

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

### **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ВЕРТИКАЛЬНИХ КООКСІАЛЬНИХ РЕЗЕРВУАРАХ ЗА УМОВ ПОЖЕЖІ**

Розглянуто вогнестійкість вертикальних резервуарів для зберігання нафти та нафтопродуктів за умов пожежі. Знайдено аналітичні залежності величин теплового потоку від діаметрів резервуарів, температури полум'я пожежі та часу горіння. Одержані залежності використані при визначенні та розрахунку температурного поля по товщині стінки резервуара, який знаходиться на деякій віддалі від полум'я пожежі. Визначений час його нагріву до максимальної температури.

**Ключові слова:** резервуари, пожежа, температура, температурне поле, тепловий потік.

*М.М. Семерак, В.В. Чернецький, Н.Р. Михайлишин*

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ КООКСИАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ ПРИ ПОЖАРЕ**

Рассмотрены огнестойкость вертикальных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов в условиях пожара. Найдено аналитические зависимости величин теплового потока от диаметров резервуаров, 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 нагрева до максимальной температуры.

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

*M.Semerak, V.Chernetskyi, M.Mykhailyshyn*

### **MATHEMATICAL MODELING AND RESEARCH OF THERMAL PROCESSES IN VERTICAL COAXIAL TANK IN CASE OF FIRE**

The fire resistance of vertical storage tanks to oil and petroleum products in the conditions of fire has been considered. Analytical equations of heat flow values depending on the diameter tanks, flame temperature and time of a fire burning have been identified. The obtained dependence defined and used in the calculation of the temperature field in wall thickness of the reservoir, which is located at some distance from the flame of fire. Time of heating to maximum temperature has been identified.

**Key words:** oil tank, fire, temperature, temperature field, temperature flow.

На нафтобазах, нафтопереробних заводах рідкі нафтопродукти в основному зберігаються у вертикальних сталевих (РВС) або залізобетонних резервуарах.

На підприємствах з великим обігом сирової нафти і нафтопродуктів використовують резервуари об'ємом від 5 до 120 тис. м<sup>3</sup>. Висота резервуарів сягає 18 м. Обмеження висоти обумовлене в основному, технічними вимогами, зокрема можливістю подачі піни на випадок пожежі. В резервуарних парках їх розміщують групами по два, чотири, шість і більше.

З метою забезпечення пожежної безпеки на таких об'єктах реалізують різні організаційні і технічні заходи. Вони спрямовані на убезпечення людей, запобігання пожежі, локалізацію її поширення та створення умов для успішної ліквідації пожежі. Одним із таких заходів є обвалування резервуарів. Обвалування призначене для обмеження розтікання рідини, яка зберігається в резервуарі на випадок аварії [1,2].

При аваріях нафтопродукти можуть проливатися із резервуарів, часто це призводить до їхнього займання. При горінні нафтопродуктів температура пожежі сягає 1000 – 1300 °С.

У науковій літературі експериментальні та аналітичні дослідження з проблеми вогнестійкості елементів сталевих конструкцій за умов вогневої дії високотемпературного полум'я висвітлені недостатньо. Тому розроблення аналітичних методів дослідження вогнестійкості несучих сталевих конструкцій резервуара є актуальною науково-технічною задачею.

На сьогодні в Україні немає методики теоретичного дослідження вогнестійкості сталевих конструкцій за умов високих температур полум'я та інтенсивного теплообміну.

За умов пожежі показник межі вогнестійкості незахищених сталевих будівельних конструкцій близький до значення R15 [3]. Однією із причин такого швидкого прогрівання сталевих конструкцій є великий коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$ , ( $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ ) і малий теплоємності  $c$ , ( $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$ ), що веде до значного коефіцієнта температуропровідності

$$a = \lambda / c \cdot \rho, \left( \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right), \text{ що характеризує швидкість розповсюдження тепла усередині конструкції.}$$

За таких значень теплопровідності величина градієнта температури по товщині стінки резервуара є незначною і зумовлює швидке нагрівання всієї конструкції.

Значення критичної температури  $t_{\text{кр}}$  прогріву різних сталевих матеріалів резервуарів при нормативному експлуатаційному навантаженні наведені в табл 1.

**Таблиця 1**

*Теплофізичні характеристики сталевих резервуарів*

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

В кінці минулого століття спроектовані та побудовані резервуари об'ємом понад 50 тисяч  $\text{м}^3$ . Зокрема на підприємстві "Укртранснафта" в м. Броди Львівської обл. експлуатуються двостінний коаксіальний резервуар РВС об'ємом 75тисяч  $\text{м}^3$ . Діаметр його зовнішньої стінки рівний 78 м, а внутрішньої – 72 м. Товщина стінки змінюється по висоті від 2 см в нижній частині резервуара до 1 см у верхній. Внутрішній резервуар заповнений нафтопродуктами і має плаваючий дах. Між стінками резервуара знаходиться атмосферне повітря. Такі резервуари не потребують обвалування і є надійними та економічними в експлуатації.

Розглянемо двостінний коаксіальний резервуар. Внутрішній резервуар, в якому знаходиться нафта, позначимо індексом – 1, а зовнішній – 2. Якщо резервуар 2 нагрівається від зовнішньої пожежі до температури  $T_2$ , то тепловий потік, що випромінюється ним поглинається резервуаром 1.

Цей тепловий потік визначається за формулою [4]

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

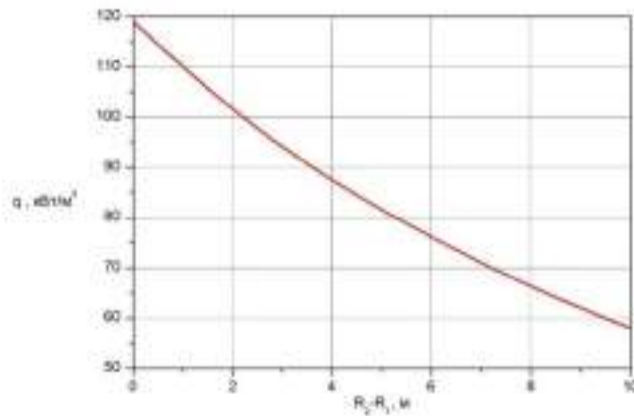
де  $\varepsilon_{\text{при}} = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)^{-1}$  – приведений ступінь чорноти резервуарів;  $\varepsilon_1$  – ступінь чорноти резервуара 1;  $\varepsilon_2$  – ступінь чорноти резервуара 2;  $\psi$  – кутовий коефіцієнт випромінювання,  $T_1$  – температура стінки резервуара 1, К;  $T_2$  – температура стінки резервуара 2, К.

Кутовий коефіцієнт випромінювання стінки зовнішнього на внутрішній резервуар –  $\psi$  в двох шарових коаксіальних резервуарах визначається за формулою [5]

$$\psi = \frac{1}{R} - \frac{1}{\pi R^2} \times \left[ \arccos\left(\frac{B}{A}\right) - \frac{1}{\pi R} \left( \sqrt{(A+2)^2 - (2R)^2} \cdot \arccos\left(\frac{B}{RA}\right) + B \cdot \operatorname{arcsin} - \pi \cdot \frac{A}{2} \right) \right], \quad (2)$$

де,  $R = \frac{R_2}{R_1}$ ,  $L = \frac{l}{R_1}$ ,  $l = 18$  м – висота резервуарів,  $A = L^2 + B^2 - 1$ ,  $B = L^2 - B^2 + 1$ .

Якщо  $T_2 = 1300$  К,  $T_1 = 300$  К,  $\varepsilon_1 = 0,9$ ,  $\varepsilon_2 = 0,8$  то тепловий потік (1) залежно від відстані між коаксіальними циліндрами змінюється за законом, зображеним на рисунку 1.

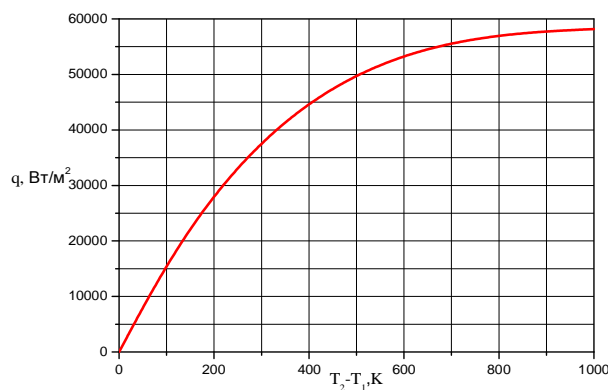


**Рисунок 1** – Зміна теплового потоку при зміні віддалі між стінками резервуара

Аналіз рисунка 1 показує, що при віддалі між стінками коаксіальних циліндрів рівній 3 м, величина потоку  $q = 94$  кВт/м<sup>2</sup>, а при віддалі 10 м –  $q = 58$  кВт/м<sup>2</sup>.

В процесі розвитку пожежі зовнішня поверхня внутрішнього резервуара буде нагріватися і значення величини  $T_1$  буде збільшуватися, а тепловий потік у виразі (1) буде зменшуватися.

При розглядуваних температурах в початковий момент пожежі різниця  $T_2 - T_1 = 1000$  К, а при нагріві внутрішнього резервуара до температури  $T_1 = 1300$  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 2.



**Рисунок 2** – Залежність теплового потоку від різниці температур стінок коаксіального резервуара.

З метою дослідження процесу нагрівання внутрішнього резервуара 1 тепловим потоком по товщині його стінки, розв'яжемо нестационарне рівняння теплопровідності в циліндричній системі координат [6]

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

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, °С.

Розв'язок рівняння (3) – (5) має вигляд

$$t(r, \tau) - t_0 = \frac{q \cdot R_2}{\lambda} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{(R_2)^2}{(R_2)^2 \cdot (R_1)^2} \cdot \left( 2 \cdot Fo - \frac{1}{4} \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{x^2}{(R_2)^2} \right) - \frac{(R_2)^2}{(R_2)^2} \times \right. \\ \left. \times \left( \ln \frac{x}{R_1} + \frac{(R_2)^2}{(R_2)^2 \cdot (R_1)^2} \cdot \ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{3}{4} \right) \right) + \\ + \sum_{n=1}^{50} \left( \frac{\pi}{\mu_n} \cdot \frac{J_2(\mu_n \frac{R_1}{R_2}) J_2(\mu_n)}{\left( J_2(\mu_n \frac{R_1}{R_2}) \right)^2 \cdot \left( J_2(\mu_n) \right)^2} \times \right. \\ \left. \times \left( J_0 \left( \mu_n \cdot \frac{x}{R_2} \right) \cdot Y_1 \left( \mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - Y_0 \left( \mu_n \cdot \frac{x}{R_2} \right) \cdot J_1 \left( \mu_n \cdot \frac{R_1}{R_2} \right) \right) \times \right. \\ \left. \times \exp(-(\mu_n)^2 \cdot Fo) \right) \end{array} \right\} \quad (6)$$

де  $J_i, Y_i$  – функції Бесселя першого і другого роду порядку 0 і 1 відповідно;  $Fo = \frac{a \cdot \tau}{R_2^2}$  – критерій Фур'є;

$a = \lambda / c \cdot \rho \left( \frac{m^2}{c} \right)$  – коефіцієнт теплопровідності;  $c$  – теплоємність,  $\left( \frac{Дж}{кг \cdot К} \right)$ ;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності сталевого резервуара,  $\frac{Вт}{м \cdot К}$ ;  $\mu_n$  – корені характеристичного рівняння

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

За формулою (6) проведені розрахунки зміни температурного поля по товщині стінки внутрішнього резервуара з плином часу. Результати досліджень представлені графічно на рис. 3 і 4

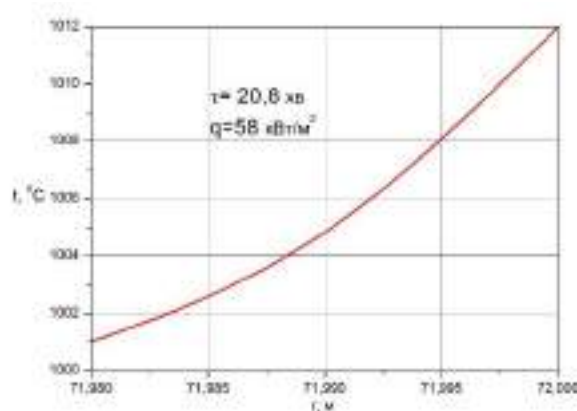
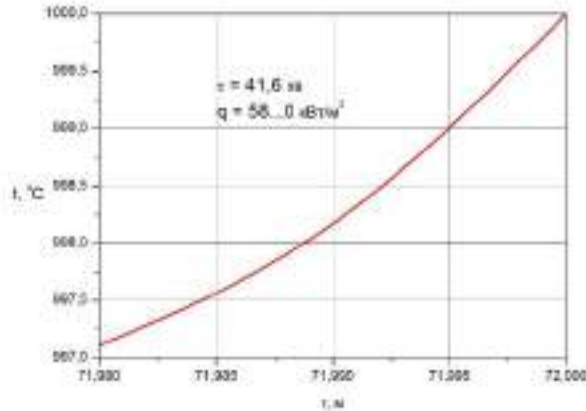


Рисунок 3 – Зміна температури по товщині стінки резервуара при дії теплового потоку постійної величини.



**Рисунок 4** – Зміна температури по товщині стінки резервуара при дії теплового потоку

На рисунку 2 показано зміну величини температури по товщині стінки резервуара за умови дії постійного теплового потоку. З графіка випливає, що різниця температури зовнішньої і внутрішньої сторони стінки резервуара не перевищує 10 °С. До температури 1000 °С сталеві стінки резервуара нагріваються за 20,8 хвилин.

На рисунку 3 показано зміну величини температури по товщині стінки резервуара за умови дії змінного в часі теплового потоку. При цьому враховувалися зміна теплофізичних характеристик сталевих резервуарів від величини температури, що представлені в таблиці 1. Температура 1000 °С в стінці резервуара досягається за 41,6 хвилин. Розрахунки проводилися з кроком по часу рівним  $\Delta\tau = 100$  с.

### Список літератури

1. Розенштейн И.М. Аварии и надёжность стальных резервуаров. – М.: Недра, 1995. – С. 44-172.
2. Сафарян М. К. Металлические резервуары и газгольдеры. – М.: Недра, 1987. С. 30-32.
3. ДБН В. 1-1-7 2002 Пожежна безпека об'єктів будівництва.
4. Романенко П.Н. Теплопередача в пожарном деле. / Романенко П.Н., Бубыр Н.Ф., Башкирцев М.П./ М.: ВШ МВД СССР, 1969. – 425с.
5. Зигель Р. Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. – М.: Мир, 1975. – 936с.
6. Лыков А.В. теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

### References

1. Rozenshtein I.M. Crashes and reliability of steel reservoirs. – Moskow: Nedra, 1995. – p. 44-172.
2. Safaryan M.K. Steel reservoirs and gasholders. Moskow: Nedra, 1995. – p. 30-32.
3. DBN V. 1-1-7 2002 Fire safety of building objects.
4. Romanenko P.N. Heat-transfer in fire business. / 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. Moskow: Mir, 1975. – 936 p.
6. Lykow A. V. Theory of thermal conductance. Moskow: Vysshaya Shkola, 1967. – 600 p.