

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

## АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ОХОЛОДЖУВАЛЬНОЇ ДІЇ ВОДНОЇ ПЛІВКИ, ЩО СТІКАЄ ПО СТІНЦІ РЕЗЕРВУАРА

Побудовано алгоритм розрахунку охолоджувальної дії водної плівки, що стікає по стінці резервуара, який нагрівається під тепловим впливом пожежі горючої рідини. Алгоритм спирається на модель, яка враховує радіаційні і конвекційні складові теплового потоку від пожежі до стінки резервуара. Алгоритм дозволяє визначити необхідну інтенсивність подачі води на охолодження резервуара.

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

**Постановка проблеми.** Основною загрозою при пожежі в резервуарному парку з нафтопродуктами є розповсюдження пожежі на сусідні резервуари. Це відбувається внаслідок нагрівання металевих конструкцій резервуара, зокрема його стінок, до температури самоспалахування парів нафтопродукту. Отже, першочерговим заходом при ліквідації пожежі в резервуарному парку є подача води на охолодження резервуара, що горить, та сусідніх з ним. Однією з проблем при цьому є визначення такої інтенсивності подачі води, яка забезпечувала би охолодження резервуара до безпечної температури.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існує 3 основних способи утворення водної плівки, яка стікає по стінці резервуара:

- зрошувальні кільця;
- гідромонітори за межами обвалування;
- пересувна техніка.

В Інструкції щодо гасіння пожеж в резервуарах з нафтою і нафтопродуктами [1] наведено нормативну інтенсивність подачі води на охолодження резервуару, що горить, яка складає  $0,8 \text{ л/м} \cdot \text{с}$ . 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  $(0,22 \div 1,1) \text{ л/м} \cdot \text{с}$ . В роботі [3] на прикладі охолодження сталевий плити водою експериментально досліджено вплив інтенсивності подачі води на температуру поверхні плити, але узагальнення, які б дозволили застосувати отримані результати на випадок пожежі в обвалуванні або в резервуарі, в роботі відсутні.

В роботі [4] побудовано модель охолодження резервуара водною плівкою, що стікає по його стінці. При цьому розглядається лише пере-

дача тепла випромінюванням від пожежі в обвалуванні. В роботі [5] 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, але охолодження стінки в цій роботі не розглянуто.

**Постановка завдання та його вирішення.** Метою роботи є побудова алгоритму розрахунку температури стінки резервуара в умовах пожежі в обвалуванні та охолодження за допомогою кілець зрошення. Особливістю кілець зрошення є утворення водної плівки на всій зовнішній поверхні стінки резервуара. Будемо розглядати лише частину стінки резервуара, що контактує з пароповітряною сумішшю в його газовому просторі. Нагрів саме цієї частина стінки складає найбільшу загрозу. Покладемо її висоту рівною  $h$ , а в якості початку відліку оберемо рівень нафтопродукту (рис. 1).

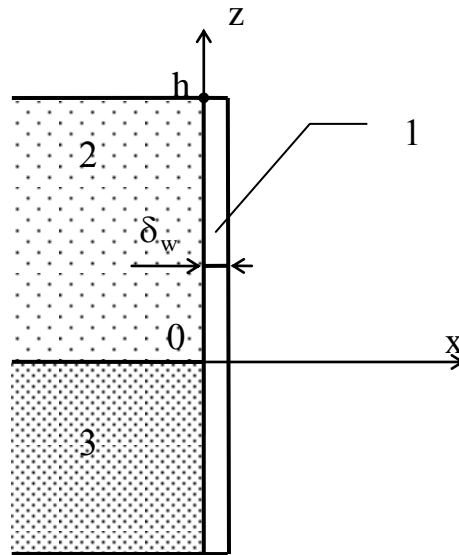


Рис. 1. Стікання водної плівки по стінці резервуара: 1 – водна плівка; 2 – газовий простір резервуара; 3 – нафтопродукт в резервуарі

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

В роботі [7] показано, що стаціонарні розподіли температури  $T_c(z)$  водної плівки і температури  $T_w(z)$  стінки, описуються диференціальним рівнянням

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

з початковою умовою

$$T_c(h) = T_0, \quad (2)$$

і алгебраїчним рівнянням

$$\begin{aligned} & \frac{c_0 \varepsilon_s \varepsilon_w}{\rho_w \delta_w c_w} \left[ \left( \frac{T_s}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w(z)}{100} \right)^4 \right] \psi + \frac{c_0 \varepsilon_w}{\rho_w \delta_w c_w} \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w(z)}{100} \right)^4 \right] (1 - \psi) + \\ & + \frac{\alpha_c (T_c - T_w(z))}{\rho_w \delta_w c_w} + \frac{c_0 \varepsilon_w^2}{\rho_w \delta_w c_w} \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w(z)}{100} \right)^4 \right] + \\ & + \frac{\alpha_5 (T_0 - T_w(z))}{\rho_w \delta_w c_w} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\rho_c$ ,  $c_c$  – густина та теплоємність води;  $I$  – інтенсивність зрошення стінки резервуара,  $\text{м}^3/(\text{м} \cdot \text{с})$ ;  $\alpha_c$ ,  $\alpha_f$  – коефіцієнти конвекційного теплообміну між водною плівкою і стінкою та водною плівкою і навколишнім повітрям відповідно;  $T_f(z)$  – температура повітря на висоті  $z$ ;  $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$  – стала;  $T_s$  – температура випромінюючої поверхні факела;  $T_0$  – температура навколишнього середовища;  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_w$  – ступені чорноти поверхні факела і стінки резервуара відповідно;  $\rho_w$ ,  $c_w$ ,  $\delta_w$  – густина, питома теплоємність і товщина стінки відповідно;  $\alpha_5$  – коефіцієнт конвекційного теплообміну між стінкою резервуара і пароповітряною сумішшю у газовому просторі резервуара;  $\psi$  – коефіцієнт взаємного опромінення між резервуаром і факелом.

Коефіцієнт конвекційного теплообміну  $\alpha_c$  між водної плівкою і стінкою може бути апроксимований виразом [6]

$$\alpha_c \cong (283,53T_c - 45098)I^{0,25}, \quad (4)$$

Розв'яжемо систему рівнянь (1)-(3) чисельно, використовуючи наступний алгоритм.

1. Обираємо  $\varepsilon > 0$ ,  $\Delta t > 0$ ,  $n > 0$ .
2. Розбиваємо відрізок  $[0, h]$  на  $n$  рівних відрізків  $[z_i, z_{i+1}]$  довжиною

$$\begin{aligned} \Delta z &= h/n, \\ z_i &= i \cdot \Delta z, \quad i \leq 0 \leq n. \end{aligned}$$

3. Покладемо

$$\begin{aligned} T_c(h) &= T_0, \\ i &= n. \end{aligned}$$

4. Підставляємо  $T_c(z_i)$  в рівняння (3) і обираємо початкове наближення

$$\begin{aligned} T_w^{(0)}(z_i) &= T_0, \\ j &= 0. \end{aligned}$$

5. Обчислюємо приріст

$$\Delta_j = \frac{c_0 \varepsilon_s \varepsilon_w}{\rho_w \delta_w c_w} \left[ \left( \frac{T_s}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w^{(j)}(z_i)}{100} \right)^4 \right] \psi +$$

$$\frac{c_0 \varepsilon_w}{\rho_w \delta_w c_w} \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w^{(j)}(z_i)}{100} \right)^4 \right] (1 - \psi) + \frac{\alpha_c (T_c(z_i) - T_w^{(j)}(z_i))}{\rho_w \delta_w c_w} +$$

$$+ \frac{c_0 \varepsilon_w^2}{\rho_w \delta_w c_w} \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w^{(j)}(z_i)}{100} \right)^4 \right] + \frac{\alpha_5 (T_0 - T_w^{(j)}(z_i))}{\rho_w \delta_w c_w}.$$

6. Обчислюємо наступні наближені значення  $T_w(z_i)$ :

$$T_w^{(j+1)}(z_i) = T_w^{(j)}(z_i) + \Delta_j \cdot \Delta t,$$

$$j = j + 1.$$

7. Якщо  $|T_w^{(j)}(z_i) - T_w^{(j-1)}(z_i)| > \varepsilon$ , то переходимо до п.5.

8. Покладемо  $T_w(z_i) = T_w^{(j)}(z_i)$ .

9. Обчислюємо приріст температури водної плівки в точці  $z_i$ :

$$\Delta T_{ci} = \frac{\Delta z}{\rho_c c_c I} [\alpha_c (T_w(z_i) - T_c(z_i)) + \alpha_f (T_f(z_i) - T_c(z_i))].$$

10. Якщо  $i = 0$ , то переходимо до п.13.

11. Покладемо

$$T_c(z_{i-1}) = T_c(z_i) + \Delta T_{ci};$$

$$i = i - 1.$$

12. Переходимо до п.4.

13. Розподіл температур знайдено. Кінець алгоритму.

В якості критерію достатнього охолодження резервуара приймемо

$$T_w(z) < T_{w \max},$$

$$T_c(z) < T_{c \max},$$

де  $T_{c \max} = 100^\circ \text{C}$ , щоб гарантувати відсутність кипіння води, яке може призвести до відштовхування плівки від стінки парами води;  $T_{w \max}$  доцільно обирати таким чином, щоб забезпечити відсутність джерела запалювання для парів нафтопродукту, наприклад,  $T_{w \max} < 0,9 T_{ign}$ ;  $T_{ign}$  – температура самоспалахування парів нафтопродукту.

**Висновки.** Побудовано алгоритм розрахунку температури стінки резервуара в умовах пожежі в обвалуванні та охолодження за допомогою кілець зрошення. Алгоритм спирається на модель, що враховує радіаційний і конвекційний теплообмін системи «стінка-плівка» з пожежею і навколишнім середовищем. При цьому граничний розподіл температур, який утворюється в стінці і водній плівці, описується нелінійним диференціальним рівнянням першого порядку. Алгоритм 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.

## 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-Instrukcia8S.pdf](http://univer.nuczu.edu.ua/tmp_metod/950/Nafta-Instrukcia8S.pdf)
2. Басманов А.Е. Локалізація пожег в резервуарах с нефтепродуктами [Текст] / А.Е. Басманов, А.А. Михайлюк. Харків: НУГЗУ. 2011. 108 с. Режим доступу: <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. 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>
6. 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 доступу: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6121>
7. Абрамов Ю.О. Модель охолоджувальної дії водної плівки, що стікає по стінці резервуара, при пожежі розливу горючої рідини в обвалуванні / Ю.О. Абрамов, О.Є. Басманов, Д.О. Саламов // Проблемы пожарной безопасности. Х.: НУГЗУ. 2018. №44. С. 124-129. Режим доступу <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/8715>

*Отримано редколегією 10.10.2019*

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

**Алгоритм расчета охлаждающего действия водной пленки, стекающей по стенке резервуара**

Построен алгоритм расчета охлаждающего действия водной пленки, стекающей по стенке резервуара, нагревающегося под тепловым воздействием пожара горючей жидкости. Алгоритм основывается на модели, учитывающей лучистую и тепловую составляющие теплового потока от пожара к стенке резервуара. Алгоритм позволяет определить необходимую интенсивность подачи воды для охлаждения резервуара.

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

J. Salamov, Yu. Abramov, O. Basmanov

**Algorithm of determining the cooling effect of the water film flowing along the tank shell**

An algorithm of determining the cooling effect of a water film flowing along the tank shell heated under the thermal effect of fire is constructed. The algorithm is based on the model which takes into account the radiant and thermal components of the heat flux from the fire to the tank shell. The algorithm allows calculating the required water flow rate for cooling the tank.

**Keywords:** fuel tank, fuel tank store, cooling system.