

**СЕКЦІЯ 1. ПОЖЕЖНА ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ**

*О.С. Басманов, д.т.н., професор, Національний університет цивільного захисту України*  
*В.В. Олійник, к.т.н., доцент, Національний університет цивільного захисту України*

**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ НА РЕЗЕРВУАР З НАФТОПРОДУКТОМ**

Значна кількість надзвичайних ситуацій, що виникають при транспортуванні, переробці і зберіганні нафти і нафтопродуктів, починається з аварійного розливу рідини [1]. Основною небезпекою при цьому є поява джерела запалювання і спалахування парів рідини над розливом. Складність локалізації і ліквідації таких пожеж обумовлена тепловим впливом пожежі на сусідні технологічні об'єкти і, зокрема, на ємності з горючими рідинами. Якщо аварійний розлив і спалахування відбуваються на зливно-наливних естакадах, то під тепловий вплив можуть потрапити не лише залізничні цистерни, а й резервуари з нафтопродуктами. Враховуючи, що типовий резервуар містить тисячі тонн горючої рідини, така можливість не може бути залишена поза увагою.

Однією із особливостей нагріву стінки ємності з горючою рідиною (рис. 1) є те, що її нижня частина контактує з рідиною у резервуарі (змочена частина стінки), а верхня частина контактує з пароповітряною сумішшю в газовому просторі ємності (суха частина стінки).

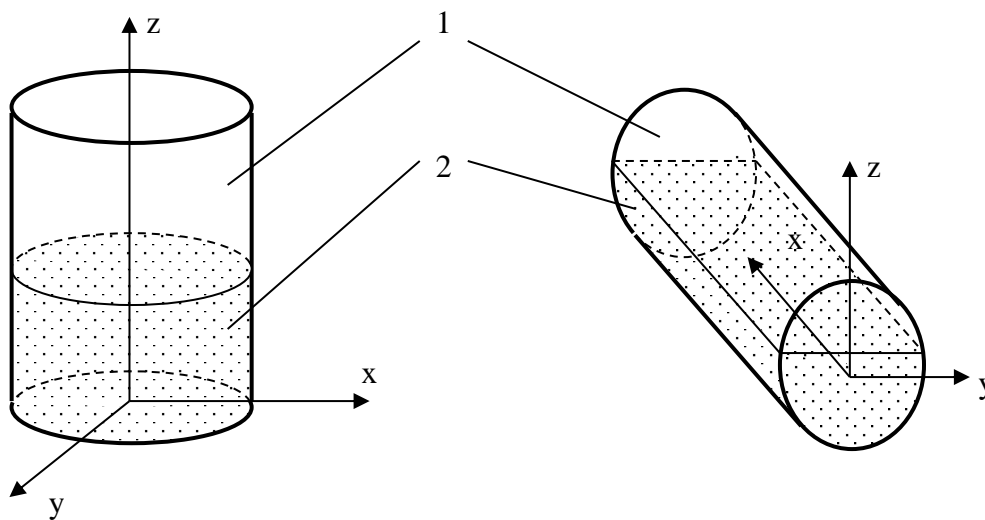


Рис. 1. Суха (1) та змочена (2) частини стінки ємності з рідиною

При побудові моделі теплового впливу пожежі розливу на ємність з горючою рідиною (залізнична цистерна або вертикальний сталевий резервуар типу РВС) будемо виходити з наступних припущень.

1. Зовнішня поверхня стінки ємності приймає участь в променевому теплообміні з поверхнею факела і навколишнім середовищем, а також конвекційному теплообміні з повітряним середовищем.

2. Внутрішня поверхня сухої частини стінки приймає участь в променевому теплообміні з поверхнею рідини, залитої в ємність, та іншими точками на внутрішній поверхні стінки, а також в конвекційному теплообміні з пароповітряною сумішшю в газовому просторі ємності.

3. Внутрішня поверхня змоченої частини стінки приймає участь в конвекційному теплообміні з рідиною, залитою в ємність.

4. Температура на зовнішній і внутрішній поверхнях стінки є однаковою.

5. Тепло розповсюджується по стінці ємності внаслідок теплопровідності матеріалу стінки (сталі).

Припущення 4 спирається на низку робіт, в яких досліджено розподіл температур по глибині стінки ємності. Зокрема, в [2] показано, що різниця температур на внутрішній і зовнішній поверхні сталеві стінки, товщиною 8 мм, не перевищує 1,5° в той час, як температура стінки перевищує 250° С. Вказані результати мають місце внаслідок малої товщини стінки і високої теплопровідності сталі.

Рівняння теплопровідності всередині поверхні вертикального сталевого резервуара в циліндричній системі координат має вигляд

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

де  $T(r, \varphi, z)$  – температура стінки резервуара;  $r, \varphi$  – радіус-вектор і полярний кут відповідно;  $H$  – висота резервуара;  $R$  – радіус резервуара;  $a$  – коефіцієнт теплопровідності сталі:

$$a = \frac{\lambda_c}{c_c \rho_c};$$

$\lambda_c, c_c, \rho_c$  – коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт теплоємності та густина сталі відповідно.

Припущення про однакову температуру вздовж товщини стінки для вертикального сталевого резервуара перетворює рівняння (1) на

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right); 0 < r < R; 0 < \varphi < 2\pi, \quad (3)$$

де рівняння (2) описує розподіл температур по стінці резервуара, а (3) – по його покрівлі. Із врахуванням теплових потоків, що припадають на поверхню резервуара рівняння (2) і (3) набудуть вигляду

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{q}{c_c \rho_c \delta}; 0 < z < H; 0 < \varphi < 2\pi; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{q}{c_c \rho_c \delta}; 0 < r < R; 0 < \varphi < 2\pi, \quad (5)$$

де  $q$  – щільність теплового потоку, що припадає на дану точку поверхні резервуара;  $\delta$  – товщина стінки (або покрівлі) резервуара. Аналогічно, для залізничної цистерни рівняння теплового балансу мають вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{q}{c_c \rho_c \delta}; 0 < x < L; 0 < \varphi < 2\pi; \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{q}{c_c \rho_c \delta}; 0 < r < R; 0 < \varphi < 2\pi, \quad (7)$$

де рівняння (6) відповідає розподілу температур по циліндричній частині стінки цистерни, а рівняння (7) – по основам циліндра;  $L$  – довжина цистерни;  $R$  – її радіус.

Відзначимо, що щільність теплового потоку  $q$ , що входить до рівнянь (4)–(7), є різною для різних точок стінки ємності. Її величина визначається розташуванням осередку горіння відносно ємності, а також тим, чи контактує стінка в даній точці з рідиною чи з пароповітряною сумішшю в газовому просторі ємності. При горінні розливу горючої рідини на поверхні землі найбільша щільність теплового потоку припадає на нижню частину ємності. Але ця частина стінки інтенсивно охолоджується внаслідок контакту з рідиною всередині резервуара (рис. 1) і тому її температура не досягає небезпечного значення. На суху частину стінки припадає дещо менша щільність теплового потоку, але охолоджувальна дія з боку пароповітряної суміші на 1-2 порядки менша порівняно з охолоджувальною дією рідини. Саме нагрів сухої частини стінки до температури смоспалахування парів рідини може призвести до розповсюдження пожежі на цю ємність. Отже, найбільшу небезпеку становить нагрів сухої частини стінки ємності.

Для практичного використання отриманої моделі необхідно розв'язати диференціальні рівняння (4)–(5) або (6)–(7) із відповідними крайовими та початковими умовами. Для цього може бути застосованим метод скінчених різниць. Для цього циліндрична та кругова частина покрівлі ємності покривається сіткою. В її вузлах проводиться апроксимація похідної за часом і за змінними  $r$ ,  $z$ ,  $x$ ,  $\varphi$ , що дозволяє перейти до рівнянь у скінчених різницях.

Отримані результати можуть бути використані для визначення наслідків теплового впливу пожежі на вертикальний сталевий резервуар або залізничну цистерну з горючою рідиною.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Raja S., Tauseef S. M., Abbasi T., Abbasi S. A. Risk of Fuel Spills and the Transient Models of Spill Area Forecasting // Journal of Failure Analysis and Prevention. 2018. Vol. 18 (2). P. 445-455. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11668-018-0429-1>
2. 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: <https://10.52363/2524-0226-2022-35-18>

*O. Basmanov, DSc., professor, National University of Civil Defence of Ukraine*  
*V. Oliinik, PhD., associate professor, National University of Civil Defence of Ukraine*

#### **MODELING THE THERMAL EFFECT OF A FIRE ON AN OIL TANK**

Consolidation of chemical production leads to the accumulation of flammable liquids on a relatively small area. Despite the safety measures taken, accidents still occur, characterized by a "domino" effect. A significant percentage of such accidents begin with the spillage of flammable liquid and its ignition. The heat flow from the fire to the neighboring technological facilities can lead to the cascading spread of the fire to them due to the heating of the metal structures to the self-ignition temperature of the combustible liquids contained in them. In the work, a model of the thermal effect of a fire on a container with a flammable liquid is built. A vertical steel tank and a railway tank are considered as such containers. The model is based on a parabolic differential equation that describes the heat distribution of the container surface. The temperature along the thickness of the surface of the container is assumed to be the same, which allows to simplify the equation. The model takes into account the heat exchange with the fire, the environment, the liquid and the vapor-air mixture in the container. For practical use of the model, the finite difference method can be applied. This allows you to find the temperature distribution at any time and determine the need to protect the container.