УДК 614.8

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

ОЦІНКА КОЕФІЦІЄНТА КОНВЕКЦІЙНОГО ТЕПЛООБМІНУ МІЖ СТІНКОЮ РЕЗЕРВУАРА І ПАРОПОВІТРЯНОЮ СУМІШШЮ В ГАЗОВОМУ ПРОСТОРІ РЕЗЕРВУАРА

На основі теорії подібності побудовано оцінку коефіцієнта конвекційного теплообміну між стінкою резервуара і пароповітряною сумішшю в його газовому просторі. Показано, що коефіцієнт конвекційного теплообміну зростає із збільшенням температури стінки, а його значення не перевищує 9 Вт/(м·К). Отримані результати можуть бути використані при побудові моделі теплового впливу пожежі на резервуар з нафтопродуктом.

Ключові слова: резервуар з нафтопродуктом, пожежа, конвекційний теплообмін, теорія подібності.

Постановка проблеми. Основна небезпека пожежі в резервуарному парку з нафтопродуктами полягає в нагріві резервуара під тепловим впливом пожежі. Досягнення окремими елементами конструкції резервуара температури самоспалахування парів нафтопродукту, що зберігається, здатне призвести до спалахування парів на дихальній арматурі резервуара або до вибуху у газовому просторі резервуара. Все це обумовлює необхідність побудови моделей теплового впливу пожежі на резервуар з нафтопродуктом при проектуванні резервуарного парку і систем охолодження резервуарів. При цьому однією з проблем є ідентифікація параметрів, що входять до такої моделі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Випромінювання є основним видом теплопередачі від пожежі горючої рідини на відкритому просторі до оточуючих об'єктів. В експериментальній роботі [1] досліджується теплове випромінювання від полум'я горючих і легкозаймистих рідин в залежності від типу рідини і діаметра розливу. В роботі [2] додатково враховано поглинання теплового випромінювання парами горючої рідини і частками диму. Визначенню безпечної відстані від пожежі горючої рідини присвячено [3]. Теплове випромінювання від рідини, що горить і розтікається, досліджується в [4]. В роботі [5] розглянуто моделі розтікання горючої рідини на горизонтальній поверхні, які описують динаміку розтікання і дозволяють визначити товщину і діаметр розливу. Але горіння рідини в роботі не розглянуто. В роботі [6] побудовано математичну модель нагріву стінки резервуара з нафтопродуктом під тепловим впливом пожежі горючої рідини, розлитої в обвалуванні резервуара. Модель враховує променевий і конвекційний теплообмін стінки. Рівняння теплового балансу для стінки резервуара має вигляд

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{c_0 \varepsilon_ф \varepsilon_w}{\rho \delta c}\left[\left(\frac{T_ф}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_w}{100}\right)^4\right]\psi + \\ + \frac{c_0 \varepsilon_w}{\rho \delta c}\left[\left(\frac{T_0}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_w}{100}\right)^4\right](1-\psi) + \frac{\alpha_2 (T_f - T_w)}{\rho \delta c} + \\ + \frac{c_0 \varepsilon_w^2}{\rho \delta c}\left[\left(\frac{T_0}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_w}{100}\right)^4\right] + \frac{\alpha_5 (T_0 - T_w)}{\rho \delta c},$$

де $c_0 = 5{,}67 \frac{Вт}{м^2 К^4}$ – стала; $\varepsilon_ф$, ε_w – ступені чорноти факела і стінки; $T_ф$, T_w, T_f – температури випромінюючої поверхні факела, стінки повітряних потоків, що контактують зі стінкою, відповідно; T_0 – температура навколишнього середовища; ψ – коефіцієнт взаємного опромінення; δ – товщина стінки резервуара; ρ, c – густина і теплоємність матеріалу стінки (сталь); α_2, α_5 – коефіцієнти конвекційного теплообміну стінки з навколишнім середовищем і пароповітряною сумішшю у газовому просторі резервуара відповідно. Зазначені коефіцієнти конвекційного теплообміну представлені лише в загальному вигляді.

В роботі [7] методами теорії подібності проведено ідентифікацію коефіцієнта конвекційного теплообміну стінки резервуара для випадку вимушеної конвекції, обумовленої вітром і висхідними потоками над осередком горіння горючої рідини в обвалуванні резервуара. При цьому теплообмін стінки з пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара в роботі не розглянуто.

Постановка завдання та його вирішення. Метою роботи є побудова оцінки коефіцієнта конвекційного теплообміну між стінкою резервуара і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара.

Значення коефіцієнта конвекційного теплообміну α_5 може бути визначено з виразу для числа Нусельта [8]

$$\alpha_5 = \frac{Nu \lambda_f}{L}, \qquad (1)$$

де λ_f – коефіцієнт теплопровідності пароповітряної суміші в газовому просторі резервуара, яку будемо вважати такою, що дорівнює теплопровідності повітря; L – характерний розмір.

Оскільки конвекційний теплообмін є вільним, то значення числа Нусельта може бути визначено зі співвідношення [8]

$$Nu = 0{,}135(Gr \cdot Pr)^{1/3}, \qquad (2)$$

де Gr – число Грасгофа:

$$\mathrm{Gr} = \frac{\beta \Delta T L^3 g}{\nu^2}, \tag{3}$$

$\Delta T = T_w - T_0$; β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення повітря, $\beta = 1/T_m$; $T_m = (T_w + T_0)/2$ – визначаюча температура; g – прискорення вільного падіння; ν – кінематична в'язкість повітря. Підставляючи (2), (3) в (1), отримаємо оцінку коефіцієнта конвекційного теплообміну стінки резервуара з пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара

$$\alpha_5 = 0{,}135(\mathrm{Gr}\cdot\mathrm{Pr})^{1/3}\frac{\lambda_f}{L} = 0{,}135\left(\frac{\Delta T L^3 g}{T_m \nu^2}\cdot \mathrm{Pr}\right)^{1/3}\frac{\lambda_f}{L} =$$

$$= 0{,}135\lambda_f\left(\frac{2g\,\mathrm{Pr}}{\nu^2}\right)^{1/3}\left(\frac{T_w - T_0}{T_w + T_0}\right)^{1/3}, \tag{4}$$

де значення параметрів λ_f, ν, Pr беруться у відповідності до визначаючої температури T_m. На рис. **1** наведено залежність

$$f(T_m) = 0{,}135\lambda_f\left(\frac{2g\,\mathrm{Pr}}{\nu^2}\right)^{1/3}$$

від визначаючої температури T_m, побудовану на основі табличних даних для λ_f, ν, Pr [8] та її лінійну апроксимацію

$$\tilde{f}(T_m) = -0{,}0082T_m + 15{,}904. \tag{5}$$

Аналіз графічних залежностей на рис. 1 свідчить про те, що відносна похибка такої апроксимації в діапазоні температур $T_m = (273 \div 773)\mathrm{K}$ не перевищує 4,5%. Якщо температура пароповітряної суміші в газовому просторі резервуара $T_0 \approx 300\ \mathrm{K}$, то відносна похибка апроксимації (5) не перевищує 4,5% для діапазону температур сухої стінки $T_w = (273 \div 1273)\,\mathrm{K}$.

Підстановка апроксимації (5) у вираз (4) дає оцінку коефіцієнта конвекційного теплообміну α_5 у вигляді

$$\alpha_5 = \left[-4{,}1\cdot 10^{-3}(T_w + T_0) + 15{,}904\right]\left(\frac{T_w - T_0}{T_w + T_0}\right)^{1/3}. \tag{6}$$

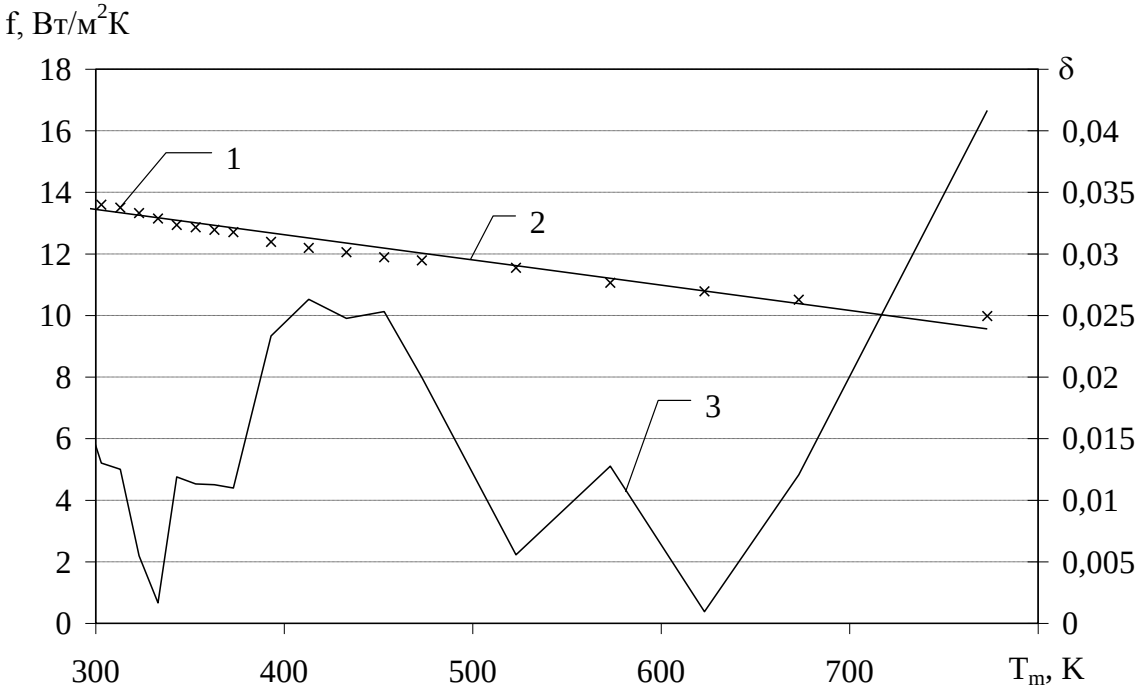

Рис. 1. Вплив визначаючої температури T_m: 1 – $f(T_m)$; 2 – апроксимація $\tilde{f}(T_m)$; 3 – відносна похибка (на правій вісі)

На рис. 2, 3 проілюстровано залежність коефіцієнту α_5 від температури стінки резервуара T_w і температури пароповітряної суміші T_0. З аналізу графічної залежності (рис. 2, 3) випливає, що для температур стінки резервуара і пароповітряної суміші із діапазону $(273 \div 1273)\,K$ коефіцієнт конвекційного теплообміну α_5 належить діапазону значень $(0 \div 9)\,Вт/м^2К$.

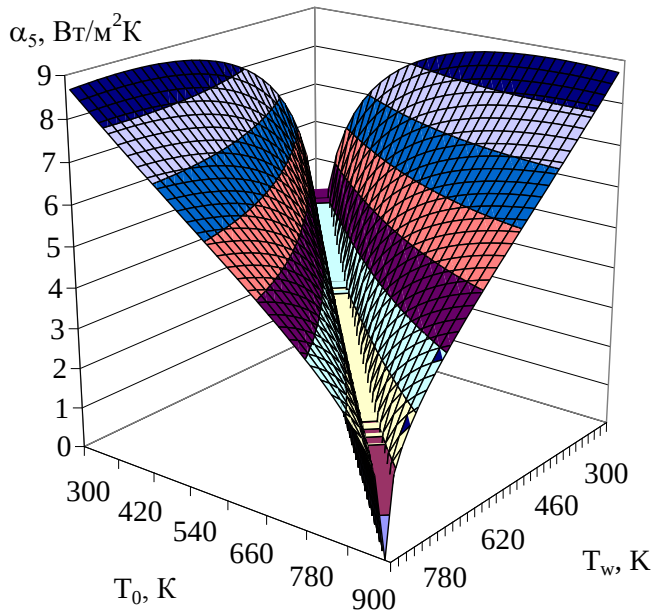

Рис. 2. Залежність коефіцієнта конвекційного теплообміну α_5 від температури стінки резервуара T_w і температури пароповітряної суміші T_0

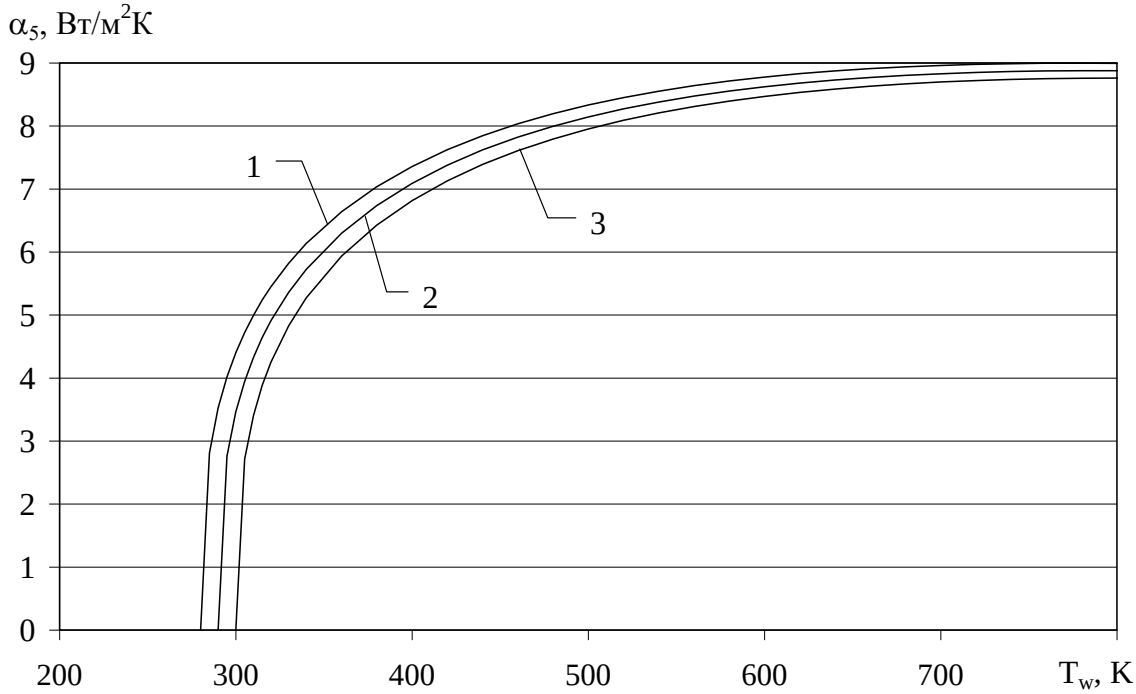

Рис. 3. Залежність коефіцієнта конвекційного теплообміну α_5 від температури стінки резервуара T_w при різних значеннях температури пароповітряної суміші: 1 – $T_0 = 280$ K; 2 – $T_0 = 290$ K; 3 – $T_0 = 300$ K

При нагріві стінки резервуара коефіцієнт α_5 спочатку стрімко зростає ($T_w = (300 \div 400)$ K), а потім ($T_w > 400$ K) повільно наближається до свого максимального значення.

Висновки. Побудовано оцінку коефіцієнта конвекційного теплообміну між стінкою резервуара і пароповітряною сумішшю в його газовому просторі. Побудована оцінка спирається на теорію подібності для вільного конвекційного теплообміну. Показано, що коефіцієнт конвекційного теплообміну зростає із збільшенням температури стінки, а його значення для діапазону температур стінки резервуара і пароповітряної суміші не перевищує $9\ \text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$.

Отримані результати можуть бути використані при побудові моделі теплового впливу пожежі на резервуар з нафтопродуктом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sjostrom J., Amon F., Appel G., Persson H. Thermal exposure from large scale ethanol fuel pool fires, Fire Safety Journal, 2015, vol. 78. P. 229–237.

2. Ditch B.D., Ris J.L., Blanchat T.K., Chaos M. Pool fires – An empirical correlation, Combustion and Flame, 2013, vol. 160, issue 12. P. 2964–2974.

3. Sudheer S., Kumar L., Manjunath B.S. etc. Fire safety distances for open pool fires, Infrared Physics & Technology, 2013, vol. 61. P. 265–273.

4. Jinlong Zh., Hong H., Grunde J., Maohua Zh., Yuntao L. Spread and burning behavior of continuous spill fires, Fire Safety Journal, 2017, vol. 91. P. 347-354.

5. Саламов Д. О., Абрамов Ю. О., Басманов О. Є. Аналіз моделей розтікання рідини на горизонтальній поверхні в умовах надзвичайної ситуації // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2017. № 27. С. 104–110. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6940

6. Abramov Y. A., Basmanov O. E., Salamov J., Mikhayluk A. A. Model of thermal effect of fire within a dike on the oil tank // Naukovyi Visnyk NHU. 2018. № 2. P. 95-100. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7023

7. Basmanov A., Kulik Y. Identifying the convective heat transfer coefficient of the tank wall in the case of dike fire // Проблемы пожарной безопасности. 2017. № 41. С. 31–37. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/1023

8. Теплотехника / под ред. В.Н. Луканина. М.: Высш. шк. 2002. С. 671.

Отримано редколегією 05.01.2020

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

Оценка коэффициента конвективного теплообмена стенки резервуара и паровоздушной смеси в газовом пространстве резервуара

На основании теории подобия построена оценка коэффициента конвективного теплообмена между стенкой резервуара и паровоздушной смесью в его газовом пространстве. Показано, что коэффициент конвективного теплообмена растет с увеличением температуры стенки, а его значение не превосходит 9 Вт/(м·К). Полученные результаты могут быть использованы при построении модели теплового воздействия пожара на резервуар с нефтепродуктом.

Ключевые слова: резервуар с нефтепродуктом, пожар, конвективный теплообмен, теория подобия.

J. Salamov, Yu. Abramov, O. Basmanov

Estimating the convective heat transfer coefficient of the tank shell and the vapor-air mixture in the gas space of the tank

An estimation of the coefficient of convective heat transfer between the tank shell and the vapor-air mixture in its gas space is constructed. It based on the theory of similarity. It was shown that increasing the shell temperature leads to increasing the convective heat transfer coefficient. The value of the coefficient does not exceed 9 W/(m·K). The results can be used to build a model of the thermal influence of a fire to a fuel tank.

Keywords: fuel tank, fire, convective heat transfer, similarity theory.