

*Д.О. Саламов, ад'юнкт, НУЦЗУ,  
Ю.О. Абрамов, д.т.н., проф., головн.н.с., НУЦЗУ,  
О.Є. Басманов, д.т.н., проф., головн.н.с., НУЦЗУ*

## **МОДЕЛЬ ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЇ ДІЇ ВОДНОЇ ПЛІВКИ, ЩО СТІКАЄ ПО СТІНЦІ РЕЗЕРВУАРА, ПРИ ПОЖЕЖІ РОЗЛИВУ ГОРЮЧОЇ РІДИНИ В ОБВАЛУВАННІ**

Побудовано модель охолоджувальної дії водної плівки, що стікає по стінці резервуара, який нагрівається під тепловим впливом пожежі горючої рідини в обвалуванні резервуара. Модель враховує радіаційні і конвекційні складові теплового потоку від пожежі до стінки резервуара. Модель може бути використана для розрахунку необхідної інтенсивності подачі води на охолодження резервуара.

**Ключові слова:** резервуар з нафтопродуктом, пожежа в обвалуванні, система охолодження.

**Постановка проблеми.** Одним із можливих сценаріїв пожежі в резервуарному парку є розлив і горіння нафтопродукту в обвалуванні резервуара. Такий тип пожеж є одним з найскладніших внаслідок загрози розповсюдження пожежі, як на цей резервуар, так і на сусідні з ним. Основним засобом захисту резервуарів від теплового впливу пожежі є подача води на їх стінки. Однією з проблем при цьому є визначення такої інтенсивності подачі води, яка забезпечувала би охолодження резервуара до безпечної температури.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В Інструкції щодо гасіння пожеж в резервуарах з нафтою і нафтопродуктами [2] наведено нормативну інтенсивність подачі води на охолодження резервуарів при пожежі в резервуарному парку. Але в роботі [2] на прикладі резервуара РВС-5000, який горить, показано, що необхідна інтенсивність подачі води на його охолодження залежить від виду горючої рідини і висоти сухої стінки резервуара (частини стінки, що не контактує з нафтопродуктом всередині резервуара). Наведені розрахунки показують, що при використанні пересувної техніки в залежності від вказаних умов інтенсивність подачі води має бути в діапазоні  $(0,22 \div 1,1)$  л/м·с, в той час як нормативна складає 0,8 л/м·с. В експериментальній роботі [3] на прикладі охолодження сталеві плити водою досліджено вплив інтенсивності подачі води на температуру поверхні плити, але узагальнення, які б дозволили застосувати отримані результати на випадок пожежі в обвалуванні в роботі відсутні.

В роботі [4] побудовано модель охолодження резервуара водною плівкою, що стікає по його стінці. При цьому розглядається лише передача тепла випромінюванням від пожежі в обвалуванні. Але особливістю пожежі в обвалуванні є значно більший діапазон варіювання величини теплового потоку від пожежі порівняно з випадком горіння в сусідньому резервуарі, що обумовлено можливістю різного розташування осередку горіння відносно резервуара, а також площі горіння [5].

В роботі [6] побудовано модель теплового впливу пожежі розливу горючої рідини в обвалуванні на резервуар, яка враховує конвекційний і променевий теплообмін. В роботі отримано диференціальне рівняння нагріву елементарної площадки на сухій стінці резервуара, що нагрівається під тепловим впливом пожежі

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{c_0 \varepsilon_s \varepsilon_w}{\rho_w \delta_w c_w} \left[ \left( \frac{T_s}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \psi + \frac{c_0 \varepsilon_w}{\rho_w \delta_w c_w} \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] (1 - \psi) + \frac{\alpha_2 (T_f - T_w)}{\rho_w \delta_w c_w} + \frac{c_0 \varepsilon_w^2}{\rho_w \delta_w c_w} \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] + \frac{\alpha_5 (T_0 - T_w)}{\rho_w \delta_w c_w}, \quad (25)$$

де  $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$  – стала;  $T_w$  – температура елементарної площадки на сухій стінці резервуара;  $T_s$  – температура випромінюючої поверхні факела;  $T_0$  – температура навколишнього середовища;  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_w$  – ступіні чорноти поверхні факела і стінки резервуара відповідно;  $\rho_w$ ,  $c_w$ ,  $\delta_w$  – густина, питома теплоємність і товщина стінки відповідно;  $\alpha_2$  – коефіцієнт конвекційного теплообміну між стінкою резервуара і повітрям;  $\alpha_5$  – коефіцієнт конвекційного теплообміну між стінкою резервуара і пароповітряною сумішшю у газовому просторі резервуара. В якості початкової умови для рівняння (25) прийнято

$$T_w(0) = T_0.$$

Але охолодження стінки в цій роботі не розглянуто. Аналізу характеристик водної плівки, що стікає по стінці резервуара присвячено роботу [7]. В ній зокрема показано, що товщина  $\delta$  водної плівки, яка стікає по стінці резервуара, може бути представлена виразом

$$\delta \cong 0,055I^{0,6}, \quad (26)$$

де  $I$  – інтенсивність подачі води на охолодження, л/(м·с). Причому похибка такої апроксимації не перевищує 5%. Швидкість руху водної плівки  $w_c$  визначається співвідношенням

$$w_c = \frac{I}{\delta} \cong 18,2I^{0,4}, \quad (27)$$

а коефіцієнт конвекційного теплообміну  $\alpha_c$  між водною плівкою і стінкою апроксимований виразом

$$\alpha_c \cong (283,53T_c - 45098)I^{0,25}, \quad (28)$$

де  $T_c$  – температура води. Однак тепловий баланс стінки резервуара в умовах

теплового впливу пожежі і охолодження водою в роботі не розглядається.

**Постановка завдання та його рішення.** Метою роботи є побудова моделі охолоджувальної дії водної плівки, що стікає по стінці резервуара, який нагрівається під тепловим впливом пожежі в обвалуванні.

Будемо вважати, що водна плівка є прозорою для теплового випромінювання від факела, внаслідок чого теплове випромінювання нагріває стінку резервуара і не нагріває водну плівку.

Розглянемо рух елементарного об'єму води  $\Delta V = \Delta S \delta$  по стінці, положення якого описується вертикальною координатою  $z(t)$ ;  $\Delta S$  – площа поверхні, що контактує зі стінкою резервуара (рис. 1). Швидкість руху є сталою і визначається формулою (27).

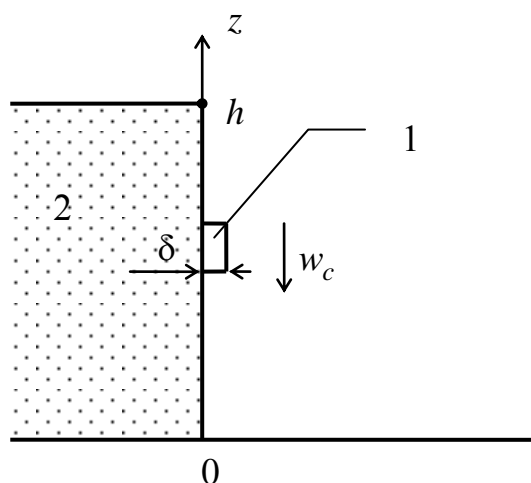


Рис. 1. Рух елементарного об'єму води (1) по стінці резервуара (2)

В початковий момент часу  $t = 0$  елементарний об'єм починає рух від верхньої частини стінки:

$$\begin{aligned} z(0) &= h, \\ T_c(0) &= T_0, \end{aligned}$$

де  $h$  – висота сухої стінки резервуара;  $T_0$  – початкова температура води, яка прийнята рівною температурі навколишнього середовища.

За малий проміжок часу  $dt$  елементарний об'єм води отримує тепло від стінки

$$dQ_w = \alpha_c (T_w(z, t) - T_c(t)) \Delta S dt \quad (29)$$

і від навколишнього повітря

$$dQ_f = \alpha_f (T_f(z) - T_c(t)) \Delta S dt, \quad (30)$$

де  $T_f(z)$  – температура повітряних мас, з якими контактує водна плівка;  $\alpha_f$  – коефіцієнт конвекційного теплообміну між водною плівкою і повітрям. Цей повітряний потік може біти обумовлений, як висхідними кон-

векційними потоками над осередком горіння, так і вітром.

Внаслідок невеликої товщини плівки і розвиненої турбуленції, отримане тепло рівномірно розподіляється по всій її товщині, збільшуючи температуру елементарного об'єму на величину  $dT_c$

$$dQ_w + dQ_f = \delta \Delta S \rho_c c_c dT_c, \quad (31)$$

де  $c_c$ ,  $\rho_c$  – теплоємність і густина води відповідно. Об'єднуючи вирази (29)-(31), отримаємо

$$\delta \rho_c c_c dT_c = [\alpha_c (T_w(z, t) - T_c(t)) + \alpha_f (T_f(z) - T_c(t))] dt. \quad (32)$$

За проміжок часу  $dt$  елементарний об'єм води пройде шлях  $dz = w_c dt$ . Підставляючи це співвідношення в (32), отримаємо

$$\delta \rho_c c_c dT_c = [\alpha_c (T_w(z, t) - T_c(t)) + \alpha_f (T_f(z) - T_c(t))] \frac{dz}{w_c}. \quad (33)$$

З практичної точки зору важливими є стаціонарні розподіли температур по стінці резервуара і водній плівці. Тобто граничні температури стінки і плівки, до яких будуть прямувати відповідні температури незалежно від їх початкового розподілу. Оскільки коефіцієнт конвекційної тепловіддачі від стінки резервуара в водну плівку приймає значення порядку  $(10^3 \div 10^4) \text{ Вт/м}^2\text{К}$  [7], то тривалість перехідних процесів буде незначною.

Визначимо стаціонарні розподіли. Припустимо, що на стінці і в водній плівці має місце стаціонарний розподіл температур:  $T_w(z)$  і  $T_c(z)$  відповідно. Тоді рівняння (33) набуде вигляду

$$\frac{dT_c}{dz} = \frac{1}{\rho_c c_c I} [\alpha_c (T_w(z) - T_c(z)) + \alpha_f (T_f(z) - T_c(z))], \quad 0 < z < h, \quad (34)$$

де враховано  $I = \delta w_c$ . Отже, стаціонарний розподіл температур у водній плівці описується диференціальним рівнянням (34) з початковою умовою

$$T_c(h) = T_0. \quad (35)$$

Рівняння (34) містить в собі стаціонарний розподіл температур по стінці  $T_w(z)$ . Для його визначення запишемо рівняння теплового балансу стінки резервуара в умовах охолодження її водою. Для цього достатньо в рівнянні (25) замінити доданок  $\frac{\alpha_2 (T_f - T_w)}{\rho_w \delta_w c_w}$ , який відповідає за конвек-

ційний теплообмін з повітряним потоком, на доданок  $\frac{\alpha_c (T_c - T_w)}{\rho_w \delta_w c_w}$ ,

буде відповідати конвекційному теплообміну стінки з водною плівкою

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{c_0 \varepsilon_s \varepsilon_w}{\rho_w \delta_w c_w} \left[ \left( \frac{T_s}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \psi + \frac{c_0 \varepsilon_w}{\rho_w \delta_w c_w} \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] (1 - \psi) + \frac{\alpha_c (T_c - T_w)}{\rho_w \delta_w c_w} + \frac{c_0 \varepsilon_w^2}{\rho_w \delta_w c_w} \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] + \frac{\alpha_5 (T_0 - T_w)}{\rho_w \delta_w c_w}. \quad (36)$$

Врахування того факту, що при стаціонарному розподілі температур  $\frac{dT_w}{dt} = 0$ , перетворює диференціальне рівняння (36) на алгебраїчне рівняння, відносно  $T_w(z)$

$$\frac{c_0 \varepsilon_s \varepsilon_w}{\rho_w \delta_w c_w} \left[ \left( \frac{T_s}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w(z)}{100} \right)^4 \right] \psi + \frac{c_0 \varepsilon_w}{\rho_w \delta_w c_w} \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w(z)}{100} \right)^4 \right] (1 - \psi) + \frac{\alpha_c (T_c - T_w(z))}{\rho_w \delta_w c_w} + \frac{c_0 \varepsilon_w^2}{\rho_w \delta_w c_w} \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w(z)}{100} \right)^4 \right] + \frac{\alpha_5 (T_0 - T_w(z))}{\rho_w \delta_w c_w} = 0. \quad (37)$$

Система рівнянь (34), (35), (37) описує стаціонарний розподіл температур по стінці резервуара і водній плівці.

**Висновки.** Побудовано модель охолоджувальної дії водної плівки, що стікає по стінці резервуара, який нагрівається під тепловим впливом пожежі в обвалуванні. Модель враховує радіаційний і конвекційний теплообмін системи «стінка-плівка» з пожежею і навколишнім середовищем. Показано, що граничний розподіл температур, який утворюється в стінці і водній плівці, описується нелінійним диференціальним рівнянням першого порядку. Модель дозволяє визначити таку інтенсивність подачі води на стінку резервуара, яка забезпечує її охолодження до безпечної температури.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з оцінкою коефіцієнтів конвекційної тепловіддачі, що входять до моделі, і розв'язання диференціального рівняння.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою і нафтопродуктами. НАПБ 05.02: Офіц. вид. – К.: М-во з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи. 2003. – 81 с. – (нормативний документ МНС України. Інструкція). Режим доступу: [http://univer.nuczu.edu.ua/tmp\\_metod/950/Nafta-128](http://univer.nuczu.edu.ua/tmp_metod/950/Nafta-128)

Instrukcia8S.pdf.

2. Басманов А.Е. Локализация пожаров в резервуарах с нефтепродуктами [Текст] / А.Е. Басманов, А.А. Михайлюк. – Харьков: НУГЗУ. 2011. – 108 с. Режим доступа: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/261>.

3. Su-fang, Y. A. N. G. Study on the cooling temperature variation of tank surfaces subjected to tank fire // Fire Science and Technology, 2010, 3.

4. Fossa M. A model for radiation evaluation and cooling system design in case of fire in tank farms / M. Fossa, F. Devia // Fire Safety Journal, 2008, 43(1), p 42-49. DOI: 10.1016/j.firesaf.2007.01.005.

5. Саламов Д.О. Аналіз систем охолодження резервуарів в резервуарному парку з нафтопродуктами [Текст] / Д.О. Саламов, Ю.О. Абрамов, О.Є. Басманов // Проблеми пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ. 2018. – №43. – С. 156-161. Режим доступа: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6940>.

6. Abramov Y.A. Model of thermal effect of fire within a dike on the oil tank [Text] / Y.A. Abramov, O.E. Basmanov, A.A. Mikhaluk, D. Salamov // Naukovyi Visnyk NHU, 2018, № 2. – P. 95-100. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-2/12>.

7. Basmanov O.E. Estimation of the convection heat exchange rate for tank shells covered with falling water film [Text] / O.E. Basmanov, Y.S. Kylik // East journal of security studies. – 2017. – V. 1. – P. 145-154. Режим доступа: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6121>.

*Отримано редколегією 25.09.2018*

Д.О. Саламов, Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов

**Модель охлаждающего действия водной пленки, стекающей по стенке резервуара, при пожаре разлива горючей жидкости в обваловании**

Построена модель охлаждающего действия водной пленки, стекающей по стенке резервуара, нагревающегося под тепловым воздействием пожара горючей жидкости в обваловании резервуара. Модель учитывает лучистую и тепловую составляющие теплового потока от пожара к стенке резервуара. Модель может быть использована для расчета необходимой интенсивности подачи воды для охлаждения резервуара.

**Ключевые слова:** резервуар с нефтепродуктом, резервуарный парк, система охлаждения.

J. Salamov, Yu. Abramov, O. Basmanov

**Model of the cooling effect of the water film flowing along the tank shell, in the case of dike fire**

A model of the cooling effect of a water film flowing along the tank shell heated under the thermal effect of dike fire is constructed. The model takes into account the radiant and thermal components of the heat flux from the fire to the tank shell. The model can be used to calculate the required water flow rate for cooling the tank.

**Keywords:** oil reservoir, reservoir park, cooling system.