

МОДЕЛЮВАННЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ВОДОЮ СТІНКИ РЕЗЕРВУАРА З НАФТОПРОДУКТОМ В УМОВАХ ПОЖЕЖІ

Басманов О.Є., д.т.н., професор,

Олійник В.В., к.т.н., доцент

Національний університет цивільного захисту України

Гасіння пожеж на складах нафти і нафтопродуктів ускладнено небезпекою вибуху сусідніх з пожежею резервуарів, що спричинено тепловим впливом на них. Досягнення стінкою резервуара температури самоспалахування нафтопродукту, що міститься в ньому, перетворює стінку резервуара на джерело запалювання для парів нафтопродукту в газовому просторі резервуара. Основним способом захисту резервуарів від теплового впливу пожежі є їх охолодження водою. Для її подачі можуть бути використані кільця охолодження, змонтовані на резервуарах, стаціонарні пожежні гідромонітори або пересувна техніка. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами [1] визначає інтенсивність подачі води на охолодження стінки резервуара: $(0,2 \div 0,4)$ л/(м·с) при пожежі в сусідньому резервуарі і 1,2 л/(м·с) при пожежі в обвалуванні. Але такий підхід не враховує впливу типу рідини, що горить, напрямку і швидкості вітру, розмірів і відстані до розливу в обвалуванні на щільність теплового потоку від пожежі. Тому виникає необхідність визначення такої інтенсивності подачі води, що забезпечує охолодження стінки до безпечних значень температури. Це, в свою чергу, потребує побудови моделі охолодження стінки резервуара водою в умовах пожежі.

Мала товщина стінок резервуара (10 мм) відносно його лінійних розмірів (понад 10 м в діаметрі і в висоту) дозволяє замість тривимірного рівняння теплопровідності загального вигляду розглядати двовимірне рівняння

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{q}{c_s \rho_s \delta}; \quad 0 < z < H; \quad 0 < \varphi < 2\pi, \quad (1)$$

де $T(\varphi, z, t)$ – температура стінки резервуара у точці (φ, z) , поданої в циліндричних координатах, в момент часу t ; R, H – радіус і висота резервуара; c_s, ρ_s – питома теплоємність і густина сталі; δ – товщина стінки резервуара; q – щільність теплового потоку, що припадає на стінку. Тепловий потік на стінку резервуара обумовлений променевим і конвекційним теплообміном стінки з навколишнім середовищем, а також з водною плівкою, що стікає по стінці резервуара. При цьому щільність теплового потоку від водної плівки до стінки резервуара визначається законом Ньютона

$$q_c = \alpha_c (T_c - T), \quad (2)$$

де α_c – коефіцієнт конвекційного теплообміну між стінкою і водною плівкою; $T_c(\varphi, z, t)$ – температура водної плівки на стінці резервуара у точці (φ, z) , поданої в циліндричних координатах, в момент часу t .

В [2] отримано рівняння розподілу температури і товщини по водній плівці у вигляді:

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{q_w}{c_c \rho_c \delta_c} f(T_c, q_w) + w \frac{\partial T_c}{\partial z}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial V_s}{\partial t} = w \left[-\frac{q_w}{r_c \rho_c} (1 - f(T_c, q_w)) + \frac{\partial V_s}{\partial z} \right], \quad (4)$$

де

$$f(T_c, q_w) = \begin{cases} 0, T_c = 100^\circ \text{C} \wedge q_w \geq 0; \\ 1, T_c < 100^\circ \text{C} \vee q_w < 0; \end{cases}$$

q_w – загальна щільність теплового потоку, що припадає на водну плівку; c_c , r_c , ρ_c – питома теплоємність, питома теплота пароутворення і густина води відповідно; δ_c – товщина водної плівки; V_s – об’ємна інтенсивність зрошення стінки водою ($\text{м}^3/(\text{м} \cdot \text{с})$); w – швидкість стікання водної плівки. Рівняння (4) враховує зменшення кількості води в плівці внаслідок її кипіння. Кипіння має місце у випадку, коли температура води досягла 100°C , а температура стінки перевищує 100°C . Слід відзначити, що система рівнянь (1), (3), (4) має місце, якщо температура стінки не перевищує 105°C . При більших значеннях температури кипіння інтенсифікується, що призводить до відштовхування частини води від стінки і утворенню ділянок, не захищених водою.

Крайові умови для водної плівки на верхньому краї стінки резервуара мають вигляд

$$T_c(H, t) = T_{c0}; \quad (5)$$

$$V_s(H, t) = V_{s0}, \quad (6)$$

де T_{c0} – температура води, що подається на охолодження резервуара; V_{s0} – початкова об’ємна інтенсивність зрошення.

Отже, розподіл температур по стінці резервуара і водній плівці описується диференціальними рівняннями в частинних похідних (1), (3), (4) з крайовими умовами для водної плівки (5), (6) і початковими умовами:

$$V_s(z, 0) = 0; \quad T(z, 0) = T_0. \quad (7)$$

де T_0 – температура навколишнього середовища.

Сумісне розв’язання рівнянь (1), (3), (4) дозволяє визначити розподіл температур по стінці резервуара і водній плівці, а також об’ємну інтенсивність зрошення в кожній точці стінки в довільний момент часу.

ЛІТЕРАТУРА

1. НАПБ 05.035 – 2004. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами.
2. Basmanov, O., Oliinyk, V., Afanasenko, K., Hryhorenko, O., Kalchenko, Y. (2024). Developing the model of water cooling an oil tank in the case of fire. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 5/10 (131). 53–61. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.313827