

УДК 519.6

Ю. О. Абрамов, д.т.н., професор, головн. н.с. центру (ORCID 0000-0001-7901-3768)

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

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

В. О. Колоколов, викл. каф. (ORCID 0000-0002-1155-5170)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ НАГРІВУ СТІНКИ РЕЗЕРВУАРА ПІД ВПЛИВОМ ПОЖЕЖІ

Розглянуто прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій, обумовлених пожежею нафтопродукту у вертикальному сталевому резервуарі з нафтопродуктом в резервуарній групі з урахуванням випадкового характеру теплового потоку від пожежі. Побудовано модель нагріву стінки резервуара, яка враховує променевий теплообмін з факелом, навколишнім середовищем, внутрішнім простором резервуара; конвекційний теплообмін з навколишнім повітрям і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара. Вихідними даними для моделі є закон і параметри розподілу випадкового процесу, що характеризує факел. Результатом є закон і параметри розподілу випадкового процесу, що описує температуру стінки резервуара. Зроблено припущення про стаціонарність і нормальність випадкового процесу, що описує пульсації коефіцієнта взаємного опромінення. Побудовано систему нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку, яка спирається на рівняння теплового балансу для довільної точки на стінці резервуара і описує динаміку зміни математичного очікування і дисперсії температури у цій точці. Система рівнянь розв'язується із застосуванням метода скінчених різниць. Отримані результати дозволяють уточнити детерміновану модель шляхом побудови довірчих інтервалів для температури стінки резервуара, що нагрівається. Показано, що коли температура стінки резервуара, досягає критичного значення, детермінована і стохастична модель дають майже однаковий прогноз часу. Навпаки, коли наближення до критичного значення характеризується повільним зростанням температури, прогноз часу досягнення критичного значення може істотно відрізнитися для детермінованої і стохастичної моделей. Наприклад, час досягнення температури 300 °С резервуаром РВС-10000 на нормативній відстані від аналогічного резервуара, що горить, складає майже 30 хв. для детермінованої моделі. Стохастична модель показує, що ця температура може бути досягнута вже через 14 хв.

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

1. Вступ

Резервуарні парки є основним місцем зберігання нафтопродуктів при їх переробці і транспортуванні. Скупчення великих об'ємів горючих і легкозаймистих рідин на відносно невеликій площі призводить до підвищеної пожежної небезпеки. Особливу загрозу при цьому являє каскадне розповсюдження пожежі на сусідні резервуари. Такі пожежі мають затяжний характер і завдають значних матеріальних збитків [1].

В Україні і світі для зберігання нафти і нафтопродуктів використовуються вертикальні сталеві резервуари (РВС) [2].

Фізичною основою розповсюдження пожежі на сусідні резервуари є нагрів сталевих конструкцій резервуарів під тепловим випромінюванням пожежі до температури самоспалахування парів нафтопродукту, що зберігається в резервуарі. Якщо концентрація парів нафтопродукту в газовому просторі резервуара лежить в межах від нижньої концентраційної межі розповсюдження полум'я до верхньої концентраційної межі розповсюдження полум'я, то поява джерела запалювання (яким є елемент конструкції, розігрітий до температури самоспалахування) приз-

водить до вибуху пароповітряної суміші в газовому просторі резервуара. Якщо концентрація парів нафтопродукту вище верхньої концентраційної межі розповсюдження полум'я, то виникає горіння парів на виході з дихальних отворів резервуара. Отже, каскадне розповсюдження пожежі, викликане тепловим впливом на сусідні резервуари, є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [3] проведено експериментальні дослідження з горіння рідин в тунелі і у відкритому просторі. На їх підставі запропоновано модель теплового випромінювання від пожежі. Недоліком такої моделі є складність її застосування в умовах, які відрізняються від тих, що були в експерименті. В роботі [4] враховано нерівномірність розподілу температури вздовж факела. Запропоновано напівемпіричну модель розподілу температури випромінюючої поверхні. Модель дозволяє уточнити тепловий потік випромінюванням від пожежі, але залишається відкритим питання про можливість її застосування в інших умовах.

Внаслідок турбулентного характеру горіння нафтопродукту форма і температура його полум'я не є сталими [5]. В роботі [6] досліджено пульсації полум'я на прикладі горіння гептану. Запропоновано кореляційні функції для частоти пульсацій полум'я і його тепловиділення. Але дослідження проведено для горіння в ємностях діаметром від 5 см до 45 см. В [7] розглянуто горіння рідини на похилій поверхні. З'ясовано, що кут нахилу полум'я та довжина полум'я збільшуються зі збільшенням кута нахилу, а частота пульсацій при цьому зменшується. Але вплив полум'я на сусідні технологічні об'єкти в роботі не розглядається. В [8] досліджено особливості пульсацій полум'я при горінні рідини, що розливається, в залежності від кута нахилу поверхні і інтенсивності витікання рідини із ємності. Але вплив пульсацій на тепловий потік залишено поза увагою.

В [9] досліджено вплив пульсацій полум'я на тепловий потік і міцність сталевих конструкцій резервуара, що нагрівається. В [10] додатково розглянуто вплив уламків від вибуху на міцність резервуара. Але ймовірність досягнення температурою резервуара небезпечних значень в цих роботах не розглянуто.

В [11] побудовано модель теплового впливу пожежі в обвалуванні на резервуар з нафтопродуктом, але при цьому припускаються сталими форма факела і теплове випромінювання від нього. В [12] побудовано модель теплового впливу пожежі в резервуарі на сусідній резервуар з нафтопродуктом. Модель враховує теплообмін випромінюванням і конвекцією. При цьому випадкові пульсації полум'я не враховуються. В той же час теплове випромінювання є основним способом передачі тепла при пожежі в резервуарі [13], отже, його пульсації можуть істотно впливати на процес нагріву сусідніх резервуарів. В [14] з використанням метода скінчених елементів проведено моделювання теплових процесів, що відбуваються в резервуарі об'ємом 100 тис. м³, який нагрівається під впливом пожежі. Але вплив випадкових флуктуацій теплового потоку в роботі не розглянуто. В [15] побудовано модель, яка додатково враховує температури повітряних потоків, що здійснюються над нафтопродуктом, що горить, а також вплив вітру. Але і ця модель носить детермінований характер.

Таким чином, аналіз моделей теплового впливу пожежі нафтопродукту в резервуарі на сусідні резервуари засвідчив, що вплив випадкових пульсацій полум'я на тепловий потік від факела враховано недостатньо. Це, в свою чергу, може при-

зводити до похибки в оцінці часу досягнення небезпечних значень температурою сусіднього резервуара.

Тому, невирішеною частиною проблеми каскадного розповсюдження пожежі, викликаного тепловим впливом на сусідні резервуари, є недостатнє врахування впливу випадкових пульсацій полум'я на тепловий потік від факела.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є врахування впливу випадкового характеру теплового потоку від пожежі сусіднього резервуара на час досягнення резервуаром з нафтопродуктом критичної температури шляхом побудови математичної моделі стохастичного типу, що враховує випадкові пульсації форми полум'я.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- побудувати стохастичну модель нагріву стінки резервуара під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі;
- оцінити математичне очікування і дисперсію температури стінки резервуара;
- розв'язати систему рівнянь теплового балансу для стінки резервуара.

4. Побудова стохастичної моделі нагріву стінки резервуара під тепловим впливом пожежі

4.1. Розробка стохастичної моделі теплового впливу пожежі

В [12] побудовано рівняння теплового балансу для стінки резервуара, що нагрівається під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі. Рівняння включає в себе:

- тепловий потік випромінюванням від факела q_1 ;
- тепловий потік випромінюванням від нагрітої стінки в навколишнє середовище q_2 ;
- тепловий потік в навколишнє повітря внаслідок конвекційного теплообміну q_3 ;
- тепловий потік випромінюванням від внутрішньої поверхні стінки резервуара q_4 ;
- конвекційний теплообмін внутрішньої поверхні стінки резервуара с пароповітряною сумішшю q_5 .

Оберемо систему координат так, щоб вісь Z співпадала з віссю резервуара, що горить, а початок координат знаходився на висоті резервуара, що горить. Вісь X спрямуємо таким чином, щоб вона перетинала вертикальну вісь резервуара, що не горить (рис. 1). Таким чином, вісь резервуара, що не горить, буде перетинати вісь X у точці x_0 .

Щільність теплового потоку від факела визначається законом Стефана-Больцмана:

$$q_1 = c_0 \varepsilon_f \varepsilon_w \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{out}}{100} \right)^4 \right] \phi, \quad (1)$$

де $c_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$ – стала; ε_f , ε_w – ступені чорноти випромінюючої поверхні факела і стінки резервуара відповідно; T_f – температура поверхні факела; T_{out} – температура зовнішньої поверхні стінки резервуара; ϕ – коефіцієнт взаємного опромінення між факелом і точкою на поверхні резервуара:

$$\varphi = \frac{1}{\pi} \int_0^1 du \int_0^{2\pi} dv \times$$

$$\times \frac{u [c \cos v (x_0/R + \cos \alpha) + c \sin v \sin \alpha + z/R - c]}{\left[(u \cos v - x_0/R - \cos \alpha)^2 + (u \sin v - \sin \alpha)^2 + (c(1-u) - z/R)^2 \right]^{3/2}} \times (2)$$

$$\times [(u \cos v - x_0/R) \cos \alpha + u \sin v \sin \alpha - 1],$$

де R – радіус резервуара; α , z – полярний кут і вертикальна координата, які відповідають точці на поверхні резервуара, що нагрівається.

Щільність теплового потоку випромінюванням від розігрітої стінки в навколишнє середовище буде мати вигляд:

$$q_2 = c_0 \varepsilon_w \left[\left(\frac{T_{\text{out}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] (1 - \varphi), \quad (3)$$

де T_0 – температура навколишнього середовища.

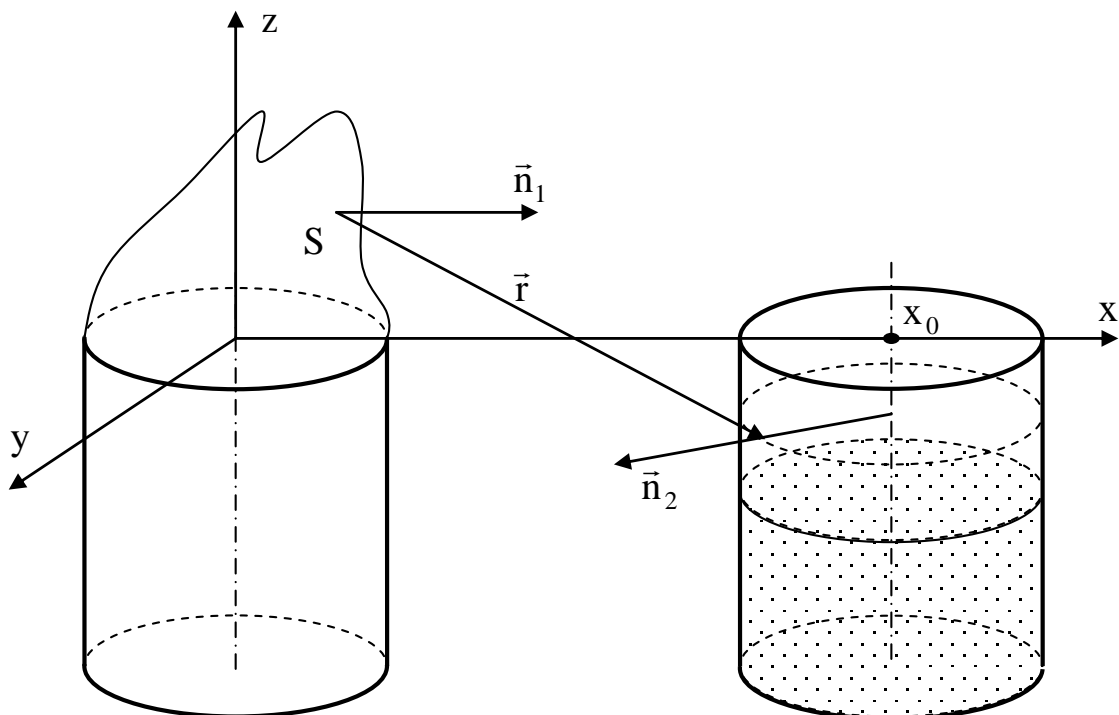


Рис. 1. Вибір системи координат

Щільність теплового потоку від внутрішньої поверхні стінки всередину резервуара:

$$q_4 = c_0 \varepsilon_w \left[\left(\frac{T_{\text{in}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right], \quad (4)$$

де T_{in} – температура внутрішньої поверхні стінки резервуара.

Внаслідок конвекційного теплообміну зовнішня і внутрішня поверхні стінки резервуара будуть втрачати тепло із щільністю:

$$q_3 = \alpha_{\text{out}}(T_{\text{out}} - T_0); \quad (5)$$

$$q_5 = \alpha_{\text{in}}(T_{\text{in}} - T_0), \quad (6)$$

де α_{out} , α_{in} – коефіцієнти конвекційного теплообміну на зовнішній і внутрішній поверхнях стінки відповідно.

В [12] показано, що температура на внутрішній і зовнішній поверхнях стінки резервуара відрізняється менше ніж на 3,5 °С. Тому для спрощення будемо вважати температуру стінки однаковою по всій товщині:

$$T = T_{\text{in}} = T_{\text{out}}. \quad (7)$$

Тоді, рівняння теплового балансу набуде вигляду:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho\delta c} (q_1 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5), \quad (8)$$

де ρ , c – густина і теплоємність сталі; δ – товщина стінки. Підставляючи вирази (1), (3–6) в (8), отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho c \delta} & \left[c_0 \varepsilon_f \varepsilon_w \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \varphi - c_0 \varepsilon_w \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] (1 - \varphi) \right] - \\ & - \frac{1}{\rho c \delta} \left[c_0 \varepsilon_w \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] + 2\alpha(T - T_0) \right], \end{aligned} \quad (9)$$

де α – коефіцієнт конвекційного теплообміну [12]:

$$\alpha = \left(15,904 - 0,0082 \frac{T + T_0}{2} \right) \left(\frac{T - T_0}{T + T_0} \right)^{1/3}. \quad (10)$$

Наявність випадкових пульсацій факела призводить до випадкового характеру коефіцієнта взаємного опромінення φ . Будемо вважати, що він описується стаціонарним нормальним процесом з математичним очікуванням. Тоді, випадковою функцією буде і температура стінки резервуара $T(t)$. Будемо також вважати її нормально розподіленою.

4.2. Побудова оцінок математичного очікування і дисперсії температури стінки резервуара

Застосуємо оператор математичного очікування до обох сторін виразу (9):

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{T}}{dt} = & \frac{c_0 \varepsilon_f \varepsilon_w}{\rho c \delta} \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \bar{\varphi} - M \left\{ \left(\frac{T}{100} \right)^4 \varphi \right\} \right] - \\ & - \frac{c_0 \varepsilon_w}{\rho c \delta} \left[M \left\{ \left(\frac{T}{100} \right)^4 (1 - \varphi) \right\} - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 (1 - \bar{\varphi}) \right] - \\ & - \frac{1}{\rho c \delta} \left[c_0 \varepsilon_w \left[M \left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] + 2M \{ \alpha(T - T_0) \} \right], \end{aligned} \quad (11)$$

де \bar{T} – математичне очікування температури стінки резервуара.

Тоді,

$$M\{T^4\} = \bar{T}^4 + 6\bar{T}^2 \sigma_T^2 + 3\sigma_T^4, \quad (12)$$

де σ_T^2 – дисперсія температури стінки резервуара. Наближено вважаючи випадкові процеси φ і T такими, що не корелюють, запишемо:

$$M\{T^4 \varphi\} = \bar{\varphi} M\{T^4\} = \bar{\varphi} (\bar{T}^4 + 6\bar{T}^2 \sigma_T^2 + 3\sigma_T^4); \quad (13)$$

$$M\{T^4 (1 - \varphi)\} = (1 - \bar{\varphi}) (\bar{T}^4 + 6\bar{T}^2 \sigma_T^2 + 3\sigma_T^4). \quad (14)$$

Також з метою спрощення наближено представимо:

$$\begin{aligned} M\{\alpha(T - T_0)\} \approx & \left(15,904(\bar{T} - T_0) - 0,0082 \frac{M\{T^2\} - T_0^2}{2} \right) \left(\frac{\bar{T} - T_0}{\bar{T} + T_0} \right)^{1/3} = \\ & = \left(15,904(\bar{T} - T_0) - 0,0082 \frac{\bar{T}^2 + \sigma_T^2 - T_0^2}{2} \right) \left(\frac{\bar{T} - T_0}{\bar{T} + T_0} \right)^{1/3}; \end{aligned} \quad (15)$$

Підстановка виразів (12–15) перетворює (11) на:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{T}}{dt} = & \frac{c_0 \varepsilon_f \varepsilon_w}{\rho c \delta} \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \frac{\bar{T}^4 + 6\bar{T}^2 \sigma_T^2 + 3\sigma_T^4}{10^8} \right] \bar{\varphi} - \\ & - \frac{c_0 \varepsilon_w}{\rho c \delta} \left[\frac{\bar{T}^4 + 6\bar{T}^2 \sigma_T^2 + 3\sigma_T^4}{10^8} - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] (1 - \bar{\varphi}) - \\ & - \frac{c_0 \varepsilon_w}{\rho c \delta} \left[\frac{\bar{T}^4 + 6\bar{T}^2 \sigma_T^2 + 3\sigma_T^4}{10^8} - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] - \\ & - \frac{2}{\rho c \delta} \left(15,904(\bar{T} - T_0) - 0,0082 \frac{\bar{T}^2 + \sigma_T^2 - T_0^2}{2} \right) \left(\frac{\bar{T} - T_0}{\bar{T} + T_0} \right)^{1/3}. \end{aligned} \quad (16)$$

Отримане диференціальне рівняння містить не лише математичне очікування температури стінки резервуара, а також її дисперсію.

Отже, для розв'язання рівняння (16) необхідно знайти оцінку дисперсії.

Для визначення дисперсії температури стінки резервуара скористаємося властивістю:

$$\frac{d\sigma_T^2}{dt} = \frac{d}{dt} \left(M(T - \bar{T})^2 \right) = 2M \left\{ (T - \bar{T}) \left(\frac{dT}{dt} - \frac{d\bar{T}}{dt} \right) \right\} = 2M \left\{ T \frac{dT}{dt} \right\} - 2\bar{T} \frac{d\bar{T}}{dt}. \quad (17)$$

Для знаходження математичного очікування, що входить до виразу (17), умножимо праву частину виразу (9) на T і застосуємо оператор математичного очікування:

$$\begin{aligned} M \left\{ T \frac{dT}{dt} \right\} &= \frac{1}{\rho c \delta} \left[c_0 \varepsilon_f \varepsilon_w \left[\bar{T} \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \frac{M\{T^5\}}{10^8} \right] \bar{\varphi} - c_0 \varepsilon_w \left[\frac{M\{T^5\}}{10^8} - \bar{T} \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] (1 - \bar{\varphi}) \right] - \\ &\quad - \frac{c_0 \varepsilon_w}{\rho c \delta} \left[\frac{M\{T^5\}}{10^8} - \bar{T} \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] - \\ &\quad - \frac{2}{\rho c \delta} \left(15,904 (M\{T^2\} - \bar{T} T_0) - 0,0082 \frac{M\{T^3\} + T_0 M\{T^2\}}{2} \right) \left(\frac{T - T_0}{T + T_0} \right)^{1/3}. \quad (18) \end{aligned}$$

З врахуванням співвідношень:

$$\begin{aligned} M\{T^3\} &= \bar{T}^3 + 3\bar{T}\sigma_T^2; \\ M\{T^5\} &= \bar{T}^5 + 10\bar{T}^3\sigma_T^2 + 15\bar{T}\sigma_T^4, \end{aligned}$$

вираз (18) перетворюється на:

$$\begin{aligned} M \left\{ T \frac{dT}{dt} \right\} &= \frac{c_0 \varepsilon_f \varepsilon_w}{\rho c \delta} \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \frac{\bar{T}^4 + 10\bar{T}^2\sigma_T^2 + 15\sigma_T^4}{10^8} \right] \bar{\varphi} \bar{T} - \\ &\quad - \frac{c_0 \varepsilon_w}{\rho c \delta} \left[\frac{\bar{T}^4 + 10\bar{T}^2\sigma_T^2 + 15\sigma_T^4}{10^8} - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] (1 - \bar{\varphi}) \bar{T} - \\ &\quad - \frac{c_0 \varepsilon_w}{\rho c \delta} \left[\frac{\bar{T}^4 + 10\bar{T}^2\sigma_T^2 + 15\sigma_T^4}{10^8} - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \bar{T} - \\ &\quad - \frac{2}{\rho c \delta} \left(15,904 (\sigma_T^2 + \bar{T}^2 - \bar{T} T_0) - 0,0082 \frac{\bar{T}^3 + 3\bar{T}\sigma_T^2 + T_0 (\sigma_T^2 + \bar{T}^2)}{2} \right) \left(\frac{T - T_0}{T + T_0} \right)^{1/3}. \end{aligned}$$

Підставляючи останній вираз в (17), отримаємо диференціальне рівняння відносно дисперсії температури:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_T^2}{dt} = & -2\bar{T} \frac{d\bar{T}}{dt} + \frac{2c_0 \varepsilon_f \varepsilon_w}{\rho c \delta} \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \frac{\bar{T}^4 + 10\bar{T}^2 \sigma_T^2 + 15\sigma_T^4}{10^8} \right] \bar{\varphi} \bar{T} - \\ & - \frac{2c_0 \varepsilon_w}{\rho c \delta} \left[\frac{\bar{T}^4 + 10\bar{T}^2 \sigma_T^2 + 15\sigma_T^4}{10^8} - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] (1 - \bar{\varphi}) \bar{T} - \\ & - \frac{2c_0 \varepsilon_w}{\rho c \delta} \left[\frac{\bar{T}^4 + 10\bar{T}^2 \sigma_T^2 + 15\sigma_T^4}{10^8} - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \bar{T} - \\ & - \frac{4}{\rho c \delta} \left(15,904(\sigma_T^2 + \bar{T}^2 - \bar{T}T_0) - 0,0082 \frac{\bar{T}^3 + 3\bar{T}\sigma_T^2 + T_0(\sigma_T^2 + \bar{T}^2)}{2} \right) \left(\frac{T - T_0}{T + T_0} \right)^{1/3}. \end{aligned} \quad (19)$$

Система диференціальних рівнянь (16), (19) описує динаміку зміни математичного очікування і дисперсії температури стінки резервуара, що нагрівається під впливом пожежі.

4.3. Розв'язання системи диференціальних рівнянь

Розв'язуючи систему рівнянь (16), (19) з початковою умовою:

$$\bar{T}(0) = T_0, \quad \sigma_T^2 = 0,$$

методом скінчених різниць, отримаємо оцінки математичного очікування і дисперсії температури стінки резервуара.

В якості приклада на рис. 2 наведено температуру верхнього краю стінки резервуара РВС-10000 (діаметром $D = 28,5$ м і висотою $H = 18$ м), оберненої в бік пожежі такого самого резервуара з нафтою. Відстань між резервуарами $0,75D$.

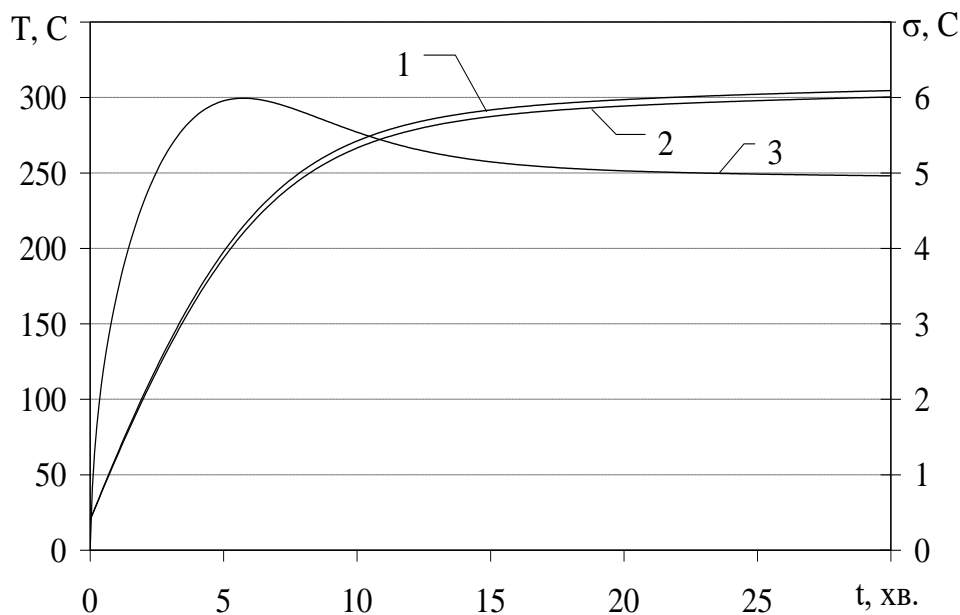


Рис. 2. Температура верхнього краю стінки резервуара РВС-10000, оберненої в бік аналогічного резервуара з нафтою, що горить: 1 – математичне очікування; 2 – детермінований розв'язок; 3 – середньоквадратичне відхилення (права вісь)

числити довірчі інтервали для температури стінки резервуара. На рис. 3 наведено довірчі інтервали для 2σ і 3σ . Це означає, що з імовірністю 0,955 і 0,997 температура стінки буде знаходитися в межах:

$$\bar{T} - 2\sigma < T < \bar{T} + 2\sigma, p = 0,955 ;$$

$$\bar{T} - 3\sigma < T < \bar{T} + 3\sigma, p = 0,997 .$$

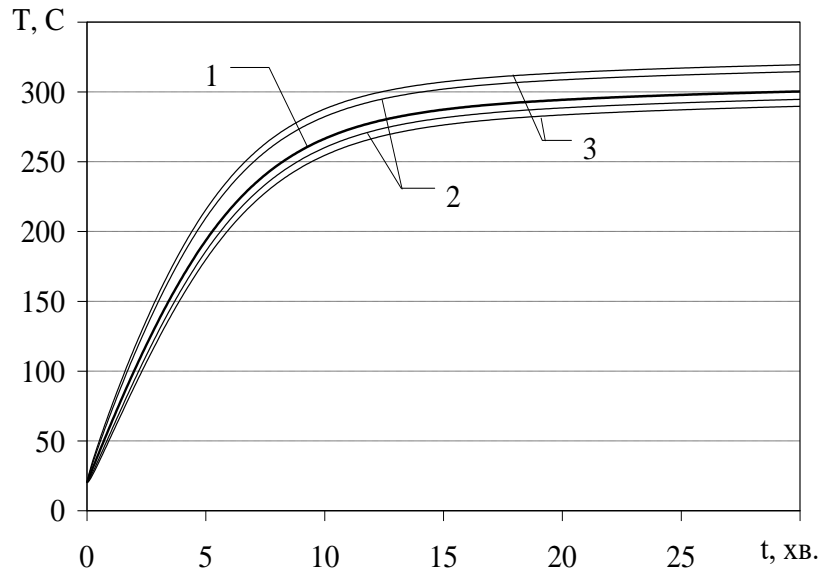


Рис. 3. Довірчі інтервали для температури верхнього краю стінки резервуара РВС-10000, оберненої в бік аналогічного резервуара з нафтою, що горить: 1 – детермінований розв’язок; 2 – довірчий інтервал 2σ ; 3 – довірчий інтервал 3σ

Отримані довірчі інтервали дозволяють уточнити детерміновану модель, показуючи вплив випадкових чинників на результат.

5. Обговорення результатів побудови стохастичної моделі нагріву стінки резервуара

Побудована модель, як і відомі детерміновані моделі, спирається на рівняння теплового балансу для стінки резервуара. Це рівняння включає в себе нагрів випромінюванням від пожежі і охолодження за рахунок:

- теплового випромінювання в навколишнє середовище і внутрішній простір резервуара;
- конвекційного теплообміну з навколишнім повітрям і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара.

Особливістю моделі є врахування випадкових пульсацій полум’я, що призводить до випадкових значень коефіцієнта взаємного опромінення і, відповідно, теплового потоку від пожежі. Це, в свою чергу, призводить до випадкового характеру температури стінки резервуара, що нагрівається під впливом пожежі.

Модель спирається на припущення про стаціонарність і нормальність випадкового процесу, що описує пульсації коефіцієнта взаємного опромінення. Шляхом застосування оператора математичного очікування до рівняння теплового балансу отримано систему нелінійних диференціальних рівнянь, що описують динаміку зміни математичного очікування і дисперсії температури стінки резервуара. Вказана система рівнянь розв’язується чисельно, а саме: методом скінчених різниць.

Аналіз залежностей на рис. 2 свідчить, що спочатку середньоквадратичне відхилення температури зростає разом з її математичним очікуванням. Потім досягає максимуму і починає спадати з уповільненням швидкості зростання математичного очікування температури стінки. Після цього математичне очікування і середньоквадратичне відхилення асимптотично наближаються до своїх граничних значень.

Розраховане математичне очікування температури на кілька градусів перевищує значення температури, яка впливає із детермінованої моделі. Причиною цього є нелінійний характер залежності температури стінки резервуара від теплового потоку пожежі. Середньоквадратичне відхилення температури знаходиться в діапазоні $(5 \div 6)$ °C (рис. 2).

Поєднання математичного очікування температури і її середньоквадратичного відхилення дозволяє визначити довірчі інтервали температури стінки резервуара. Слід зазначити, що у випадку, коли температура стінки резервуара, швидко зростаючи, досягає критичного значення, детермінована і стохастична модель дають майже однаковий прогноз часу. Наприклад, час досягнення температури 200 °C (рис. 3) складає 5,25 хв. для детермінованої моделі, а для стохастичної моделі – 4,5 хв. (верхня межа довірчого інтервалу). У випадку, коли наближення до критичного значення характеризується повільним зростанням температури, прогноз часу досягнення критичного значення може істотно відрізнятись для детермінованої і стохастичної моделей. Наприклад, час досягнення температури 300 °C (рис. 3) складає майже 30 хв. для детермінованої моделі; стохастична модель показує, що ця температура може бути досягнута вже через 14 хв. (верхня межа довірчого інтервалу 2 σ).

Таким чином, стохастична модель доповнює класичну детерміновану модель, дозволяючи визначити вплив випадкових чинників на отримані результати. Крім того, стохастичний підхід дозволяє визначити довірчі інтервали для розрахованих значень температури стінки.

Обмеженням побудованої моделі є те, що вона не враховує взаємної кореляційної функції коефіцієнта взаємного опромінення і температури стінки, зводячи коефіцієнт взаємного опромінення до білого шуму з певним математичним очікуванням. Врахування кореляційної функції дозволить не лише побудувати довірчі інтервали, в яких знаходиться температура стінки резервуара, а й визначити ймовірність досягнення температурою стінки критичного значення протягом заданого часового інтервалу.

Таким чином, перспективи подальших досліджень полягають у врахуванні кореляційної функції коефіцієнта взаємного опромінення, а також взаємної кореляційної функції коефіцієнта взаємного опромінення і температури стінки резервуара.

6. Висновки

1. Побудовано стохастичну модель нагріву стінки резервуара під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі, яка враховує випадкові пульсації форми полум'я. Модель включає в себе теплообмін випромінюванням (з факелом, навколишнім середовищем, внутрішнім простором резервуара) і конвекцією (з навколишнім повітрям і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара). Вихідними даними для моделі є закон і параметри розподілу випадкового процесу, що характеризує факел. Результатом є закон і параметри розподілу випадкового процесу, що описує температуру стінки резервуара. Обмеженням моделі є припущення про стаціонарність і розподілу коефіцієнта взаємного опромінення між факелом і резервуаром.

2. Побудовано систему двох нелінійних диференціальних рівнянь, Fire safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2022-35-1

розв'язком яких є математичне очікування і дисперсія температури стінки резервуара. На прикладі резервуара РВС-10000 з нафтою показано, що математичне очікування температури приблизно на 4 °С перевищує температуру, знайдену з використанням відповідної детермінованої моделі. Значення середньоквадратичного відхилення температури лежить в діапазоні (5÷6) °С. Наявність середньоквадратичного відхилення температури дозволяє отримати довірчі інтервали 2σ і 3σ (довірча імовірність 0,955 і 0,997 відповідно).

3. Показано, що у випадку, коли температура стінки резервуара, швидко зростаючи, досягає критичного значення, детермінована і стохастична модель дають майже однаковий прогноз часу. Навпаки, коли наближення до критичного значення характеризується повільним зростанням температури, прогноз часу досягнення критичного значення можуть істотно відрізнятися для детермінованої і стохастичної моделей. Наприклад, час досягнення температури 300 °С резервуаром РВС-10000 на відстані 0,75 D від аналогічного резервуара, що горить, складає майже 30 хв. для детермінованої моделі. Стохастична модель показує, що ця температура може бути досягнута вже через 14 хв.

Література

1. Liu J., Li D., Wang T., Chai X. A state-of-the-art research progress and prospect of liquid fuel spill fires. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 28. doi: 10.1016/j.csite.2021.101421
2. Саламов Д., Абрамов Ю. О., Басманов О. Є. Аналіз систем охолодження резервуарів в резервуарному парку з нафтопродуктами. *Проблеми пожежної безпеки*. 2018. № 43. С. 156–161. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6940>
3. Shi C., Liu W., Hong W., Zhong M., Zhang X. A modified thermal radiation model with multiple factors for investigating temperature rise around pool fire. *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 379. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.120801
4. Zhou K., Wang X. Thermal radiation modelling of pool fire with consideration on the nonuniform temperature in flame volume. *International Journal of Thermal Sciences*. 2019. Vol. 138. P. 12–23. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.12.033
5. Hiang X., Huang T., Zhuo X., Tang F., He L., Wen J. A global model for flame pulsation frequency of buoyancy-controlled rectangular gas fuel fire with different boundaries. *Fuel*. 2021. Vol. 289. doi: 10.1016/j.fuel.2020.119857
6. Deng L., Tang F., Ma X. Experimental study on flame merging probability and pulsation frequency of annular hydrocarbon pool fires with various inner and outer diameters. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 146. P. 473–478. doi: 10.1016/j.psep.2020.11.015
7. Bi Y., Yang Z., Cong H., Bi M., Gao W. Experimental and theoretical investigation on the effect of inclined surface on pool fire behavior. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. Vol. 162. P. 328–336. doi: 10.1016/j.psep.2022.03.084
8. Li M., Luo Q., Ji J., Wang C. Hydrodynamic analysis and flame pulsation of continuously spilling fire spread over n-butanol fuel under different slope angles. *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 126. doi: 10.1016/j.firesaf.2021.103467
9. 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

10. Li Y., Jiang J., Bian H., Yu Y., Zhang Q., Wang Z. Coupling effects of the fragment impact and adjacent pool-fire on the thermal buckling of a fixed-roof tank. *Thin-Walled Structures*. 2019. Vol. 144. doi: 10.1016/j.tws.2019.106309
11. 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
12. 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
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. doi: 10.1016/j.jlp.2019.103990
14. Wu Z., Hou L., Wu S., Wu X., Kiu F. The time-to-failure assessment of large crude oil storage tank exposed to pool fire. *Fire Safety Journal*. 2020. Vol. 117. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103192
15. 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

Y. Abramov, DSc, Professor, Chief Researcher of the Center
O. Basmanov, DSc, Professor, Chief Researcher of the Department
V. Oliinik, PhD, Associated Professor, Head of Department
V. Kolokolov, Lecturer of the Department
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

STOCHASTIC MODEL OF HEATING THE SHELL OF A TANK UNDER THE THERMAL EFFECT OF A FIRE

The forecasting of the consequences of emergencies caused by the fire in the vertical steel tank with oil product is considered. It takes into account the random nature of the heat flow from the fire. The model of heating of the tank shell includes radiant heat transfer from fire, to environment, to internal space of the tank; convective heat transfer to ambient air and steam-air mixture in the gas space of the tank. The initial data for the model are probability distribution and its parameters for the stochastic process that describes the fire. The result is the probability distribution and its parameters for stochastic process that describes the temperature of the tank shell. It is assumed stationarity and normality of a stochastic process that describes pulsations of the mutual irradiation coefficient. For this case a system of nonlinear first order differential equations is built. It based on the heat balance equation for an arbitrary point on the tank shell and describes the dynamics of changes of mathematical expectation and variance of temperature. The system of equations can be solved using the finite difference method. The obtained results allow specifying the deterministic model by constructing confidence intervals for the tank shell temperature. It is shown when the temperature of the tank shell reaches a critical value rapidly then deterministic and stochastic models will give almost the same result. Conversely, when temperature approaches to the critical value slowly then forecasting time of reaching the critical value will differ significantly for these types of models. For example, the time to reach a temperature of 300 °C by 10000 m³ tank is almost 30 minutes for a deterministic model. But the stochastic one shows that this temperature can be reached in 14 minutes.

Keywords: stochastic model, tank fire, fire heat impact, radiant heat transfer, convective heat transfer

References

1. Liu, J., Li, D., Wang, T., Chai, X. (2021). A state-of-the-art research progress and prospect of liquid fuel spill fires. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28. doi: 10.1016/j.csite.2021.101421

2. Salamov, J., Abramov, Y., Basmanov, O. (2018). Analysis of cooling systems of tanks in the tank farm with petroleum products. *Problems of fire safety*, 43, 156–161. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6940>
3. Shi, C., Liu, W., Hong, W., Zhong, M., Zhang, X. (2019). A modified thermal radiation model with multiple factors for investigating temperature rise around pool fire. *Journal of Hazardous Materials*, 379. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.120801
4. Zhou, K., Wang, X. (2019). Thermal radiation modelling of pool fire with consideration on the nonuniform temperature in flame volume. *International Journal of Thermal Sciences*, 138, 12–23. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.12.033
5. Hiang, X., Huang, T., Zhuo, X., Tang, F., He, L., Wen, J. (2021). A global model for flame pulsation frequency of buoyancy-controlled rectangular gas fuel fire with different boundaries. *Fuel*, 289. doi: 10.1016/j.fuel.2020.119857
6. Deng, L., Tang, F., Ma, X. (2021). Experimental study on flame merging probability and pulsation frequency of annular hydrocarbon pool fires with various inner and outer diameters. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 473–478. doi: 10.1016/j.psep.2020.11.015
7. Bi, Y., Yang, Z., Cong, H., Bi, M., Gao, W. (2022). Experimental and theoretical investigation on the effect of inclined surface on pool fire behavior. *Process Safety and Environmental Protection*, 162, 328–336. doi: 10.1016/j.psep.2022.03.084
8. Li, M., Luo, Q., Ji, J., Wang, C. (2021). Hydrodynamic analysis and flame pulsation of continuously spilling fire spread over n-butanol fuel under different slope angles. *Fire Safety Journal*, 126. doi: 10.1016/j.firesaf.2021.103467
9. 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
10. Li, Y., Jiang, J., Bian, H., Yu, Y., Zhang, Q., Wang, Z. (2019). Coupling effects of the fragment impact and adjacent pool-fire on the thermal buckling of a fixed-roof tank. *Thin-Walled Structures*, 144. doi: 10.1016/j.tws.2019.106309
11. 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
12. 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
13. 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. doi: 10.1016/j.jlp.2019.103990
14. Wu, Z., Hou, L., Wu, S., Wu, X., Kiu, F. (2020). The time-to-failure assessment of large crude oil storage tank exposed to pool fire. *Fire Safety Journal*, 117. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103192
15. 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

Надійшла до редколегії: 18.04.2022

Прийнята до друку: 13.06.2022