткістю до 20000 м³ включно, в безрозмірних координатах коефіцієнт опромінення залежить лише від типу рідини, що горить. Із застосуванням методів теорії подібності отримано оцінку коефіцієнта конвекційного теплообміну в умовах вільної і вимушеної конвекції на зовнішній поверхні покрівлі резервуара. Для внутрішньої поверхні отримано оцінку коефіцієнта конвекційного теплообміну з пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара. Для визначення розподілу температур всередині покрівлі резервуара було використано рівняння теплопровідності, крайові умови якого описують тепловий потік на зовнішню і внутрішню поверхні покрівлі. Для розв'язання рівняння застосовано метод скінчених різниць. Показано, що небезпека розповсюдження пожежі підвищується із збільшенням швидкості вітру в бік сусіднього резервуара. Якщо при відсутності вітру покрівля резервуара досягає температури 250 °С через 8 хв., то при швидкості вітру 2 м/с цей час зменшується до 4,3 хв.

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

1. Вступ

Резервуарні парки є основним місцем накопичення нафти і нафтопродуктів в процесі їх переробки, транспортування і зберігання. Найбільш розповсюдженим типом резервуарів в світі та в Україні є вертикальні сталеві резервуари (РВС). Концентрація великої кількості горючих і легкозаймистих рідин на відносно невеликій площі призводить до підвищеної пожежної небезпеки. Особливу небезпеку являє розповсюдження пожежі на сусідні резервуари. Такі пожежі носять затяжний характер і призводять як до значних матеріальних збитків, так і людських жертв [1]. Причиною каскадного розповсюдження пожежі є тепловий вплив пожежі на сусідні резервуари. Нагрів стінок і покрівлі резервуара до температури самоспалахування парів нафтопродукту перетворює їх на джерело запалювання і призводить до вибуху пароповітряної суміші в газовому просторі резервуара (якщо концентрація парів знаходиться в межах від нижньої до верхньої концентраційних меж розповсюдження полум'я) або до її горіння на виході з дихальних пристроїв (якщо концентрація парів перевищує верхню концентраційну межу розповсюдження полум'я). Крім того, тепловий вплив пожежі призводить до втрати міцності сталевими конструкціями [2].

Причиною пожежі в резервуарному парку може стати як технологічний збій, наприклад, переповнення резервуара під час його заповнення, так і самоспалахування відкладень сульфідів [3]. Найбільш поширеною причиною пожеж в резер-

вуарних парках в Україні став їх обстріл з боку російських військ.

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 на них.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [7] досліджено структуру факела над резервуаром з нафтою, що горить. Теоретично і експериментально 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] побудовано модель швидкості вигорання рідини в нестационарних умовах, що базується на серії експериментів щодо горіння п-гептану, дизеля, гасу і бензину. Але тепловий вплив пожежі на навколишні об'єкти в роботі залишається поза увагою. Тепловий потік від пожежі розливу горючої рідини розглянуто в [9]. За допомогою середовища моделювання динаміки пожежі (FDS) досліджено вплив пожежі на сусідній резервуар, визначено безпечні зони для розміщення сил та засобів, що приймають участь у ліквідації пожежі. Але недоліком робіт такого типу є неможливість узагальнення отриманих результатів.

В [10] наведено результати дослідження теплового впливу пожежі в резервуарі з нафтопродуктом на сусідній резервуар. Розв'язано рівняння теплопровідності всередині стінки резервуара, в якому обрано крайові умови третього роду, що відповідають променевому теплообміну з факелом пожежі і розігрітими стінками резервуара, що горить. При цьому конвекційну складову теплообміну залишено поза увагою. В [11] досліджено двозонну модель полум'я: нижню високотемпературну частину полум'я і низькотемпературну верхню частину. На її основі побудовано модель теплового впливу на сусідній резервуар з нафтопродуктом, але не враховано різні температури на зовнішній і внутрішній поверхнях стінки резервуара. В [12] вивчається вплив пульсацій полум'я на тепловий потік і міцність сталевих конструкцій резервуара, що нагрівається. Але небезпеку досягнення температури самоспалахування парів нафтопродукту в роботі не розглянуто.

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

В [15] побудовано модель нагріву стінки резервуара від пожежі розливу. Модель враховує теплообмін випромінюванням (з пожежею і навколишнім середовищем) і конвекцією (зовнішньої поверхні стінки з навколишнім повітрям і внутрішньої – з пароповітряною сумішшю). Але вплив вітру на зміну теплового потоку від пожежі в роботі не розглянуто.

В [16] побудовано модель теплового балансу для стінки 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. В [17] розглянуто вплив вітру на динаміку нагріву стінки сусіднього резервуара, але пи-

тання нагріву його покрівлі не розглянуто.

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

Таким чином, невирішеною частиною проблеми розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок теплового потоку на них є врахування впливу теплового потоку від факела на покрівлю резервуара.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є побудова моделі теплового впливу пожежі горючої рідини в вертикальному сталевому резервуарі на покрівлю сусіднього резервуара для подальшого прогнозування наслідків надзвичайної ситуації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

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

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес нагріву покрівлі вертикального сталевого резервуара під впливом пожежі нафтопродукту в аналогічному сусідньому резервуарі. Основна гіпотеза дослідження полягає в припущенні про конічну форму факела над резервуаром, що горить. Для розрахунку коефіцієнта взаємного опромінення застосовуються методи математичного аналізу. Методи теорії подібності використано для побудови оцінки коефіцієнта конвекційного теплообміну між покрівлею резервуара і повітряним середовищем. Для розв'язання рівняння теплового балансу застосовано чисельні методи розв'язку диференціальних рівнянь в частинних похідних.

5. Побудова моделі нагріву покрівлі резервуара під тепловим впливом пожежі

5.1. Побудова оцінки коефіцієнта взаємного опромінення

Оберемо систему координат наступним чином: вісь X перетинає під прямим кутом вісі обох резервуарів, вісь Z співпадає з віссю резервуара, що горить, а початок координат знаходиться на висоті стінки резервуара, що горить (рис. 1). В такому випадку вісь резервуара, що не горить, перетинає вісь X у точці x_0 .

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

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

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 покрівлі сусіднього резервуара; ψ_2 – кут між нормальним вектором до покрівлі 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 (де $\cos \psi_1 > 0$, $\cos \psi_2 > 0$). З урахуванням представлення косинусів кутів через скалярний добуток відповідних векторів, вираз (1) набуде вигляду:

$$\varphi = \frac{1}{\pi} \iint_S \frac{(\vec{n}_1, \vec{r})(\vec{n}_2, \vec{r})}{r^4 |\vec{n}_1| |\vec{n}_2|} dS. \quad (2)$$

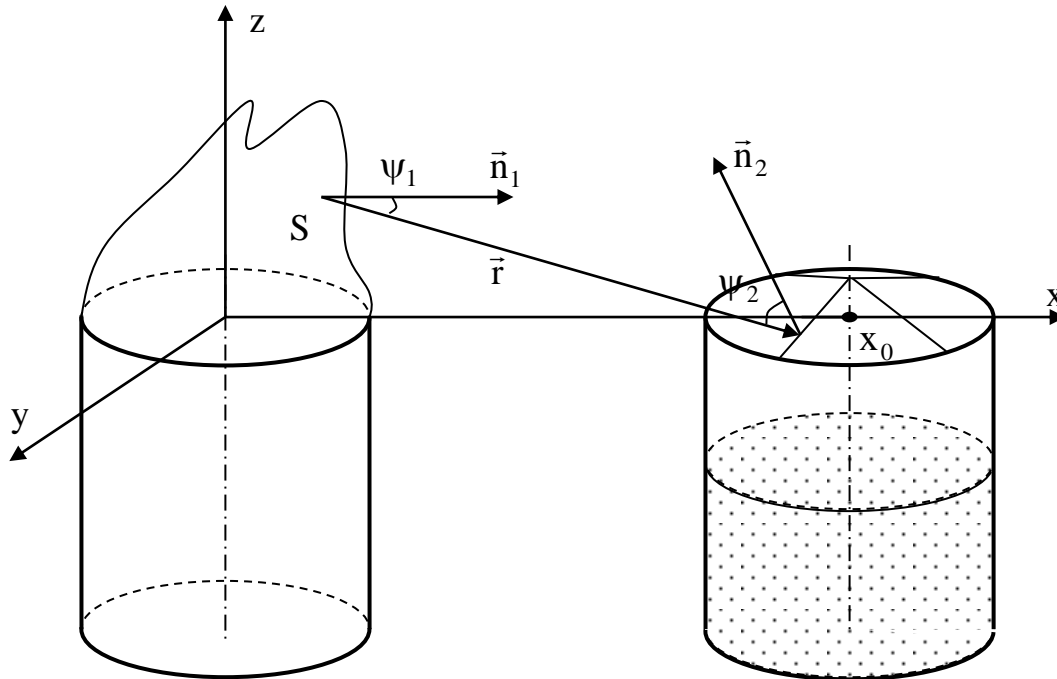


Рис. 1. Обчислення коефіцієнта взаємного опромінення між факелом і точкою на покрівлі резервуара

Вважаючи форму полум'я конічною [16], а її деформацію під впливом вітру такою, що зводиться до нахилу конуса в напрямку вітру [18], запишемо рівняння випромінюючої поверхні факела в параметричному вигляді:

$$\begin{cases} x_1 = u \cos v + c(R - u) \sin \beta \cos \gamma; \\ y_1 = u \sin v + c(R - u) \sin \beta \sin \gamma; \\ z_1 = c(R_f - u) \cos \beta; \\ 0 \leq u \leq R_f, 0 \leq v \leq 2\pi, \end{cases} \quad (3)$$

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

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

w – швидкість вітру. При цьому координати нормального вектору до поверхні полум'я мають вигляд [17]:

$$A = \frac{\partial y_1}{\partial u} \frac{\partial z_1}{\partial v} - \frac{\partial z_1}{\partial u} \frac{\partial y_1}{\partial v} = cu \cos v \cos \beta; \quad (4)$$

$$B = \frac{\partial z_1}{\partial u} \frac{\partial x_1}{\partial v} - \frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial z_1}{\partial v} = cu \sin v \cos \beta; \quad (5)$$

$$C = \frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial y_1}{\partial v} - \frac{\partial y_1}{\partial u} \frac{\partial x_1}{\partial v} = u - uc \sin \beta \cos(v - \gamma). \quad (6)$$

Враховуючи, що вісь резервуара, який не горить, перетинає вісь X у точці x_0 , координати точки на покрівлі резервуара мають вигляд:

$$\begin{cases} x_2 = x_0 + r \cos \alpha; \\ y_2 = r \sin \alpha; \\ z_2 = (R - r) \sin \omega, \end{cases} \quad (7)$$

де r – відстань до осі резервуара, що нагрівається; α – полярний кут, який відповідає точці (x_2, y_2, z_2) на стінці резервуара; ω – кут нахилу покрівлі резервуара. Нормальний вектор до покрівлі резервуара може бути записаний:

$$\vec{n}_2 = (\cos \alpha, \sin \alpha, \cos \omega). \quad (8)$$

Підставляючи вирази (3)–(8) в (2), отримуємо:

$$\varphi = \frac{1}{\pi} \int_{u_1}^{u_2} \int_{v_1}^{v_2} \frac{A(x_0 + r \cos \alpha - x_1) + B(r \sin \alpha - y_1) + C((R - r) \sin \omega - z_1)}{\left[(x_1 - x_0 - r \cos \alpha)^2 + (y_1 - r \sin \alpha)^2 + (z_1 - (R - r) \sin \omega)^2 \right]^{1/2} \sqrt{1 + \cos^2 \omega}} \times \\ \left[(x_1 - x_0) \cos \alpha + y_1 \sin \alpha - r + \cos \omega (z_1 - (R - r) \sin \omega) \right] du dv. \quad (9)$$

Позначимо:

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

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

$$\tilde{z}_1 = \frac{z_1}{R} = c(1 - s) \cos \beta;$$

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

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

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

$$r_2 = \frac{r}{R},$$

де $s = \frac{u}{R}$.

Тоді коефіцієнт взаємного опромінення набуде вигляду

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{1}{\pi\sqrt{1+\cos^2\omega}} \times \\ &\times \int_0^R \int_0^{2\pi} \frac{R^2 \tilde{A}(x_0/R + r_2 \cos\alpha - \tilde{x}_1) + R^2 \tilde{B}(r_2 \sin\alpha - \tilde{y}_1) + R^2 \tilde{C}((1-r_2)\sin\omega - \tilde{z}_1)}{R^4 [(\tilde{x}_1 - x_0/R - r_2 \cos\alpha)^2 + (\tilde{y}_1 - r_2 \sin\alpha)^2 + (\tilde{z}_1 - (1-r_2)\sin\omega)^2]} \times \\ &\times [(\tilde{x}_1 - x_0/R)\cos\alpha + \tilde{y}_1 \sin\alpha - r_2 + \cos\omega(\tilde{z}_1 - (1-r_2)\sin\omega)] R^2 d(u/R) dv = \\ &= \frac{1}{\pi\sqrt{1+\cos^2\omega}} \times \\ &\times \int_0^1 ds \int_0^{2\pi} dv \frac{\tilde{A}(x_0/R + r_2 \cos\alpha - \tilde{x}_1) + \tilde{B}(r_2 \sin\alpha - \tilde{y}_1) + \tilde{C}((1-r_2)\sin\omega - \tilde{z}_1)}{[(\tilde{x}_1 - x_0/R - r_2 \cos\alpha)^2 + (\tilde{y}_1 - r_2 \sin\alpha)^2 + (\tilde{z}_1 - (1-r_2)\sin\omega)^2]} \times \\ &\times [(\tilde{x}_1 - x_0/R)\cos\alpha + \tilde{y}_1 \sin\alpha - r_2 + \cos\omega(\tilde{z}_1 - (1-r_2)\sin\omega)], \end{aligned} \quad (10)$$

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

$$\begin{aligned} \tilde{A}(x_0/R + r_2 \cos\alpha - \tilde{x}_1) + \tilde{B}(r_2 \sin\alpha - \tilde{y}_1) + \tilde{C}((1-r_2)\sin\omega - \tilde{z}_1) &> 0; \\ (\tilde{x}_1 - x_0/R)\cos\alpha + \tilde{y}_1 \sin\alpha - r_2 + \cos\omega(\tilde{z}_1 - (1-r_2)\sin\omega) &> 0. \end{aligned}$$

На рис. 2 наведено розподіл коефіцієнта взаємного опромінення по покрівлі резервуара PBC-10000 ($D=14,25$ м, $\omega=11^\circ$) за умови пожежі горючої рідини в аналогічному сусідньому резервуарі і відсутності вітру.

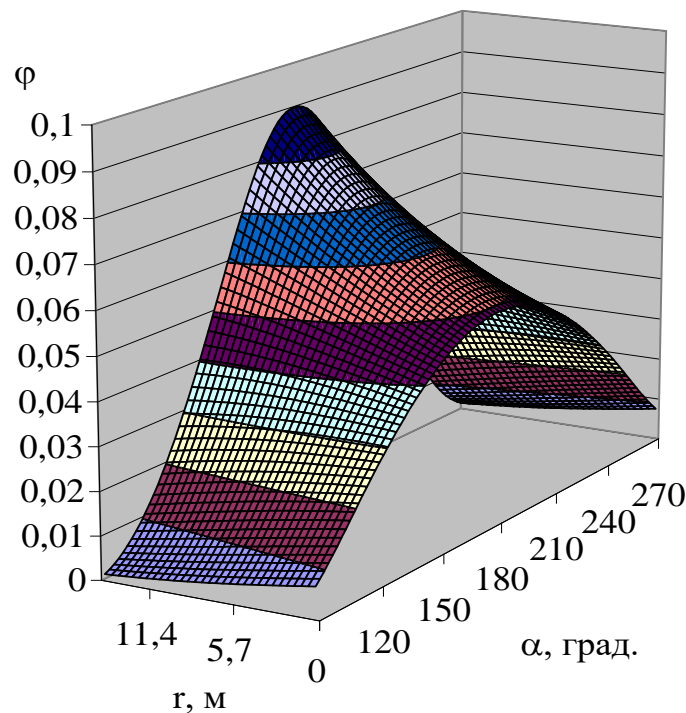


Рис. 2. Розподіл коефіцієнта взаємного опромінення по покрівлі резервуара за відсутності вітру при пожежі в сусідньому резервуарі з горючою рідиною

Аналіз графічної залежності на рис. 2 показує, що максимальне значення коефіцієнта взаємного опромінення досягається на краю покрівлі з боку пожежі ($r = R$, $\alpha = 180^\circ$). На рис. 3, 4 показано випадки, коли вітер, направлений в бік резервуара, що нагрівається, і має швидкість 2 м/с і 4 м/с відповідно.

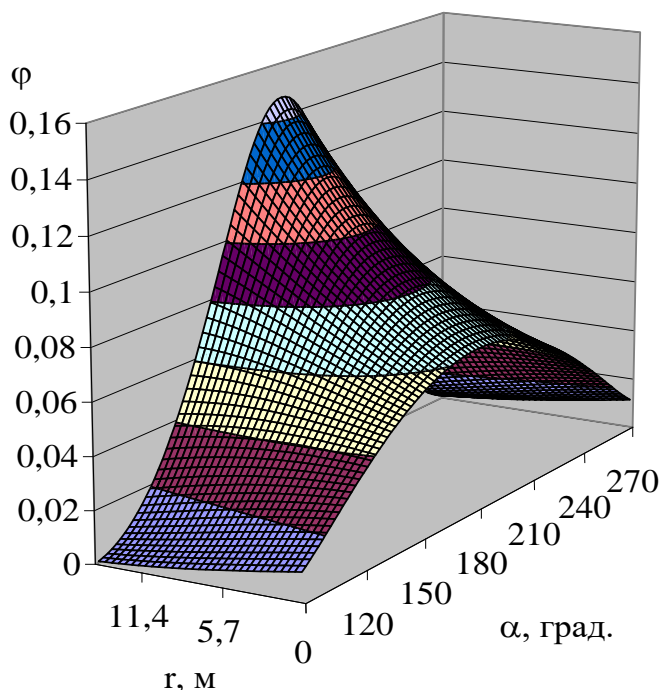


Рис. 3. Розподіл коефіцієнта взаємного опромінення по покрівлі резервуара при пожежі в сусідньому резервуарі з горючою рідиною і швидкості вітру 2 м/с

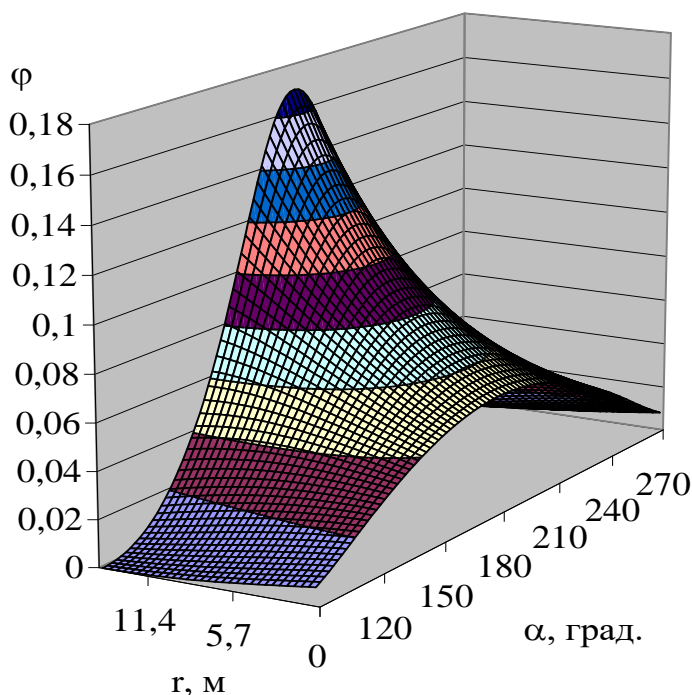


Рис. 4. Розподіл коефіцієнта взаємного опромінення по покрівлі резервуара при пожежі в сусідньому резервуарі з горючою рідиною і швидкості вітру 4 м/с

Аналіз графічних залежностей, наведених на рис. 4 і рис. 5, свідчить, що нахил факела вітром в бік сусіднього резервуара призводить до збільшення коефіцієнта взаємного опромінення. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-36-18

ента взаємного опромінення. Його максимального значення досягається на краю покрівлі з боку резервуара, що горить.

5.2. Побудова оцінки коефіцієнта конвекційного теплообміну

У випадку відсутності вітру для вертикальних поверхонь має місце вільна конвекція, що описується критеріальним рівнянням:

$$Nu = 0,135(Gr \cdot Pr)^{1/3}, \quad (11)$$

де Nu , Gr , Pr – числа Нусельта, Грасгофа і Прандтля відповідно:

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda_f}; \quad (12)$$

$$Gr = \frac{\beta \Delta T D^3 g}{\nu^2}; \quad (13)$$

α – коефіцієнт конвекційного теплообміну; D – діаметр резервуара; λ_f – коефіцієнт теплопровідності повітря; $\beta = 1/T$ – температурний коефіцієнт об'ємного розширення; ΔT – різниця температур між повітрям і поверхнею; g – прискорення вільного падіння; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості. Об'єднуючи (11)–(13), отримаємо значення коефіцієнта конвекційного теплообміну:

$$\alpha = 0,135 \frac{\lambda_f}{D} \left(2 \frac{(T - T_0) D^3 g}{\nu^2 (T_0 + T)} Pr \right)^{1/3} = 0,135 \lambda_f \left(\frac{2g Pr}{\nu^2} \right)^{1/3} \left(\frac{T - T_0}{T + T_0} \right)^{1/3}. \quad (14)$$

Для розрахунку коефіцієнта конвекційного теплообміну для горизонтальних поверхонь, температура яких вище, ніж температура повітряного середовища, вираз (14) має бути збільшений на 30 % у випадку теплообміну верхньої поверхні покрівлі з навколишнім повітрям і зменшений на 30 % у випадку теплообміну нижньої поверхні покрівлі з пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара. Отже, для коефіцієнта конвекційного теплообміну з навколишнім повітрям буде мати місце співвідношення:

$$\alpha_{out} = 0,176 \lambda_f \left(\frac{2g Pr}{\nu^2} \right)^{1/3} \left(\frac{T - T_0}{T + T_0} \right)^{1/3}. \quad (15)$$

Коефіцієнт конвекційної тепловіддачі в пароповітряну суміш набуде вигляду:

$$\alpha_{in} = 0,095 \lambda_f \left(\frac{2g Pr}{\nu^2} \right)^{1/3} \left(\frac{T - T_0}{T + T_0} \right)^{1/3}. \quad (16)$$

За наявності вітру має місце співвідношення:

$$Nu = 0,0364 Re^{0,8} Pr^{0,4} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,11}, \quad (17)$$

де Re – число Рейнольда; μ_f, μ_w – динамічна в'язкість повітряного середовища при температурі повітряного середовища і температурі поверхні відповідно:

$$Re = \frac{wD}{\nu}. \quad (18)$$

Об'єднуючи вирази (12), (17), (18), отримаємо:

$$\alpha_{out} = 0,0364 \frac{\lambda_f}{D} \left(\frac{wD}{\nu} \right)^{0,8} Pr^{0,4} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,11} = 0,0364 \frac{\lambda_f}{D^{0,2}} \left(\frac{w}{\nu} \right)^{0,8} Pr^{0,4} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,11}. \quad (19)$$

Таким чином, для розрахунку коефіцієнта конвекційної теплопередачі для зовнішньої поверхні покрівлі слід використовувати вираз (19) при наявності вітру і (15) при його відсутності.

5.3. Розв'язання рівняння теплопровідності в покрівлі резервуара

Розповсюдження тепла в глибину покрівлі описується одновимірним рівнянням теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \delta, \quad t > 0, \quad (20)$$

де $T(x, t)$ – температура у точці x в момент часу t ; a – коефіцієнт температуропровідності:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho},$$

де λ, c, ρ – коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність і густина сталі відповідно; $x=0$ – відповідає точці на зовнішній поверхні покрівлі; $x=\delta$ – точці на внутрішній поверхні покрівлі.

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

$$T(x, 0) = T_0, \quad 0 \leq x \leq \delta. \quad (21)$$

Крайова умова на зовнішній поверхні покрівлі буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = & -\frac{c_0 \varepsilon_f \varepsilon_w}{\lambda} \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{out}}{100} \right)^4 \right] \varphi + \frac{c_0 \varepsilon_w}{\lambda} \left[\left(\frac{T_{out}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] (1 - \varphi) + \\ & + \frac{\alpha_{out}}{\lambda} (T_{out} - T_0), \end{aligned} \quad (22)$$

а на внутрішній:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta} = -\frac{c_0 \varepsilon_w}{\lambda} \left[\left(\frac{T_{in}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] - \frac{\alpha_{in}}{\lambda} (T_{in} - T_0). \quad (23)$$

Таким чином, диференціальне рівняння параболічного типу (20) разом з крайовими умовами (22) і (23), а також початковою умовою (21) описують динаміку зміни температури в покрівлі вертикального сталевого резервуара.

В якості прикладу на рис. 5 наведено динаміку зміни температури краю зовнішньої поверхні покрівлі резервуара РВС-10000 з боку пожежі в аналогічному резервуарі з нафтою, для різних швидкостей вітру. При цьому були прийняті наступні значення параметрів: $T_f=1100$ °С; $\varepsilon_f=0,85$; $\varepsilon_w=0,8$; $\delta=4$ мм; вітер направлений в бік резервуара, що нагрівається.

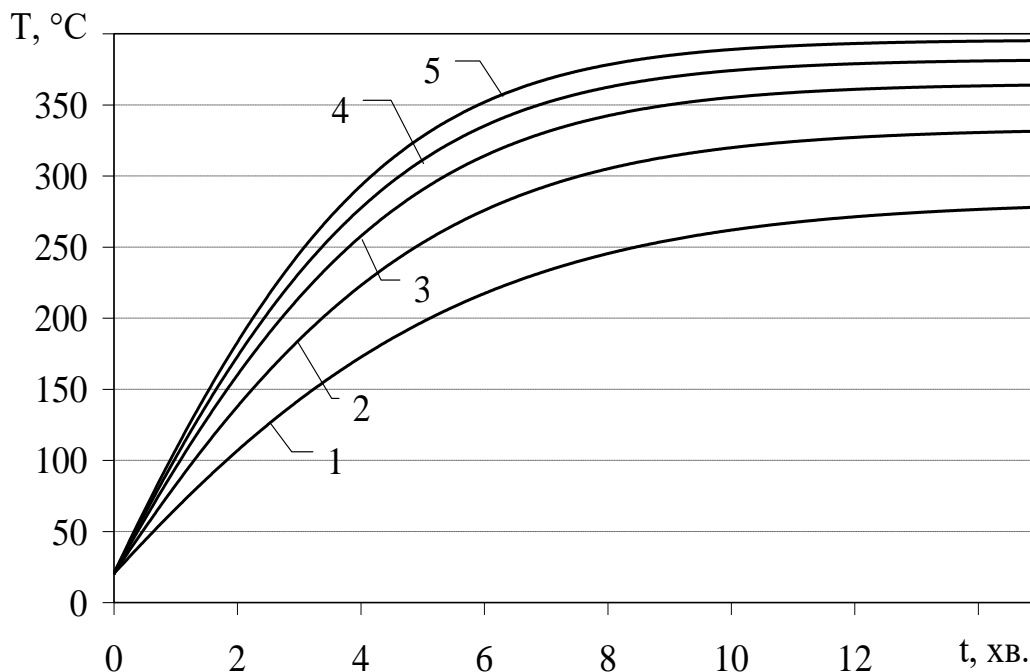


Рис. 5. Динаміка зміни температури зовнішньої покрівлі резервуара з боку пожежі при різних швидкостях вітру: 1 – $w=0$; 2 – $w=1$ м/с; 3 – $w=2$ м/с; 4 – $w=3$ м/с; 5 – $w=5$ м/с

6. Обговорення результатів побудови моделі теплового впливу пожежі на покрівлю резервуара

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

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

Модель спирається на припущення про конічну форму факела над резервуаром з нафтопродуктом. У випадку вітру конус нахилиється, зберігаючи свою довжину. Побудовано коефіцієнт взаємного опромінення між факелом і довільною точкою на покрівлі резервуара. Показано, що нахил факела вітром у бік сусіднього резервуара призводить до збільшення коефіцієнта взаємного опромінення. За

відсутності вітру максимальне значення коефіцієнта взаємного опромінення досягається краю покрівлі, оберненої в бік пожежі, і складає 0,0901. При швидкості вітру 2 м/с цей коефіцієнт зростає на 64 % і становить 0,1475, а при швидкості 4 м/с зростає в 1,9 рази, досягаючи величини 0,1697.

Вираз для коефіцієнта взаємного опромінення (1) містить безрозмірні координати x_0/R , r_2 у підінтегральній функції. Це означає, що для всіх резервуарів з діаметром $D \leq 30/0,75 = 40$ (м), можуть бути використані графічні залежності на рис. 2 – рис. 4. З практичної точки зору це означає всі резервуари до РВС-20000 включно.

За відсутності вітру на зовнішній поверхні покрівлі резервуара має місце вільна конвекція, а при його наявності – вимушена. На внутрішній поверхні покрівлі резервуара має місце теплообмін з пароповітряною сумішшю в режимі вільної конвекції. Із застосуванням методів теорії подібності побудовано оцінки коефіцієнта конвекційної тепловіддачі для вказаних випадків.

Для визначення розподілу температур всередині покрівлі резервуара було використано одновимірне рівняння теплопровідності, крайові умови якого описують тепловий потік на зовнішню поверхню покрівлі від факела та від внутрішньої поверхні у газовий простір резервуара. В якості початкового розподілу було прийнято температуру навколишнього середовища. Отримане диференціальне рівняння не може бути розв'язано аналітично внаслідок складних виразів в крайових умовах. Тому розв'язання було проведено методом скінчених різниць, суть якого полягає в заміні похідних скінченими приростами. При цьому крок по просторовій вісі було обрано 1 мм, а крок по вісі часу обирався з урахуванням умови Куранта-Фрідрікса-Леві, що забезпечує збіжність розв'язку. Отриманий розподіл температур дозволяє, зокрема, визначити температуру на поверхні покрівлі резервуара і динаміку її зміни (рис. 5). Аналіз графічних залежностей на рис. 5 показує наступне:

- при відсутності вітру покрівля резервуара досягає температури 250 °С приблизно через 8 хв. При цьому температура стінки резервуара досягає цієї величини лише через 15 хв. після початку пожежі [17]. Це свідчить про першочерговість подання води на охолодження покрівлі резервуара;

- вітер, направлений від резервуара, що горить, до сусіднього збільшує небезпеку розповсюдження пожежі. Зокрема, при швидкості вітру 2 м/с покрівля досягає температури 250 °С вже через 4,3 хв., а при 5 м/с – через 2,5 хв.;

- скорочення часу досягнення небезпечних значень температури покрівлею резервуара означає необхідність охолодження сусідніх резервуарів вже через 2–3 хв. після початку пожежі.

Обмеженням побудованої моделі є те, що вона не враховує нагріву внутрішніх поверхонь покрівлі і стінок резервуара внаслідок взаємного опромінення. Це означає, що стінка резервуара і його покрівля будуть нагріватися дещо швидше, ніж це передбачає модель. Крім того, відбувається нагрів пароповітряної суміші в газовому просторі резервуара.

Таким чином, подальші перспективи дослідження пов'язані з побудовою комплексної моделі нагріву стінки, покрівлі і пароповітряної суміші в резервуарі під тепловим впливом пожежі, а також визначенням інтенсивності подачі води, що забезпечує охолодження до безпечної температури.

7. Висновки

1. Оцінено коефіцієнт взаємного опромінення факела і точки на покрівлі re-
Fire safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-36-18

зервуара за умови зміни форми факела під впливом вітру. Нахил факела вітром в напрямку сусіднього резервуара призводить до збільшення коефіцієнта взаємного опромінення між факелом і покрівлею сусіднього резервуара. При цьому коефіцієнт взаємного опромінення зростає із збільшенням швидкості вітру. За відсутності вітру він складає 0,0901 для точки на краю покрівлі з боку пожежі. При швидкості вітру 2 м/с цей коефіцієнт становить 0,1475, а при швидкості 4 м/с досягає величини 0,1697. Показано, що для вертикальних сталевих резервуарів, місткістю до 20000 м³ включно, в безрозмірних координатах коефіцієнт опромінення залежить лише від типу рідини, що горить.

2. Із застосуванням методів теорії подібності побудовано оцінки коефіцієнта конвекційної тепловіддачі на зовнішній і внутрішній поверхнях покрівлі резервуара. За відсутності вітру на зовнішній поверхні має місце вільна конвекція, а при його наявності – вимушена. На внутрішній поверхні покрівлі резервуара має місце теплообмін з пароповітряною сумішшю в режимі вільної конвекції.

3. Шляхом застосування метода скінчених різниць розв'язано рівняння теплового балансу і визначено розподіл температур по покрівлі резервуара. Показано, що нахил факелу в бік сусіднього резервуара істотно підвищує небезпеку розповсюдження пожежі. Якщо при відсутності вітру покрівля резервуара досягає температури 250 °С через 8 хв., то при швидкості вітру 2 м/с цей час зменшується до 4,3 хв., а при 5 м/с – до 2,5 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: 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., Pasdarsahri 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. Басманов О. Є., Максименко М. В. Моделювання впливу пожежі на сусідній резервуар з нафтопродуктом в умовах вітру. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. № 1(35). С. 239-253. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-18

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

M. Maksymenko, Adjunct (0000-0002-1888-4815)

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

MODEL OF TANK ROOF HEATING UNDER THE INFLUENCE OF A FIRE IN AN ADJACENT TANK

The thermal effect of a fire in a tank with an oil product to the similar nearby tank is considered. Model of heating the roof of the tank was built. It takes into account the radiant heat transfer from the fire and to the surrounding environment, the radiant heat transfer from the inner surface to the space inside the tank, the convection heat transfer to the air and to the vapor-air mixture in the inner space of the tank. The feature of the model is taking into account that wind inclines the fire and changes of the convection mode for the outer surface of the tank roof. The inclination of the flame to the adjacent tank under the influence of the wind leads to increasing the mutual radiation coefficient between the flame

and the tank roof. In particular, for wind speed of 2 m/s this coefficient increases by 64 % compared to the case without wind. It is shown that for the standard distances between vertical steel tanks with a capacity up to 20,000 m³, in dimensionless coordinates the radiation coefficient depends only on the type of burning liquid. With using the similarity theory methods, an estimation of the convection heat transfer coefficient was obtained for free and forced convection on the outer surface of the tank roof. An estimation for convection heat transfer coefficient with the vapor-air mixture in the gas space of the tank was obtained for the inner surface. To determine the temperature distribution inside the roof of the tank, the heat conduction equation was used. Its boundary conditions describe the heat flow on the outer and inner surfaces of the roof. The finite difference method was used to solve the equation. It is shown that the danger of fire spreading increases with increasing wind speed towards the adjacent tank. If no wind then the roof of the tank reaches a temperature of 250 °C after 8 min. But for wind speed of 2 m/s this time reduces to 4.3 min.

References

1. 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
2. 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
3. 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
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., Pasharshahi, 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. Basmanov O., Maksymenko M. (2022). Modeling the thermal effect of fire to the adjacent tank in the presence of wind. *Problems of Emergency Situations*, 1(35), 239–253. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-18

18. *Fire Fighting Leader Handbook*. (2017). Kyiv book and magazine factory, 2017, 320.

Надійшла до редколегії: 21.10.2022

Прийнята до друку: 18.11.2022