

2. Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 №5403-VI.

3. Закон України "Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо уточнення повноважень суб'єктів забезпечення захисту, вдосконалення законодавства з питань захисту населення і територій від наслідків надзвичайних ситуацій, організацій та проведення евакуації населення, забезпечення охорони життя та здоров'я громадян» № 3441-IX від 08.11.2023.

**УДК 614.8**

## **МОДЕЛЬ НАГРІВУ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАЛЕВОГО РЕЗЕРВУАРА В УМОВАХ ПОЖЕЖІ РОЗЛИВУ**

*В.В. Олійник, к.т.н., доцент, НУЦЗ України  
О.Є. Басманов, д.т.н., професор, НУЦЗ України*

Резервуарні парки є основним місцем зберігання нафти і нафтопродуктів в процесі її переробки. Значна кількість надзвичайних ситуацій починається з аварійного розливу горючої рідини. Поява джерела запалювання у вигляді відкритого вогню або електростатичного розряду призводить до спалахування парів рідини. Внаслідок скупчення значних об'ємів горючих рідин на невеликій площі виникає небезпека каскадного розповсюдження пожежі на сусідні технологічні об'єкти та природні ландшафти. Відповідно до [1] близько 44 % масштабних пожеж, в яких спостерігався ефект «доміно», починалися саме з пожежі в резервуарі або з пожежі розливу. Згідно з дослідженням [2], близько половини пожеж в резервуарних парках почалися внаслідок появи відкритого вогню. Ще 10 % сталися внаслідок електростатичних розрядів та блискавки, інші – внаслідок помилок операторів або відмови обладнання.

Основним способом зберігання нафти і нафтопродуктів є вертикальні сталеві резервуари. Небезпека теплового впливу пожежі на них пов'язана з розгерметизацією фланцевих з'єднань, втратою міцності сталевими конструкціями та нагрівом окремих частин резервуара до температури самоспалахування парів рідини, що зберігається в ньому. Нагрів сталевих конструкцій до температури самоспалахування рідини перетворює їх на джерело запалювання. Це здатне призвести до вибуху пароповітряної суміші в газовому просторі резервуара або виникненню горіння парів на виході із дихальних пристроїв.

Характерні розміри вертикальних сталевих резервуарів для зберігання нафти і нафтопродуктів ємністю (0,7÷20) тис. м<sup>3</sup> складають (10÷40) м в діаметрі і (9÷18) м по висоті. При цьому товщина стінки і покрівлі не перевищує 10 мм, тобто є на 3 порядки меншою порівняно з висотою та діаметром. Це дозволяє вважати температуру однаковою по всій товщині покрівлі резервуара. Тоді розподіл температури по стінці резервуара буде описуватися двовимірним рівнянням теплопровідності, яке в циліндричних координатах має вигляд [3]:

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

де  $T_w(\varphi, z, t)$  – температура стінки резервуара в точці з координатами  $(\varphi, z)$  в момент часу  $t$ ;  $a$  – коефіцієнт теплопровідності сталі;  $R, H$  – радіус і висота резервуара (рис. 1);  $c_s, \rho_s$  – питома теплоємність та питома густина сталі;  $\delta_w$  – товщина стінки резервуара;  $q_w = q_w(\varphi, z, t)$  – щільність теплового потоку в даній точці на стінці резервуара внаслідок теплообміну з пожежею, навколишнім середовищем і внутрішнім простором резервуара.

Розподіл температури по покрівлі резервуара описується рівнянням:

$$\frac{\partial T_r}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_r}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{q_r}{c_s \rho_s \delta_r}; \quad 0 < r < R; \quad 0 < \varphi < 2\pi,$$

де  $T_r(r, \varphi, t)$  – температура покрівлі резервуара у точці з координатами  $(r, \varphi)$  в момент часу  $t$ ;  $\delta_r$  – товщина покрівлі резервуара;  $q_r = q_r(r, \varphi, t)$  – щільність теплового потоку в даній точці на покрівлі резервуара внаслідок теплообміну з пожежею, навколишнім середовищем і внутрішнім простором резервуара.

Щільність теплового потоку до покрівлі і верхньої частини стінки, що не контактує з нафтопродуктом у резервуарі, визначається сумою:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7,$$

де  $q_1$  – щільність теплового потоку випромінюванням від пожежі;  $q_2$  – щільність теплового потоку випромінюванням в навколишнє середовище;  $q_3$  – щільність теплового потоку конвекційним теплообміном з навколишнім повітрям і продуктами горіння;  $q_4$  – щільність теплового потоку випромінюванням від внутрішньої поверхні стінки через газовий простір резервуара;  $q_5$  – щільність теплового потоку випромінюванням від внутрішньої поверхні покрівлі резервуара;  $q_6$  – щільність теплового потоку випромінюванням від поверхні рідини;  $q_7$  – щільність теплового потоку внаслідок конвекційного теплообміну з пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара.

Щільність теплового потоку до нижньої частини стінки, що контактує з нафтопродуктом у резервуарі, представлена сумою:

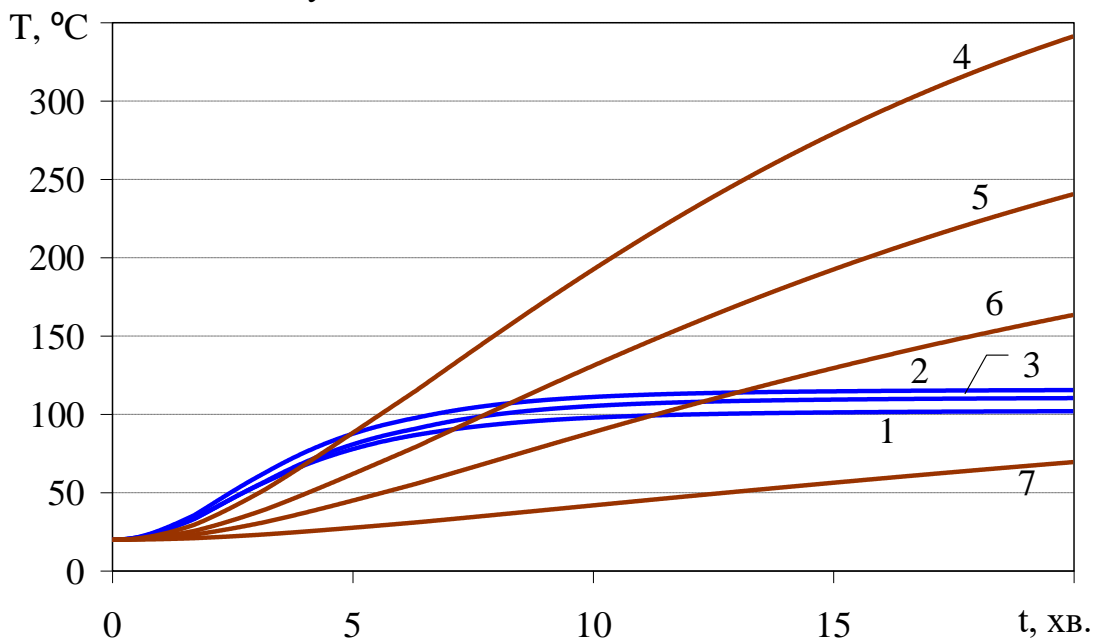
$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_8,$$

де  $q_8$  – щільність теплового потоку внаслідок конвекційного теплообміну з рідиною в резервуарі.

В якості приклада розглянемо горіння розливу дизельного палива, що витікає з інтенсивністю 2 л/с на поверхню з кутом нахилу 3°. При цьому напрям нахилу співпадає з віссю  $X$ , а початок координат розташований у точці витоку

рідини. Резервуар РВС-5000 (висота  $H = 12$  м, діаметр  $D = 23$  м) розташований на відстані 6 м від точки витоку рідини в напрямку осі  $Y$ . Вітер відсутній. Резервуар заповнений дизельним паливом до рівня 4 м.

На рис. 1 наведено динаміку зміни температури поверхні резервуара, оберненої в бік пожежі. Аналіз наведених графічних залежностей свідчить, що частина стінки резервуара, розташована вище рівня рідини у резервуарі, досягає більших значень температури, ніж частина стінки, що контактує з рідиною. Це відбувається незважаючи на те, що на нижню частину резервуара припадає більша щільність теплового потоку від пожежі, внаслідок того, що вона розташована ближче до полум'я.



**Рисунок 1 – Динаміка зміни температури частини стінки резервуара, оберненої в бік пожежі ( $\theta = 290^\circ$ ) на різних висотах: 1 –  $z = 0$ ; 2 –  $z = 2$  м; 3 –  $z = 4$  м; 4 –  $z = 6$  м; 5 –  $z = 8$  м; 6 –  $z = 10$  м; 7 –  $z = 12$  м**

Враховуючи, що температура самоспалахування парів дизельного палива складає близько  $300^\circ\text{C}$ , можна зробити висновок, що верхня частина стінки, розташована вище рівня рідини в резервуарі, нагрівається до небезпечних значень температури. Це означає її перетворення у джерело запалювання для парів бензину в резервуарі і можливість вибуху парів у газовому просторі резервуара, якщо концентрація парів знаходиться в межах між нижньою і верхньою концентраційними межами розповсюдження полум'я. При цьому в окремих точках стінки температура досягає величини  $300^\circ\text{C}$  через 16,5 хв.

Опуклість донизу графіків залежностей на початковому етапі (рис. 1) пов'язана з тим, що відбувається збільшення площі горіння внаслідок розтікання рідини, а значить, і щільності теплового потоку на стінку резервуара. З прогрівом стінки і наближенню площі горіння до максимального значення опуклість графіків змінюється на протилежну і розподіл температури по стінці резервуара асимптотично наближається до свого граничного значення.

Частина стінки, що знаходиться нижче рівня рідини в резервуарі, досягає максимального значення температури близько 115 °С, що не становить загрозу вибуху або горіння парів дизельного палива.

Охолоджувальна дія нафтопродукту, залитого в резервуар, залежить, головним чином, від його в'язкості. Порівняння динаміки зміни температури нижньої частини стінки резервуара, оберненої в бік пожежі, для різних видів нафтопродукту наведено на рис. 2.

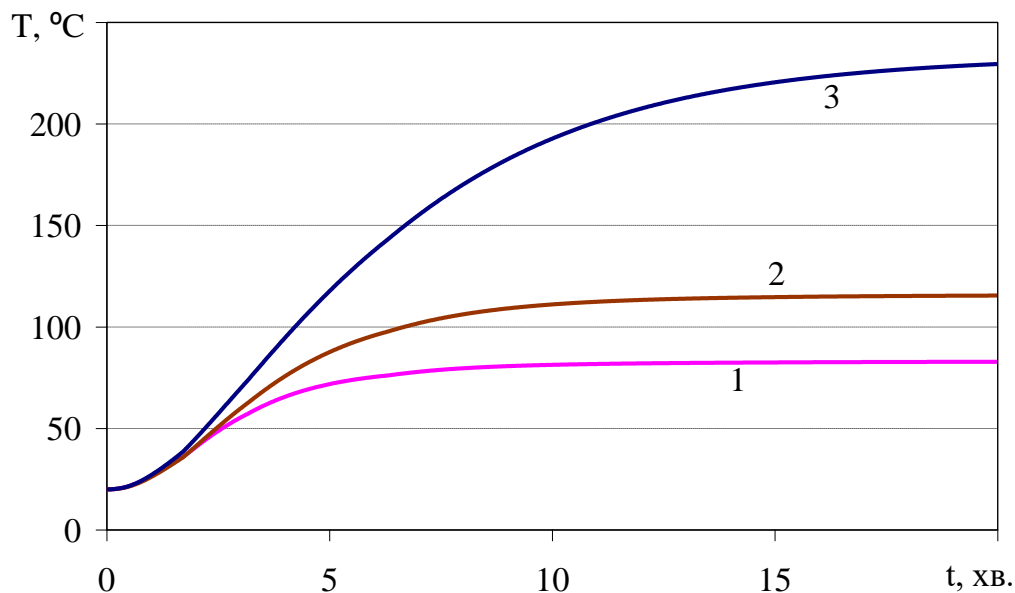


Рисунок 2 – Динаміка зміни температури нижньої частини стінки резервуара, оберненої в бік пожежі, в залежності від нафтопродукту у резервуарі: 1 – бензин; 2 – дизельне паливо; 3 – мазут

Аналіз залежностей, наведених на рис. 2, свідчить, що найбільший охолоджувальний ефект має бензин (кінематична в'язкість  $\nu = 0,6 \text{ мм}^2/\text{с}$ ), а найменший – мазут ( $\nu = 80 \text{ мм}^2/\text{с}$ ).

Запропонована модель теплового впливу пожежі розливу горючої рідини на резервуар з нафтопродуктом може бути використана як при проектуванні систем охолодження, так і в оперативному режимі. З практичної точки зору розроблена модель є основою для побудови системи підтримки прийняття рішення керівником гасіння пожежі. Маючи застосунок, який реалізує вказану модель, керівник гасіння пожежі після проведення розвідки може прийняти рішення щодо охолодження резервуарів і визначити граничний час початку охолодження.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Reniers G., Cozzani V. Features of Escalation Scenarios. Domino Effects in the Process Industries. 2013. P. 30-42. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8>