

*В.В. Чернецький, М.М. Семерак, д-р техн. наук, професор, М.Р. Михайлишин
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ВЕРТИКАЛЬНИХ СТАЛЕВИХ РЕЗЕРВУАРАХ ЗА УМОВ ПОЖЕЖІ

Досліджено вогнестійкість вертикальних сталевих резервуарів (РВС) для зберігання нафти та нафтопродуктів за умов пожежі. Знайдено аналітичні залежності густини теплового потоку полум'я пожежі від віддалі між резервуарами, їх діаметрів, температури та часу горіння. Одержані залежності використані при визначенні та розрахунку нестационарного температурного поля по товщині стінки резервуара, який знаходиться на деякій віддалі від полум'я пожежі. Визначений час його нагрівання до максимальної температури.

Ключові слова: вертикальні сталеві резервуари, пожежа, температура полум'я пожежі, температурне поле, тепловий потік.

В.В. Чернецкий, М.М. Семерак, Н.Р. Михайлышин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ ПРИ ПОЖАРЕ

Исследована огнестойкость вертикальных стальных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов в условиях пожара. Найдено аналитические зависимости величин теплового потока от расстояния между резервуарами и их диаметров, температуры пламени пожара и времени горения. Полученные зависимости использованы при определении и расчете температурного поля по толщине стенки резервуара, который находится на некотором расстоянии от пламени пожара. Определено время его нагревания до максимальной температуры.

Ключевые слова: вертикальные стальные резервуары, пожар, температура, температурное поле, тепловой поток.

V.V. Chernetskyi, M.M. Semerak, M.R. Mihailishin

THE MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL PROCESSES IN VERTICAL COAXIAL OIL TANKS IN CONDITIONS OF FIRE

The fire resistance of vertical tanks for oil and petroleum products conservation in conditions of fire were analyses. The analytical expressions of dependence heat flow on reservoir diameter, fair temperature and time were proposed. The obtained dependences were used for determination and calculation of temperature field along of generatrix of tank, which situated in some dictation from fire. The time of maximal heat of tanks for oil was determined.

Key words: oil tank, fair, temperature, temperature field, temperature flow.

Вступ. Резервуарні парки є основними об'єктами зберігання сирової нафти і нафтопродуктів на нафтопереробних заводах, перевалочних і розподільчих станціях, нафтобазах, підприємствах автомобільного, залізничного, водного і повітряного транспорту. Скупчення легкозаймистих і горючих рідин на відносно невеликій площі резервуарного парку зумовлює підвищення пожежної небезпеки цих об'єктів [1, 2]. Розлив і загорання нафтопродуктів є однією із найнебезпечніших надзвичайних ситуацій які призводять не тільки до значних матеріальних втрат, але і до людських жертв. Економічно обгрунтованою є тенденція переходу до резервуарів великих об'ємів (50 тис. м³ і більше), що приводить до збільшення об'ємів горючих рідин на одиницю площі [3, 4].

Постановка задачі. Дослідимо вплив температури полум'я пожежі у вертикальному сталевому резервуарі на нагрівання сусіднього резервуара. Розглянемо два вертикальні сталеві резервуари радіусом R , які розміщені на віддалі l один від одного в резервуарному парку. Коли виникає пожежа в резервуарі 2, заповненому горючими рідинами, то сусідній резервуар 1 буде нагріватися від теплового потоку полум'я пожежі (рисунок 1). Динаміка нагрівання буде залежати від температури полум'я, радіусів резервуарів та віддалі між ними, теплофізичних характеристик сталі.

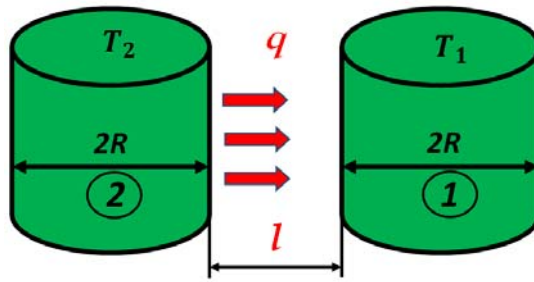


Рисунок 1 – Схематичне зображення процесу нагрівання

Розв'язання задачі. Знайдемо вплив теплового потоку і конвективного теплообміну на нестационарне температурне поле сусідніх резервуарів. Інтенсивність теплового потоку від полум'я пожежі знайдемо за формулою [5]

$$q = \alpha^* \cdot (T_2 - T_1) + \varepsilon_{\text{нрм}} \psi \cdot 5,67 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right], \quad (1)$$

де α^* – коефіцієнт тепловіддачі, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; $\varepsilon_{\text{нрм}} = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1}$ – приведений ступінь чорноти стінок резервуарів; ε_1 – ступінь чорноти полум'я 1; ε_2 – ступінь чорноти стінки резервуара 2; ψ – кутовий коефіцієнт випромінювання, T_1 – температура стінки резервуара, що нагрівається від теплового потоку, К; T_2 – температура стінки резервуара, що горить, К. Кутовий коефіцієнт випромінювання ψ , який залежить від радіуса резервуарів R і віддалі між ними l , знаходимо за формулою

$$\psi = \frac{1}{\pi} \times \left[\sqrt{X^2 - 1} + \arcsin \left(\frac{1}{X} \right) - X \right], \quad (2)$$

де $X = 1 + \frac{l}{2 \cdot R}$; l – відстань між резервуарами, м; R – радіус резервуарів, м.

За виразом (2) проведені дослідження зміни кутового коефіцієнта залежно від віддалі l між резервуарами для різних значень радіуса R . Результати досліджень зображені графічно на рисунку 2

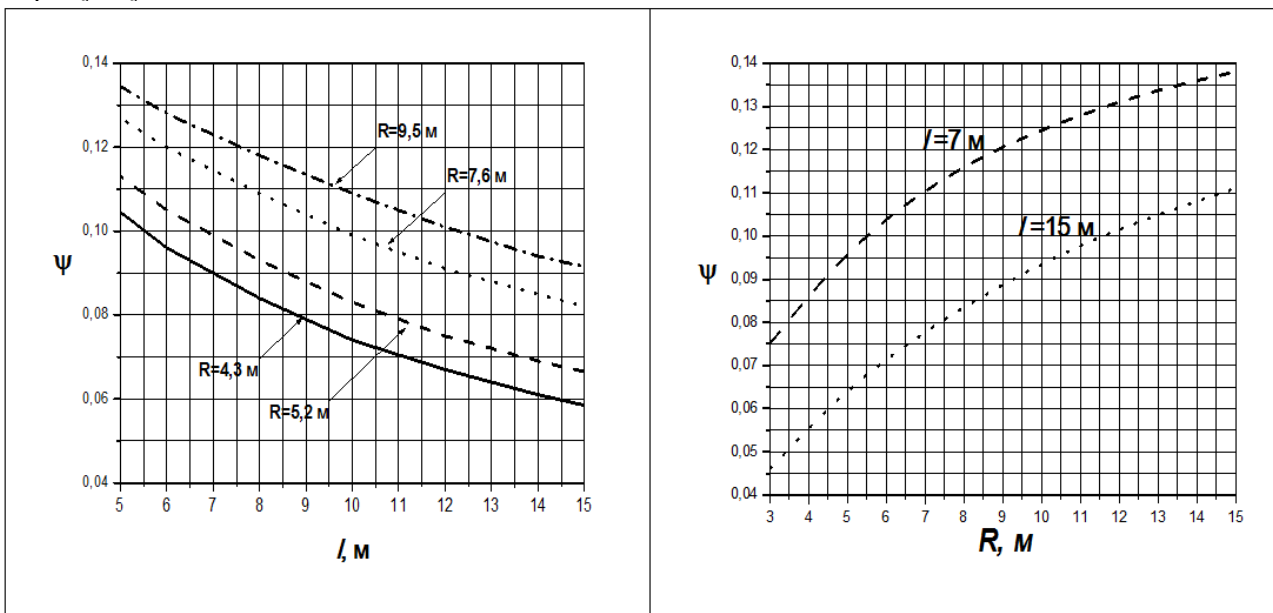


Рисунок 2 – Залежності кутового коефіцієнта ψ від відстані між резервуарами l та радіуса резервуара R

Аналіз графічних залежностей показує, що кутовий коефіцієнт різко зменшується із збільшенням віддалі між резервуарами l . Із збільшенням радіуса резервуарів кутовий коефіцієнт збільшується, відповідно збільшується і тепловий потік.

Використовуючи залежність (1) з врахуванням виразу (2), досліджено зміну величини теплового потоку від полум'я бензину. Температура полум'я приймалась рівною $T_2=1500$ К, початкова температура сусіднього резервуара – $T_1=300$ К. Коефіцієнт чорноти полум'я – $\varepsilon_1=0.95$, а стінки резервуара – $\varepsilon_1=0.8$. Результати досліджень зображені на рисунку 3.

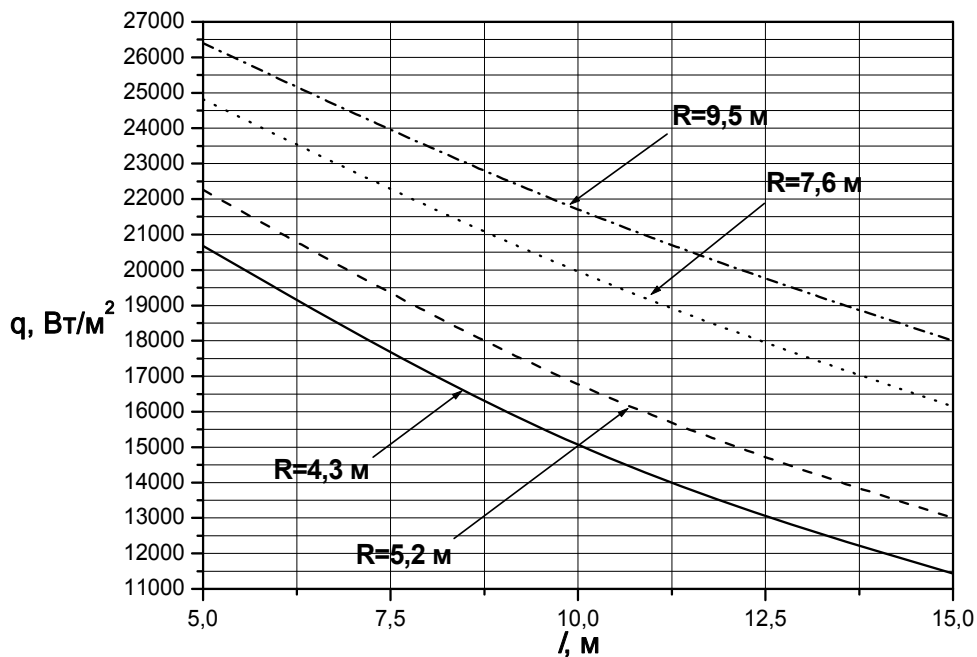


Рисунок 3 – Залежності інтенсивності теплового потоку від відстані між резервуарами при фіксованих радіусах

Аналіз графічних залежностей показує, що збільшення радіуса резервуарів і зменшення віддалі між ними призводить до збільшення теплового потоку. Так для резервуарів з $R=9,5$ м і віддалі між ними $l=7$ м інтенсивність теплового потоку дорівнює $24,5 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$, а при $l=15$ м – $18 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$.

При розглядуваних температурах в початковий момент пожежі різниця $T_2-T_1=1200$ К, а при нагріванні сусіднього резервуара до температури $T_1=1500$ К ця різниця буде дорівнювати нулю. В цей момент резервуари будуть знаходитися в тепловій рівновазі. За формулою (1) проведені розрахунки величини теплового потоку залежно від різниці температур стінок резервуарів. Результати досліджень зображені графічно на рисунку 4.

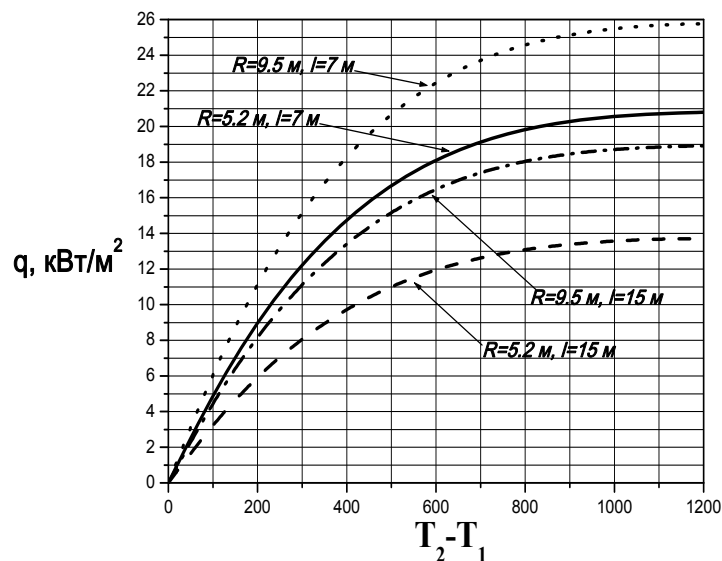


Рисунок 4 – Залежність теплового потоку від різниці температур стінок резервуарів

Знаючи значення теплового потоку полум'я пожежі знайдемо нестационарне температурне поле по товщині стінки резервуару (рисунок 5). Температурне поле знаходимо з диференціального рівняння теплопровідності [6].

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad (3)$$

з початковою умовою

$$t(r, 0) = t_0, \quad (4)$$

та граничною умовою другого роду

$$-\lambda \frac{\partial t(R_2, \tau)}{\partial r} + q(t) = 0, \quad (5)$$

де t_0 – початкова температура резервуара, °C; τ – час, с; r – товщина стінки резервуара, м; R_1, R_2 – внутрішній і зовнішні радіуси резервуарів відповідно, м; $a = \lambda / (c \cdot \rho)$ – коефіцієнт температуропровідності, $\left(\frac{m^2}{c} \right)$; c – теплоємність, $\left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$; λ – коефіцієнт теплопровідності сталевих резервуарів, $\left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$; ρ – питома густина $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$

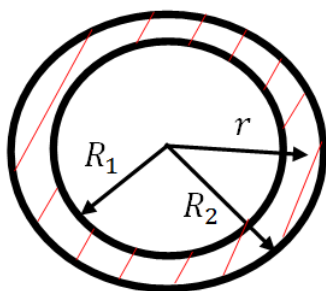


Рисунок 5 – Схематичне зображення перерізу РВС

Розв'язок рівняння (3) – (5) має вигляд [6]

$$t(r, \tau) - t_0 = \frac{q}{\lambda} R_2 \left\{ \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left[2Fo - \frac{1}{4} \left(1 - 2 \frac{r^2}{R_2^2} \right) - \frac{R_1^2}{R_2^2} \left(\ln \frac{r}{R_1} + \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{3}{4} \right) \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi}{\mu_n} \frac{J_1 \left(\mu_n \frac{R_1}{R_2} \right) J_1(\mu_n)}{J_1^2 \left(\mu_n \frac{R_1}{R_2} \right) - J_1^2(\mu_n)} \left[J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R_2} \right) Y_1 \left(\mu_n \frac{R_1}{R_2} \right) - Y_0 \left(\mu_n \frac{r}{R_2} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times J_1 \left(\mu_n \frac{R_1}{R_2} \right) \right] \exp(-\mu_n^2 Fo) \right\}, \quad (6)$$

де J_n, Y_n – функції Бесселя першого і другого роду порядку 0 і 1 відповідно; $Fo = \frac{a \cdot \tau}{R_2^2}$ – критерій Фур'є; μ_n – корені характеристичного рівняння

$$J_1 \left(\mu \frac{R_1}{R_2} \right) Y_1(\mu) - Y_1 \left(\mu \frac{R_1}{R_2} \right) J_1(\mu) = 0.$$

За формулою (6) проведені розрахунки зміни температурного поля по товщині стінки резервуара у часі та зміні теплофізичних характеристик сталевих резервуарів, які наведені в таблиці 1. Результати досліджень представлені графічно на рисунку 6.

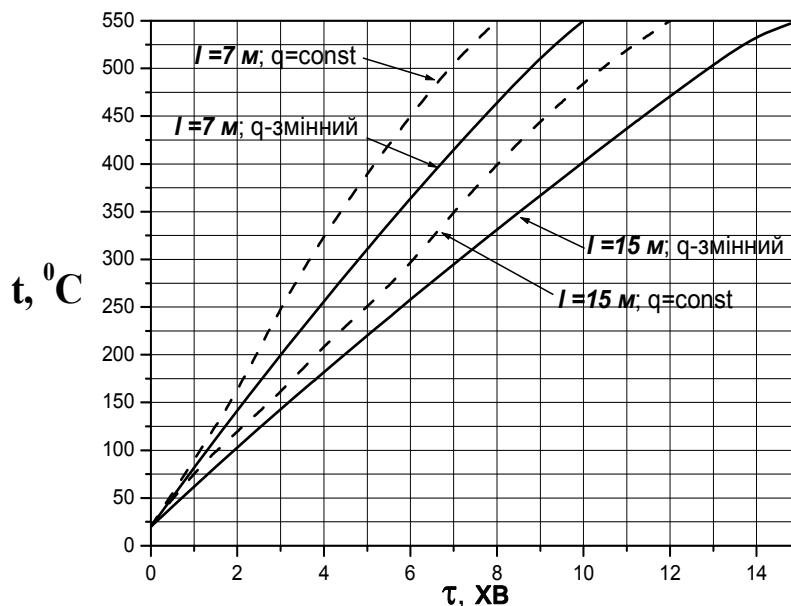


Рисунок 6 – Зміна температури стінки резервуара, об'ємом 1000 м^3 , з часом при різних відстанях між резервуарами

Таблиця 1

Теплофізичні характеристики сталевих резервуарів

Матеріал конструкції	$t_{\text{кр}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\lambda, (\text{Вт/м} \cdot \text{К})$	$c_p, \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$
Сталь вуглецева Ст3, Ст5	470	7850	$58 - 0,042 \cdot t^\circ\text{C}$	$0,47 + 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot t^\circ\text{C}$
Низьколегована сталь марки 25Г2С	550	7860	$58 - 0,041 \cdot t^\circ\text{C}$	$0,47 + 2,11 \cdot 10^{-4} \cdot t^\circ\text{C}$
Низьколегована сталь	500	7855	$58 - 0,042 \cdot t^\circ\text{C}$	$0,47 + 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot t^\circ\text{C}$

На рисунку 6 показано, що при віддалі між резервуаром, що горить, і сусіднім 7 м, стінка резервуара нагрівається до критичної температури $550 \text{ } ^\circ\text{C}$ за 10 хвилин, при змінному в часі тепловому потоці, а при постійному – за 8 хвилин. Якщо віддаль між резервуарами дорівнює 15 м то критична температура досягається за 15 хвилин, при змінному потоці а при постійному – за 12 хвилин.

Висновки:

1. За результатами математичного моделювання теплообміну між двома резервуарами за умов пожежі досліджено зміну інтенсивності теплового потоку пожежі залежно від віддалі між резервуарами та їхніми радіусами. З аналізу інтенсивності теплового потоку випливає, що при віддалі між резервуарами 7 м і радіусом 5,2 м величина інтенсивності теплового потоку дорівнює $19,6 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$, а при віддалі 15 м – $13 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$.

2. При врахуванні зміни теплового потоку з часом критична температура ($550 \text{ } ^\circ\text{C}$) стінки резервуара, що нагрівається (при віддалі $l=15$ м) досягається за 15 хв. При постійному в часі тепловому потоці критична температура досягається за 12 хв.

Список літератури

1. Розенштейн И.М. Аварии и надёжность стальных резервуаров. – М.: Недра, 1995. – 172 с.
2. Сафарян М. К. Металлические резервуары и газгольдеры. – М.: Недра, 1987. – 187 с.
3. ВБН В. 2.2 – 58.2 – 94 Склади нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа.
4. Волков О.М. Современные технологии обеспечения пожарной безопасности резервуаров для нефти и нефтепродуктов // Тран. и хранен. Нефтепрод. – 2002. Вып 5-6 – С. 18-21
5. Зигель Р. Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. – М.: Мир, 1975. – 936 с.
6. Лыков А.В. теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

References

1. Rozenshtein I.M. Crashes and reliability of steel reservoirs. – Moscow: Nedra, 1995. –172 p.
2. Safaryan M.K. Steel reservoirs and gasholders. Moscow: Nedra, 1995. – 187 p.
3. DBN V. 1-1-7 2002 Fire safety of building objects.
4. Romanenko P.N. Heat-transfer in fire bisness. / Romanenko P.M., Bubyr N.F., Bashkircev M.P./ Higher School of Ministry of Home Affairs of Soviet Union, 1969. – 425 p.
5. Zidel R., Hauell G. Radiative heat exchanging. Moscow: Mir, 1975. – 936 p.
6. Lykow A. V. Theory of thermal conductance. Moscow: Vysshaya Shkola, 1967. – 600 p.

