

УДК 519.6

НАГРІВ ПОКРІВЛІ РЕЗЕРВУАРА ПІД ТЕПЛОВИМ ВПЛИВОМ ПОЖЕЖІ

Максим Максименко

О.С. Басманов, доктор технічних наук, професор
Національний університет цивільного захисту України

Побудовано модель нагріву покрівлі вертикального сталевго резервуара під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі. Модель враховує променевий і конвекційний теплообмін з факелом, навколишнім середовищем, газовим простором резервуара. Враховано впливу вітру, що проявляється в нахилі факела і зміні режиму конвекції на вимушену.

Ключові слова: пожежа в резервуарі, теплообмін, нагрів покрівлі.

HEATING OF THE TANK ROOF UNDER THE THERMAL INFLUENCE OF FIRE

Maksym Maksymenko

O.Y. Basmanov, Doctor of Technical Sciences, Professor
National University of Civil Defence of Ukraine

A model of the heating of the roof of a vertical steel tank under the thermal influence of a fire in a nearby tank was built. The model takes into account radiation and convection heat exchange with the fire, environment, and the gas space of the tank. The influence of the wind, which leads to inclination of the fire and the change of the convection mode to forced convection, is taken into account.

Keywords: tank fire, heat exchange, roof heating.

Розповсюдження тепла в глибину покрівлі описується одновимірним рівнянням теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \delta, \quad t > 0, \quad (1)$$

де $T(x,t)$ – температура у точці x в момент часу t ; δ – товщина покрівлі; a – коефіцієнт теплопровідності:

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

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 :

$$T(x,0) = T_0, \quad 0 \leq x \leq \delta, \quad (2)$$

Крайова умова на зовнішній поверхні покрівлі буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = & -\frac{c_0 \varepsilon_f \varepsilon_w}{\lambda} \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{out}}{100} \right)^4 \right] \varphi + \frac{c_0 \varepsilon_w}{\lambda} \left[\left(\frac{T_{out}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] (1 - \varphi) + \\ & + \frac{\alpha_{out}}{\lambda} (T_{out} - T_0), \end{aligned} \quad (3)$$

де $c_0 = 5,67 \frac{Bm}{m^2 K^4}$ – стала; ε_f , ε_w – ступіні 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; T_0 – температура навколишнього середовища; α_{out} – коефіцієнт конвекційного теплообміну з навколишнім повітрям.

Крайова умова на внутрішній поверхні покрівлі:

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

де α_{in} – коефіцієнт конвекційного теплообміну з пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара.

Таким чином, диференціальне рівняння параболічного типу (1) разом з крайовими умовами (3) і (4), а також початковою умовою (2) описують динаміку зміни температури в покрівлі вертикального сталевго резервуара.

Коефіцієнт взаємного опромінення між довільною точкою і випромінюючою поверхнею полум'я визначається формулою [1, с. 241]

$$\varphi = \frac{1}{\pi} \iint_S \frac{\cos \psi_1 \cos \psi_2}{r^2} dS, \quad (5)$$

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 (5) набуде вигляду:

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

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:

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

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.

Для коефіцієнта конвекційного теплообміну з навколишнім повітрям за умови відсутності вітру буде мати місце співвідношення [2, с. 240]:

$$\alpha_{out} = 0,176 \lambda_f \left(\frac{2g \text{Pr}}{v^2} \right)^{1/3} \left(\frac{T - T_0}{T + T_0} \right)^{1/3}, \quad (6)$$

де λ_f , v , Pr – коефіцієнт теплопровідності, кінематична в'язкість і число Прандтля повітряного середовища; g – прискорення вільного падіння.

Коефіцієнт конвекційної тепловіддачі в пароповітряну суміш набуде вигляду [2, с. 240]:

$$\alpha_{in} = 0,095 \lambda_f \left(\frac{2g \text{Pr}}{v^2} \right)^{1/3} \left(\frac{T - T_0}{T + T_0} \right)^{1/3}. \quad (7)$$

За наявності вітру має місце співвідношення [2, с. 241]:

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

де μ_f , μ_w – динамічна в'язкість повітряного середовища при температурі повітряного середовища і температурі поверхні відповідно.

Підстановка коефіцієнта взаємного опромінення (5) і коефіцієнтів конвекційного теплообміну (6)–(8) в (3), (4) дозволяє повністю визначити крайові умови і розв'язати задачу (1)–(4) щодо визначення розподілу температур всередині покрівлі резервуара.

Література

1. 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.

2. Максименко М.В. Модель нагріву покрівлі резервуара під впливом пожежі в сусідньому резервуарі // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. 2 (36). С. 233-247.

References

1. Basmanov O., Maksymenko M. Modeling the thermal effect of fire to the adjacent tank in the presence of wind. Problems of Emergency Situations. 2022. 1 (35). P. 239-253.

2. Maksymenko M. Model of tank roof heating under the influence of a fire in an adjacent tank. Problems of Emergency Situations. 2022. 2 (36). P. 233-247.