

*М.М. Семерак<sup>1</sup>, д-р техн. наук, професор, С.В. Поздєєв<sup>2</sup>, д-р техн. наук, професор,  
Р.С. Яковчук<sup>1</sup>, канд. техн. наук, В.В. Чернецький<sup>3</sup>*  
(<sup>1</sup>Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,  
<sup>2</sup>Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ,  
<sup>3</sup>Управління ДСНС України в Івано-Франківській області)

### **МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ НА РЕЗЕРВУАРИ ІЗ НАФТОПРОДУКТАМИ В РЕЗЕРВУАРНИХ ПАРКАХ**

Розроблено математичні моделі для проведення досліджень, які дають змогу визначати граничні показники теплового впливу на конструкції резервуарів із нафтопродуктами при пожежі. Використовуючи схему теплового впливу пожежі на резервуар було розглянуто декілька сценаріїв розвитку пожежі. Ці сценарії розроблено для різних ситуацій займання нафтопродуктів на резервуарах суміжних з резервуаром, тепловий вплив пожежі на який вивчається.

В результаті математичного моделювання теплових процесів при пожежі на нафтобазі виявлені закономірності нагрівання поверхонь стінок резервуара із нафтопродуктом від ступеня його заповнення, типу палива, що горить у факелах над резервуарами та відстані між ними.

**Ключові слова:** резервуар, нафтопродукт, пожежа, факельне горіння, тепловий вплив пожежі, теплообмін, метод кінцевих елементів, нестационарна теплопровідність.

*М.М. Семерак, С.В. Поздеев, Р.С. Яковчук, В.В. Чернецкий*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВЛИЯНИЯ ПОЖАРА НА РЕЗЕРВУАРЫ С НЕФТЕПРОДУКТАМИ В РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКАХ**

Разработаны математические модели для проведения исследований, которые позволяют определять предельные показатели теплового воздействия на конструкции резервуаров с нефтепродуктами при пожаре. Используя схему теплового воздействия пожара на резервуар были рассмотрены несколько сценариев развития пожара. Данные сценарии разработаны для различных ситуаций возгорания нефтепродуктов в резервуарах смежных с резервуаром, тепловое воздействие пожара на который изучается.

В результате математического моделирования тепловых процессов при пожаре на нефтебазе выявлены закономерности нагрева поверхностей стенок резервуара с нефтепродуктом от степени его заполнения, типа горящего топлива в факелах над резервуарами и расстояния между ними.

**Ключевые слова:** резервуар, нефтепродукт, пожар, факельное горение, тепловое воздействие пожара, теплообмен, метод конечных элементов, нестационарная теплопроводность.

*M.M. Semerak, S.V. Pozdeyev, R.S. Yakovchuk, V.V. Chernetskyi*

### **MODELING OF THERMAL FIRE EFFECT ON TANKS WITH OIL PRODUCTS IN THE TANK FARMS**

One of these tasks is the development of mathematical models for calculations that allow you to determine the limits of the thermal effects on the structures of tanks with oil products during the fire. Using accepted mathematical tool, calculation method for the implementation of payment was developed for different scenarios of fire in the tank with oil products. After payment for the developed method were the results of mathematical modeling of temperature on the walls of the tank in a fire in adjacent tanks in a temperature distributions.

As a result of mathematical modeling of thermal processes during the fire on the oil depot identified patterns of heating surfaces of the tank's walls with oil products on the degree of completion, type of fuel that burns in torches under the tanks and the distance between them.

**Key words:** tank, oil product, fire, torch burning, thermal fire effect, heat exchange, finite elements method, transient heat conduction.

**Вступ.** Зростання споживання енергоресурсів, в тому числі нафтопродуктів і інших горючих рідин потребує вирішення актуальних науково-практичних завдань забезпечення пожежної безпеки об'єктів їх зберігання та транспортування. Одним із таких завдань є розробка математичних моделей для проведення розрахунків, які дають змогу визначати граничні показники теплового впливу на конструкції резервуарів із нафтопродуктами при пожежі. Таким чином виникає необхідність у використанні методів чисельного моделювання, що дають змогу отримувати необхідні параметри максимально точно і достовірно для всіх елементів досліджуваної конструкції. Для моделювання теплового впливу пожежі на резервуари із нафтопродуктами нами розглянута одна із конструкцій, що використовувалися на нафтобазі БРСМ у Василькові Київської обл., де 8 червня 2015 року сталася масштабна техногенна катастрофа, спричинена вибухом і наступним займанням нафтопродуктів.

Виникнення та розвиток пожежі в резервуарі залежить від таких факторів: наявності вибухонебезпечних концентрацій парів нафти (нафтопродуктів) всередині і зовні резервуара, наявності джерела запалювання, властивостей горючої рідини, що зберігається, конструктивних особливостей резервуара, а також схеми взаємного розташування резервуарів у резервуарному парку. Пожежа в резервуарі в більшості випадків починається з вибуху пароповітряної суміші, що утворюється під покрівлею резервуара. Вибух у резервуарі зі стаціонарною покрівлею призводить до підриву (рідше до зриву) покрівлі з наступним горінням на всій поверхні горючої рідини. При цьому, навіть на початковій стадії, горіння нафти та нафтопродуктів у резервуарі може супроводжуватися потужним тепловим випромінюванням у навколишнє середовище, а висота полум'я може сягати 1-2 діаметрів резервуара, який горить. Відхилення факела полум'я від вертикальної осі при швидкості вітру близько 4 м/с може становити 60-70 градусів. Факельне горіння може виникнути на дихальній арматурі, в місцях з'єднання пінних камер зі стінками резервуара, інших отворах або тріщинах у покрівлі, або стінках резервуара при концентрації парів нафтопродукту в резервуарі вище верхньої концентраційної межі розповсюдження полум'я.

**Постановка проблеми.** Одним з найбільш важливих параметрів, що характеризує розвиток пожежі в резервуарі, є тепловий режим пожежі. Залежно від фізико-хімічних властивостей горючих рідин, характер розподілу температур в об'ємі рідини, а також стінок резервуара з нафтопродуктом може бути різним.

Якщо розглядати теплові процеси, що відбуваються при теплообміні стінок резервуара із факелом пожежі, можна помітити, що ця задача має складну постановку і потребує залучення сумісних моделей термогазодинаміки, теплопровідності та моделі пристінкових шарів до поверхні стінок резервуара, який піддається тепловому впливу. Задача ускладнюється тим, що окрім вказаних моделей необхідно залучити для замкнутості комплексу моделей інтегральну модель променевого теплообміну. Це означає, що така задача вирішується тільки чисельно із використанням спеціалізованих комп'ютерних комплексів, які дають можливість проведення такого аналізу сумісних задач термодинаміки. Крім цього, така постановка задачі передбачає залучення потужної комп'ютерної техніки. Щоб уникнути суттєвого ускладнення поставленої задачі при збереженні відповідної точності та достовірності, ми зробили декілька припущень, які мають спростити модель. Припущення для спрощення мають такі положення.

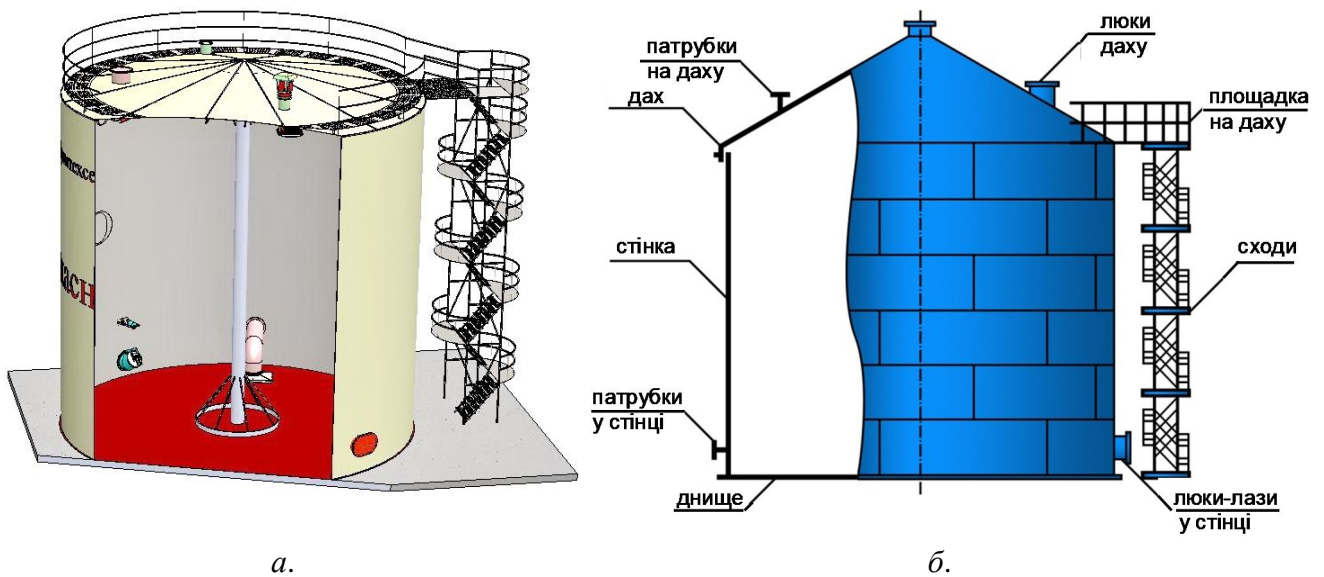
1. Пожежа на суміжному резервуарі є розвиненою і має форму факела висотою 15 м із конічною поверхнею із сталою усередненою температурою, яка становить  $T_f$ .

2. Теплообмін між факелами пожежі над резервуарами та стінками резервуару, а також у порожнині резервуара має тільки променевий характер, оскільки вплив конвективного теплообміну набагато менший.

3. Теплофізичні властивості сталі стінок резервуара можуть залежати від температури.

4. Причина та перебіг пожежі у початковий період не розглядається.

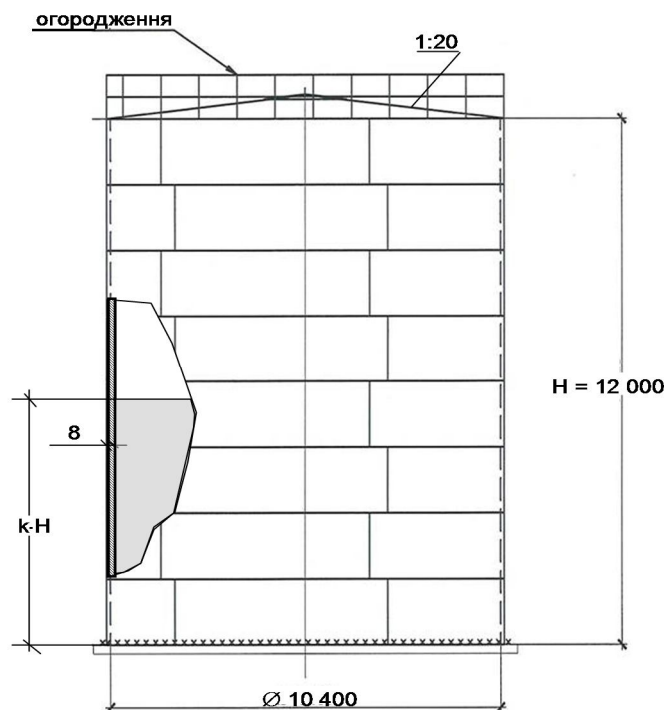
**Виклад основного матеріалу.** При зберіганні нафтопродуктів на складах паливно-мастильних матеріалів використовуються резервуари, найпоширеніша конструкція яких наведена на рис. 1. Щодо проектування резервуарів на нафтоосховищах існують рекомендації [1].



*а.* **Рисунок 1** – Конструкція резервуара для зберігання нафтопродуктів (а) та схема його конструктивних елементів (б)

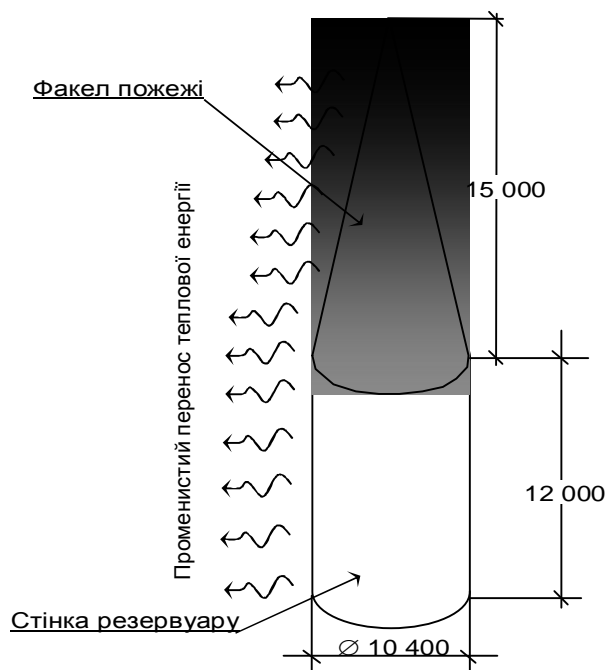
Згідно із рис. 1, огорожувальні конструкції резервуара для нафтопродуктів складаються з вертикальної стінки, днища та даху. Ці конструкції виготовляються із сталевих листів, що з'єднуються між собою за допомогою електрозварювання.

На рис. 2 представлена вибрана конструкція із геометричними параметрами, що була використана нами для моделювання.



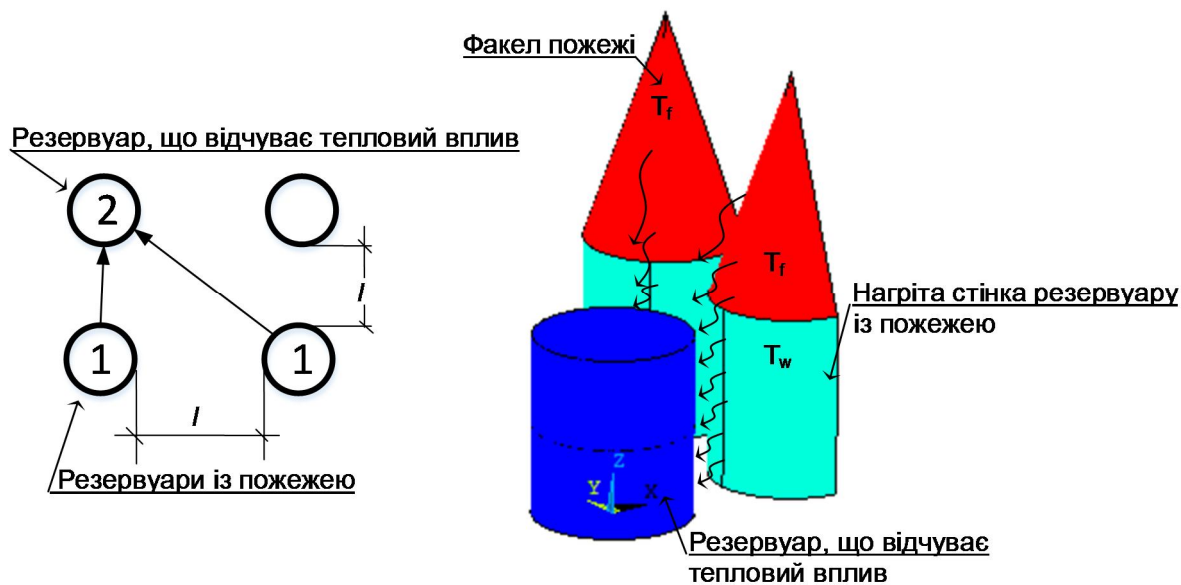
**Рисунок 2** – Конструктивна схема резервуару для нафтопродуктів

Джерелом теплового впливу при моделюванні є факел над резервуаром при пожежі, що має геометричні параметри, відповідно до схеми, наведеної на рис. 3.



**Рисунок 3** – Схема розташування факела над резервуаром, що горить

Використовуючи схему теплового впливу пожежі на резервуар ми розглянули декілька сценаріїв розвитку пожежі. Ці сценарії полягають у різних ситуаціях займання нафтопродуктів на резервуарах суміжних до резервуара, тепловий вплив пожежі на який вивчається. На рис. 4 показано схему теплового впливу пожежі на досліджуваний резервуар згідно із першим із прийнятих сценаріїв пожежі.



**Рисунок 4** – Схема взаємного розташування резервуарів за першим сценарієм

Сценарії пожежі передбачають два варіанти палива, що горить у факелі пожежі – нафта і бензин, при цьому температура факела буде дорівнювати 1500 К та 1400 К відповідно. Крім цього, варіанти сценарію розвитку пожежі передбачають різні рівні заповнення резервуарів паливом на 0,5 та 0,9 від об'єму резервуара. Для дослідження особливостей теплового впливу факелів пожежі, відстань між резервуарами приймаємо двох значень – 6 м та 10 м.

При розгляді теплообміну між факелом пожежі та стінками резервуара застосовуються граничні умови III роду, що відповідають закону Стефана-Больцмана [2 - 5].

Для розрахунку використано рівняння нестационарної теплопровідності. Рівняння теплопровідності для тривимірної розрахункової області записане у такому вигляді [2 - 5]

$$C_V(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

де  $C_V$  – об’ємна теплоємність, Вт/(м<sup>3</sup>·К);

Тепловий вплив на розрахункову область резервуара зі сторони зони підвищеної температури, яка утворюється при згорянні палива у факелі, описано граничними умовами (ГУ) III роду

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0,3,m} = \alpha_B (T_P - T_W), \quad (2)$$

де  $\alpha_B$  – коефіцієнт конвективного теплообміну, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$T_P, T_W$  – відповідно температури пожежного середовища і поверхні протипожежної перешкоди, °С;  $x$  – поточна просторова координата.

Коефіцієнт теплообміну визначається за допомогою узагальненого рівняння, що виражає закон Стефана-Больцмана [2 - 5]

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - \varphi_{ij}) \sigma T_j^4 = \sum_{j=1}^N \frac{1}{A_j} \left( \frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - \varphi_{ij} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_j} \right) q_j, \quad (3)$$

де  $\delta_{ij}$  – параметр, який дорівнює 0, якщо  $i \neq j$ , і дорівнює 1, якщо  $i = j$ ;

$q_j$  – інтенсивність поверхневого теплового потоку через  $i$ -ту поверхню, яка обмінюється випромінюванням з  $j$ -тою поверхнею, Вт/м<sup>2</sup>;

$\varphi_{ij}$  – променеві форм-фактори, залежні від взаємного розташування  $i$ -тої і  $j$ -тої площ поверхонь, які обмінюються випромінюванням, і визначаються за інтегральним рівнянням променевого теплообміну між поверхнями, що випромінюють тепло

$$\varphi_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} dA_j dA_i, \quad (4)$$

де  $\theta$  – кут між нормаллю до елемента і лінією, яка з’єднує елементи  $i$  та  $j$ ;

$r$  – відстань між центрами елементів  $i$  та  $j$ .

Нестационарне рівняння теплопровідності (1) може бути апроксимоване за допомогою методу кінцевих елементів [6, 7]. Для цього випадку при розв’язанні рівняння теплопровідності методом кінцевих елементів застосовується система нелінійних рівнянь, що у матричному записі має такий вигляд

$$[K(T)] \{T\} = \{Q(T)\}, \quad (6)$$

де  $[K(T)]$  – узагальнена матриця матеріальних коефіцієнтів;  $\{Q(T)\}$  – вектор зовнішніх вузлових теплових потоків. Врахувавши, що рівності зовнішні і внутрішні теплові потоки однакові, ця система доповнюється і записується у більш загальному вигляді

$$\{P(T)\} = \{Q(T)\}, \quad (7)$$

де  $\{P(T)\}$  – вектор внутрішніх вузлових теплових потоків, обумовлений параметрами сіткової моделі.

Ця система рівнянь розв’язується ітераційним методом Ньютона-Рафсона. При проведенні ітерацій має мінімізуватися нев’язність вигляду

$$\{\Phi\} \equiv \{Q(T)\} - \{P(T)\} \rightarrow \{0\}. \quad (8)$$

Метод Ньютона-Рафсона реалізується при застосуванні усічених рядів Тейлора до залишкового вектора нев’язності.

При проведенні цих процедур досягається лінеаризація системи рівнянь (6) у вигляді

$$[K_T^{(i-1)}] \{\Delta T^{(i)}\} = \{Q^{(i)}\} - \{P^{(i-1)}\}. \quad (9)$$

Для отримання рішення системи рівнянь виконуються рівноважні ітерації ( $i=1, 2, 3, \dots$ ), і визначаються нові значення температур на кожній ітерації з виразу

$$\{\mathbf{T}^{(i)}\} = \{\mathbf{T}^{(i-1)}\} + \{\Delta\mathbf{T}^{(i)}\}. \quad (10)$$

Ітерації проводяться до досягнення прийнятної збіжності.

У рівнянні (9), матриця  $[\mathbf{K}_T]$  називається дотичною матрицею або якобіаном. Коефіцієнти цієї матриці визначаються за виразом

$$[\mathbf{K}_T^{(i-1)}] \equiv \left( \frac{d\{\Phi\}}{d\{T\}} \right)_{i-1}. \quad (11)$$

Вектор  $\{\Phi\}$  розкладається в усічений ряд Тейлора і має такий вигляд

$$\{\Phi^{(i)}\} \cong \{\Phi^{(i-1)}\} + \left( \frac{d\{\Phi\}}{d\{T\}} \right)_{i-1} \{\Delta\mathbf{T}^{(i)}\}, \quad (12)$$

де  $\{\Delta\mathbf{T}^{(i)}\} = \{\mathbf{T}^{(i)}\} - \{\mathbf{T}^{(i-1)}\}$ .

Нелінійна постановка рівняння теплопровідності припускає використання методу Ньютона-Рафсона у комбінації з методом інтегрування за часом, що дає змогу записати вихідну систему рівнянь у такому вигляді

$$[\bar{\mathbf{K}}^{(i-1)}] \{\Delta\mathbf{T}^{(i)}\} = \{\mathbf{Q}^{(i)}\} - \{\bar{\mathbf{P}}^{(i-1)}\}, \quad (13)$$

де  $[\bar{\mathbf{K}}]$  – еквівалентна матриця теплопровідності;  $\{\bar{\mathbf{P}}\}$  – еквівалентний вектор внутрішнього теплового потоку

В рівнянні (6)  $\{\mathbf{Q}(T)\}$  – вектор вузлових теплових потоків, що визначається при перевизначенні вектора зовнішнього заданого теплового потоку  $\{\mathbf{Q}_{0n}\}$  та еквівалентної матриці теплопровідності  $[\bar{\mathbf{K}}(T)]$ .  $\{\bar{\mathbf{P}}\}$  – еквівалентний вектор вузлових внутрішніх теплових потоків, який визначається при перевизначенні еквівалентної матриці теплопровідності  $[\bar{\mathbf{K}}(T)]$ , визначуваною при чисельному інтегруванні за часом вектора  $\{\Delta\mathbf{T}^{(i)}\}$  методом Ейлера з використанням формули

$$\{\mathbf{T}_{n+1}\} - \{\mathbf{T}_n\} = \Delta t_n (1 - \zeta) \{\mathbf{T}_n\} + \Delta t_n \zeta \{\mathbf{T}_{n+1}\}, \quad (14)$$

де  $\Delta t_n$  – крок інтегрування за часом;

$\zeta$  – параметр Ейлера, рівний 0,5 за неявною обчислювальною схемою Кранка-Ніколсона.

Еквівалентна матриця теплопровідності  $[\bar{\mathbf{K}}(T)]$  визначається за виразом

$$[\bar{\mathbf{K}}_n(T)] = \frac{1}{\zeta \Delta t_n} [\mathbf{C}_n(T)] + [\mathbf{K}_n(T)], \quad (15)$$

де  $[\mathbf{C}_n(T)]$  и  $[\mathbf{K}_n(T)]$  – відповідно матриці теплоємностей та коефіцієнтів теплопровідності.

Для перевизначення  $\{\mathbf{Q}(T)\}$  використовується вираз

$$\{\mathbf{Q}_n(T)\} = \{\mathbf{Q}_{0n}\} + \frac{1-\zeta}{\zeta} [\mathbf{C}_n(T)] \{\mathbf{T}_n\} - [\mathbf{K}_n(T)] \{\mathbf{T}_n\}. \quad (16)$$

$\{\mathbf{Q}_{0n}\}$  – вектор зовнішнього заданого теплового потоку, який визначається за формулою

$$\{\mathbf{Q}_{0n}\} = \{\mathbf{Q}_n^{\text{конв}}\} + \{\mathbf{Q}_n^{\text{излуч}}\}, \quad (17)$$

де  $\{\mathbf{Q}_n^{\text{конв}}\}$  – поточний вектор конвективного поверхневого вузлового теплового потоку, який визначається за формулою

$$\{\mathbf{Q}_n^{\text{конв}}\} = \alpha_k (\{\mathbf{T}_{Wn}\} - \{\mathbf{T}_{Pn}\}) \mathbf{A}_e, \quad (18)$$

$\{Q_n^{sunp}\}$  – поточний вектор променистого поверхневого вузлового теплового потоку, який визначається за формулою

$$\{Q_n^{sunp}\} = \varepsilon \sigma (\{T_{Wn}^4\} - \{T_{Pn}^4\}) A_e, \quad (19)$$

$\{T_{Wn}\}$  – вектор поверхневих вузлових температур;

$\{T_{Pn}\}$  – вектор, члени якого дорівнюють температурі пожежного середовища, визначуваний за відповідним температурним режимом.

Використовуючи математичний апарат та комп'ютерні комплекси було розроблено методику для реалізації розрахунку за різними сценаріями розвитку пожежі в резервуарі з нафтопродуктом. Було виконано математичне моделювання процесів теплообміну при пожежі у резервуарах на складі нафтопродуктів із залученням енергетичного рівняння променевого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності, а також методу кінцевих елементів.

У результаті математичного моделювання теплових процесів при пожежі на нафтобазі виявлені закономірності нагрівання поверхонь стінок резервуара із нафтопродуктом від ступеня його заповнення, типу палива, що горить у факелах над резервуарами та відстані між ними.

Початкові дані, що використовуються для розрахунків, зведені до табл. 1.

**Таблиця 1**

*Початкові дані до розрахунку температурного розподілу у системі "стінка резервуара – факел пожежі"*

Початкова температура стінки резервуара, °C	Температура навколишнього повітря, °C	Температура стінки резервуара із пожежею, °C	Температура факела пожежі над резервуаром, °C	Ступінь чорноти поверхні стінки резервуара	Ступінь чорноти поверхні дзеркала нафтопродукту	Ступінь чорноти факела
20	20	225	Бензин	0,9	0,8	1
			1127			
			Нафта			
			1227			

Теплофізичні властивості сталі та бензину можна прийняти згідно з рекомендаціями [8]. Згідно із цими рекомендаціями прийняті теплофізичні характеристики, які подані у табл. 2.

**Таблиця 2**

*Теплофізичні характеристики сталі та бензину*

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(T)$ , Вт/(м·°C)	Питома теплоємність, $c_p(T)$ , Дж/(кг·°C)	Густина, кг/м <sup>3</sup>
Теплофізичні характеристики сталі		
$\lambda = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} T$ при 20 °C ≤ T ≤ 800 °C $\lambda = 27,3$ при 800 °C < T ≤ 1200 °C	$c_p = 425 + 0,773 T - 1,69 \cdot 10^{-3} T^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} T^3$ при 20 °C ≤ T ≤ 600 °C $c_p = 666 - 13002(T - 738)^{-1}$ при 600 °C < T ≤ 735 °C $c_p = 545 - 17820(T - 731)^{-1}$ при 735 °C < T ≤ 900 °C $c_p = 650$ при 900 °C < T ≤ 1200 °C	7850
Теплофізичні характеристики бензину		
1,1	2740	768

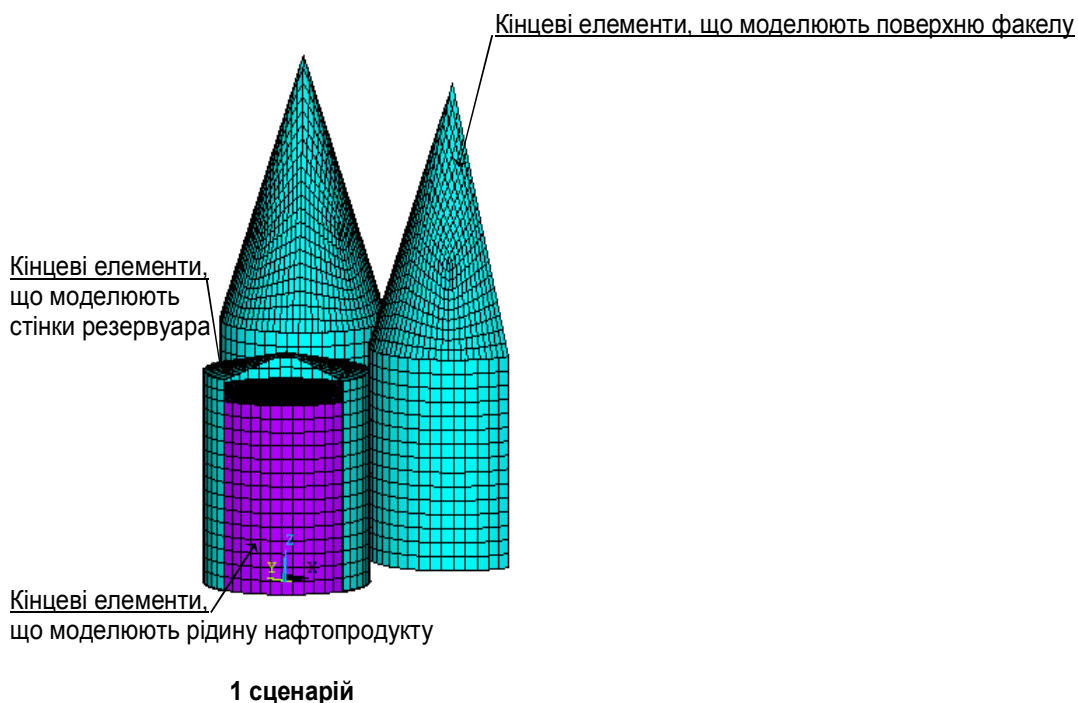
Було розроблено розрахункову методику для реалізації розрахунку за описаним вище сценарієм пожежі. Згідно із цією методикою, розрахунок проводиться за такими процедурами:

1. Будується геометрична модель з прикладанням граничних умов 4-го роду, відповідно до рис. 2 – 4.

2. Організовується цикл, в ході якого змінюється час впливу пожежі.

3. Час теплового впливу пожежі становить 60 хв, оскільки попередній розрахунок показав, що тепловий процес за цей час встановлюється.

Для реалізації такого алгоритму були створені кінцево-елементні схеми, які наведені на рис. 5.



**Рисунок 5** – Кінцево-елементні схеми теплової взаємодії між факелами пожежі над резервуарами та резервуаром без пожежі

При реалізації обчислювального процесу були прийняті параметри алгоритму чисельного інтегрування, що подані у табл. 3.

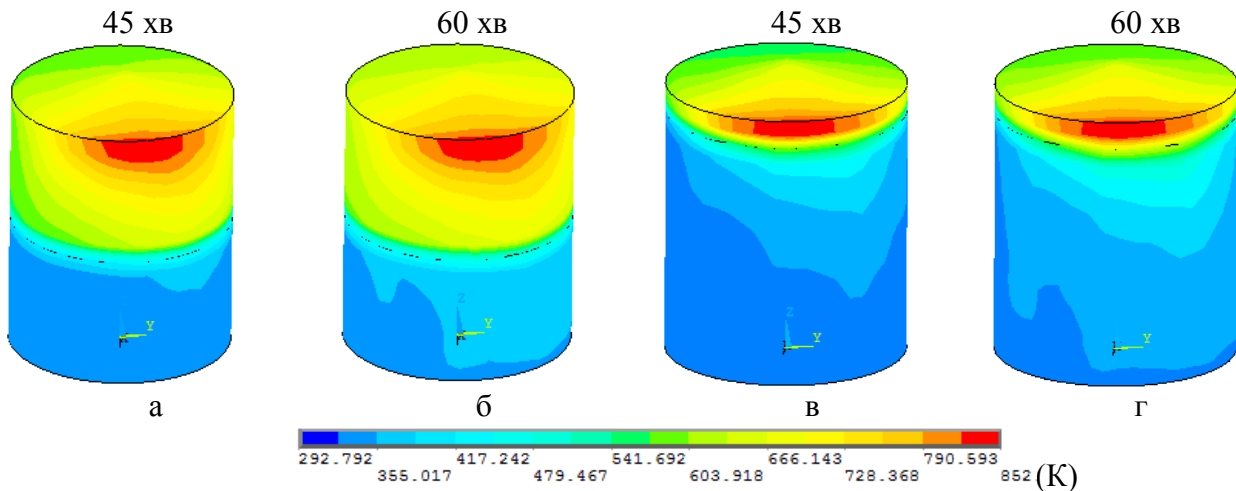
**Таблиця 3**

*Параметри обчислювального процесу*

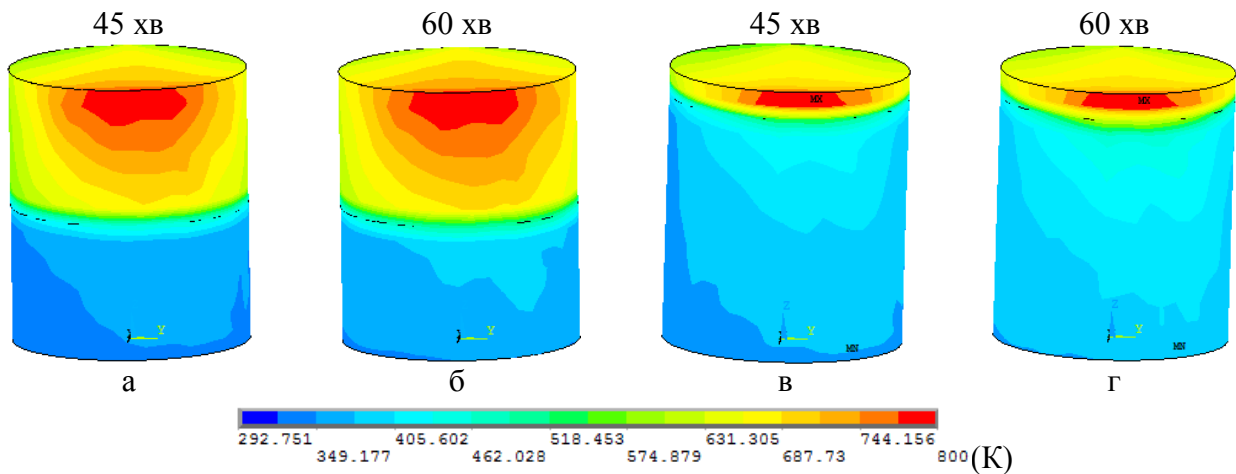
Параметр обчислювального процесу	Одиниці вимірювання	Значення
Тип аналізу		Нестационарний
Автоматичний вибір кроку інтегрування		Включений
Часовий крок інтегрування	с (хв)	30 (0,5)
Найменший часовий крок	с	10
Найбільший часовий крок	с	30
Максимальна кількість ітерацій		1000
Спосіб прикладання навантаження		Ступінчастий
Тип обчислювальної схеми		Неявна
Просторовий крок (середній)	м	0,8
Точність збіжності обчислень	(%)	0,005 (0,5)

Після проведення розрахунків за розробленими методиками нами були отримані результати у вигляді температурних розподілів. Картина температурних розподілів у різні моменти часу для різних сценаріїв пожежі (температура факела 1400 К) наведена на рис. 6 – 7.





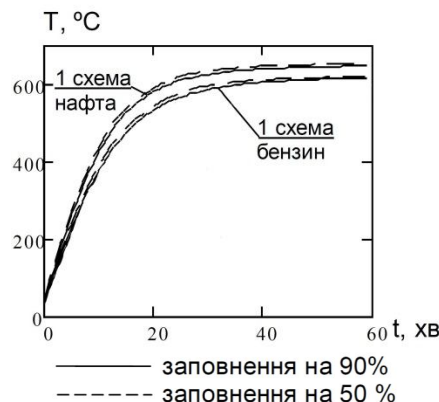
**Рисунок 6** – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуара із тепловим впливом пожежі за першою схемою із його заповненням на 50 % (а, б) та на 90 % (в, г) при  $l = 6$  м



**Рисунок 7** – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуара із тепловим впливом пожежі за першою схемою із його заповненням на 50 % (а, б) та на 90 % (в, г) при  $l = 10$  м

Аналіз температурного розподілу, представлений на вказаних рисунках показує, що найбільш небезпечним є сценарій горіння нафтового факела при температурі 1500 К.

Також слід відмітити, що в кожному випадку на максимальну температуру нагрівання стінки резервуара його наповненість нафтопродуктом майже не впливає. Це підтверджують графіки на рис. 8, що є кривими максимальної температури нагрівання стінки резервуара у залежності від часу впливу пожежі на суміжних резервуарах.



**Рисунок 8** – Криві максимальної температури нагрівання стінки резервуара, залежно від часу впливу пожежі на суміжних резервуарах, розташованих за 1 схемою

Для виконання проектних розрахунків потрібно знати закономірність зміни максимальної температури залежно від відстані між резервуарами. Враховуючи складний характер розрахунків ми запропонували визначити регресійні функції для залежностей. Для побудови регресійних залежностей було визначено, що вони повинні відповідати поліномам другого порядку. Застосовуючи підхід мінімізації середньоквадратичної нев'язності, ми визначили коефіцієнти регресії. Визначені коефіцієнти наведені у табл. 4.

**Таблиця 4**

*Коефіцієнти регресії залежностей середньої максимальної температури внутрішньої поверхні стінки резервуара, що контактує із нафтопродуктом, від відстані між резервуарами*

Коефіцієнти регресії $T(l) = a_0 + a_1l + a_2l^2$ , °C	$a_0$	$a_1$	$a_2$	Похибка, %
бензиновий факел, резервуар, заповнений на 50 %;	151.59	13.958	-0.508	0.37
бензиновий факел, резервуар, заповнений на 90 %;	528.623	-24.855	0.5	0.35

Отримані дані можна використовувати для прогнозування температури нагрівання стінок резервуара, залежно від відстані між резервуарами.

**Висновки.** З огляду на проведені дослідження можна зробити такі висновки.

1. Математично змодельовано процеси теплообміну під час пожежі на складі нафтопродуктів, де вони зберігаються у резервуарах, із залученням енергетичного рівняння променевого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності, а також методу кінцевих елементів.

2. У результаті математичного моделювання теплових процесів під час пожежі на нафтобазі виявлено закономірності нагрівання поверхонь стінок резервуара із нафтопродуктом від ступеня його заповнення, типу палива, що горить у факелах над резервуарами та відстані між ними.

3. Побудовано регресійні залежності максимальних температур зовнішньої поверхні стінки резервуара та внутрішньої поверхні стінки, яка контактує із нафтопродуктом.

4. Отримані регресійні залежності можна використовувати для проектування нафтобаз при виборі геометричних параметрів резервуарів та відстаней між ними.

#### Список літератури:

1. ДСТУ Б В.2.6-183:2011 Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів. Загальні технічні умови.
2. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / Тихонов А.Н., Самарский А.А. – М.: Высшая школа, 1976. – 664 с.
3. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем / Самарский А.А. – М.: Наука, 1971. – 554 с.
4. Самарский А.А. Вычислительная теплопередача / Самарский А.А., Вабищевич П.Н. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
5. Власова Е.А. Приближенные методы математической физики: [учебн. для вузов / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко] / Власова Е.А., Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н. – М.: МГТУ им. Баумана, 2001. – 700 с.
6. Метод конечных элементов в механике твердых тел / [Сахаров А.С., Кислоокый В.М., Киричевский В.В. и др.]; под ред. А.С. Сахарова, И.А. Альтенбаха. – К.: Вища школа, 1982. – 480 с.
7. ANSYS, ANSYS 9.0 Manual Set, ANSYS Inc., Southpoint, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA.
8. EN 1994-1-2:2005 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design.

### References:

1. DSTU B.V. 2.6-183:2011 Reservoirs vertical cylindrical steel for oil and petroleum products. General specifications. (2011), Kiev: Ukraine State Building. (in Ukr.)
2. Tikhonov A.N. (1976). *Equations of mathematical physics*. Moskva: Vysshaya shkola (in Rus)
3. Samarskyj A.A. (1971). *Introduction to the theory finite difference schemes*. Moskva: Nauka (in Rus)
4. Samarskyj A.A., Vabyshhevych P.N. (2003). *Computational heat conduction*. Moskva: Edytoryal URSS (in Rus)
5. Vlasova E.A., Zarubyn V.S., Kuvyrkyn G.N. (2001). *Approximate methods of mathematical physics*. Moskva: MGTU im. Baumana (in Rus)
6. Saharov A.S., Kyslookyj V.M., Kyrchevskij V.V. (1982). *The Finite Element Method in the mechanics of solid bodies*. Kiev: Vysshaya shkola (in Rus)
7. ANSYS, ANSYS 9.0 Manual Set, ANSYS Inc., Southpoint, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA
8. EN 1994-1-2:2005 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design.

