

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ**

**ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ**

**ЧЕРНЕЦЬКИЙ ВОЛОДИМИР ВОЛОДИМИРОВИЧ**

**УДК 614.841**

**ВПЛИВ ТЕПЛОВИХ ФАКТОРІВ ПОЖЕЖІ НА ЦІЛІСНІСТЬ  
ВЕРТИКАЛЬНИХ СТАЛЕВИХ РЕЗЕРВУАРІВ З НАФТОПРОДУКТАМИ**

21.06.02 – пожежна безпека

**АВТОРЕФЕРАТ**

Дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор, **Семерак Михайло Михайлович**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, завідувач кафедри термодинаміки і фізики, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, заслужений діяч науки і техніки України

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор, **Басманов Олексій Євгенович**, головний науковий співробітник наукового відділу науково-дослідного центру з проблем цивільного захисту та техногенно-екологічної безпеки (Національний університет цивільного захисту України);

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, **Антонов Анатолій Васильович**, професор кафедри екологічної безпеки (ДЗ «Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління Мінприроди України)

Захист дисертації відбудеться 22 грудня 2016 р. о 14<sup>30</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради К 35.874.01 у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Львівського державного університету безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

Автореферат розіслано « 22 » листопада 2016 р.

Т. в. о. вченого секретаря  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук, доцент

В.І. Луц

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Після видобування нафти, її переробки і отримання різноманітних рідких нафтопродуктів (бензину, дизельного пального, олив та різних розчинників) істотно виникає потреба в їх тимчасовому зберіганні з подальшою реалізацією споживачам. З цією метою створюють спеціальні комплексні споруди (резервуарні парки), які забезпечують не тільки тимчасове збереження нафти та нафтопродуктів, але і їх прийом від виробників та реалізацію споживачам. Велика кількість легкозаймистих рідин, що зберігається, створює високу пожежну небезпеку таких об'єктів, а пожежі, що на них виникають, наносять значні матеріальні збитки і часто призводять до загибелі людей.

Кожна четверта пожежа в резервуарних парках перетворюється в групову і завершується повним вигоранням нафтопродукту (виключення складають вертикальні сталеві резервуари із подвійною стінкою та плаваючою покрівлею).

Пожежі, під час яких полум'я поширюється на групу, що складається з двох або більшої кількості резервуарів, називають груповими. Причинами таких пожеж бувають загазованість території або поширення полум'я на групу резервуарів внаслідок аварійного розтікання палаючої рідини із зруйнованого (такого, на якому стався вибух) резервуара під час скипання або викиду нафти (нафтопродукту).

Розкриття особливостей впливу нестационарних теплових процесів в конструкціях вертикальних сталевих резервуарів, які відбуваються внаслідок дії теплових факторів пожежі, є актуальною науковою задачею, розв'язання якої є підґрунтям розрахункових методів визначення їх цілісності, а також передумовою підвищення ефективності забезпечення пожежної безпеки резервуарних парків зберігання нафтопродуктів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась відповідно до "Концепції Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2011 – 2015 роки", затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 29 грудня 2010 р. №2348-р та "Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2012 – 2015 роки", затвердженої постановою Кабінетом Міністрів України від 01.06.2012 р. №590, у рамках виконання науково-дослідної роботи Львівського державного університету безпеки життєдіяльності "Вогнестійкість інженерних конструкцій за умов пожежі на нафтохімічних підприємствах в 2014-2015 роках" (номер державної реєстрації №0114U005546), в якій здобувач був виконавцем.

**Ідея роботи** полягає у підвищенні ефективності забезпечення пожежної безпеки резервуарних парків зберігання нафтопродуктів у вертикальних сталевих резервуарах шляхом застосування, під час їх проектування та виготовлення, розрахункових методик, які враховують особливості впливу нестационарних теплових процесів в їх конструкціях, які відбуваються внаслідок дії теплових факторів пожеж на таких об'єктах, зокрема їх термонапружений стан.

**Мета роботи** – виявлення особливостей впливу нестационарних теплових процесів в конструкціях вертикальних сталевих резервуарів, які відбуваються внаслідок дії на них теплових факторів пожеж, на їх цілісність.

**Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:**

- провести аналіз сучасного стану пожежної безпеки об'єктів зберігання нафти і нафтопродуктів та виявити шляхи їх підвищення;
- змодельовати та визначити динаміку теплових потоків, що діють на резервуар за умов горіння нафтопродуктів в сусідніх резервуарах, в залежності від температури полум'я, динаміки процесу горіння, розмірів резервуарів і відстані між ними;
- змодельовати та визначити динаміку нагріву резервуара від дії теплового потоку пожежі на сусідньому резервуарі, а також від пожежі на двох і більше резервуарах;
- розробити методику визначення та дослідження термонапруженого стану вузла з'єднання циліндричної стінки і днища вертикальних сталевих резервуарів за умов пожежі.

**Об'єкт досліджень** – нестационарні теплові процеси в конструкціях вертикальних сталевих резервуарів, які відбуваються внаслідок дії теплових факторів пожеж в резервуарних парках зберігання нафти і нафтопродуктів.

**Предмет досліджень** – вплив нестационарних теплових процесів в конструкціях вертикальних сталевих резервуарів, які відбуваються внаслідок дії теплових факторів пожеж в резервуарних парках зберігання нафти і нафтопродуктів, на їх цілісність.

**Методи досліджень.** Для досягнення поставленої мети і вирішення завдань теоретичних досліджень використано методи математичного моделювання, основні положення теорії складного теплообміну, рівняння математичної фізики, теорії термопружності пластин і оболонок, нестационарної теплопровідності.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Виявлено особливості впливу нестационарних теплових процесів в конструкціях вертикальних сталевих резервуарів, які відбуваються внаслідок дії на них теплових факторів пожеж, на їх цілісність. **При цьому:**

- *Вперше* шляхом математичного моделювання процесу теплообміну при пожежі в резервуарних парках із залученням енергетичного рівняння променевого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності, методом кінцевих елементів виявлено закономірності нагрівання поверхонь стінок резервуарів із нафтопродуктом від ступеня їх заповнення, типу палива, що горить у вигляді факелів, над резервуарами та відстані між ними. Розглянуто чотири схеми розміщення резервуарів, що горять та їх вплив на один резервуар який не горить.
- *Вперше* визначено термонапружений стан вузла з'єднання циліндричної стінки та днища резервуару за умов пожежі;
- *Вперше* розроблено математичну модель аналітичного визначення інтенсивності теплових потоків між резервуарами при пожежі з урахуванням зміни величини теплового потоку з часом;

- *Вперше* проведено математичне моделювання та визначено динаміку теплових процесів у вертикальних сталевих резервуарах ємністю 75 000 м<sup>3</sup> з подвійною стінкою.

- *Удосконалено* математичну модель складного теплообміну між факелом полум'я та резервуаром із врахуванням теплофізичних і геометричних параметрів полум'я пожежі та залежності теплофізичних характеристик металу від температури.

- *Набуло подальшого розвитку* моделювання нестационарних теплових процесів, які відбуваються в металевих конструкціях вертикальних резервуарів внаслідок температурного впливу пожеж і можуть призвести до втрати їх цілісності, що є методологічною основою розроблення заходів з підвищення ефективності пожежної безпеки резервуарних парків з нафтопродуктами.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** підтверджується використанням відомих систем диференціальних рівнянь теорії нестационарної теплопровідності та теплообміну для резервуарів за умов пожежі. Температурні напруження вузла з'єднання бокової стінки та днища резервуара досліджувалися з використанням рівнянь теорії термопружності тонких циліндричних оболонок і пластин. Числові результати аналітичних досліджень якісно та кількісно узгоджуються з результатами одержаними методом кінцевих елементів.

**Наукове значення роботи** полягає в одержанні аналітичних залежностей для визначення термонапруженого стану циліндричної поверхні вертикального сталевого резервуара з нафтопродуктами за умов дії на нього температурних факторів пожежі.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у створенні науково обґрунтованих передумов підвищення ефективності забезпечення пожежної безпеки резервуарних парків зберігання нафти і нафтопродуктів з наявністю вертикальних металевих резервуарів.

**Особистий внесок здобувача.** Особисто здобувач сформулював мету і завдання дослідження, провів аналіз літературних джерел, узагальнив одержані теоретичні результати. Автором розроблено методику теоретичного дослідження теплових потоків при пожежі в одному резервуарі, а також узагальнено дію теплових потоків, які виникають під час групової пожежі в резервуарних парках зберігання нафти і нафтопродуктів.

Розроблено математичне моделювання та методику визначення впливу теплового потоку при пожежі у вертикальному сталевому резервуарі ємністю 75 000 м<sup>3</sup> з подвійною стінкою та плаваючою покрівлею.

Всі основні результати дисертаційних досліджень отримані автором самостійно.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на семінарах Львівського державного університету безпеки життєдіяльності (2011-2015 роках); на II міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених і спеціалістів «Проблеми техносферної безпеки-2013» (м. Москва, Російська Федерація, 2013 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Забезпечення пожежної та

техногенної безпеки» (м. Харків, Україна, 2013 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації безпека та захист» (м. Черкаси, Україна, 2015 р.); на II Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейській досвід і перспективи» (м. Львів, Україна, 2015 р.);

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані у 12 наукових працях, із яких 8 у фахових наукових виданнях (з них 1 (одна) у закордонних виданнях), 4 у збірниках матеріалів науково-технічних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел із 112 найменувань; основна частина містить 110 сторінок друкованого тексту, 76 рисунків, 10 таблиць та додатків.

### **Основний зміст роботи**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, показано її зв'язок із науковими програмами та темами. Сформульовано ідею роботи, об'єкт, предмет, мету та завдання дослідження, наукову новизну та практичну значущість одержаних результатів.

У **першому розділі** дисертації проаналізовано особливості аварійних ситуацій в парках вертикальних сталевих резервуарів за умов пожежі. Розглянуто особливості виникнення пожежі в окремому резервуарі і динаміку розвитку пожежі та її поширення на резервуарний парк. Проаналізовано сучасний стан аналітичних досліджень руйнування резервуарів, теплові процеси спричинені пожежею, теплові потоки полум'я пожежі і її дія на процес нагріву сусідніх резервуарів залежно від геометричних розмірів резервуарів та відстаней між ними. Показано, що на руйнування резервуарів та вибухів у ньому впливають термодинамічні процеси, які проходять при пожежі. Відзначено, що руйнування резервуарів при вибуху іноді супроводжується відривом корпусу від днища і його польотом на значні відстані. В роботах Волкова О.М. наведено приклади, що при вибуху резервуару РВС – 5000 його корпус відлетів приблизно на 50 м, а при вибуху РВС – 700 – на 25 м. Виявлено, що при проектуванні виготовленні та експлуатації резервуарних парків протягом близько 140 років, зовсім не враховувався вплив температурних деформацій та температурних напружень, які виникають в стінці та днищі резервуару за умов дії на них теплових факторів пожежі, на їх міцність та цілісність.

Відмічено, що дослідженню проблем цілісності конструкцій вертикальних сталевих резервуарів присвячені наукові роботи: Абрамова Ю.О., Басманова О.Є., Безродного І.Ф., Блінова В.І., Волкова О.М., Вороніна О.А., Гилетича А.М., Гришина В.В., Денисова О.Н., Кондакова Г.П., Корневського А.Н., Меркулова В.А., Розенштейна Н.М., Сафаряна М.К., Худякова Г.Н., Цвигуна А.О., Чучковського В.М., Швиркова С.А., Яковлєва В.С. та ін. У роботах цих авторів широко досліджувалися процеси горіння нафтопродуктів в резервуарах, теплові потоки, зумовлені пожежею, динаміка виникнення та розвитку пожеж і тактика їх гасіння. Однак вплив теплових факторів пожежі на напружено-деформований стан вузла спряження стінки з днищем резервуара до цього часу не

вивчався. На основі виконаного огляду наукової літератури сформульовані завдання досліджень.

У другому розділі проведено математичне моделювання теплових процесів за умов горіння нафтопродуктів у резервуарах. При математичному моделюванні враховано, що горіння рідких вуглеводнів температура полум'я може сягати  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $1500\text{ K}$ ). При пожежах в резервуарних парках можливі різні варіанти розвитку, такі як пожежа в обвалуванні, факельне горіння резервуарів, горіння відкритого резервуару тощо. Кожен з варіантів розвитку пожежі буде характеризуватися різними тепловими потоками. При горінні одного резервуару тепловий потік який діє на сусідній резервуар залежить від радіусів резервуарів та відстані між ними (рис. 1.)

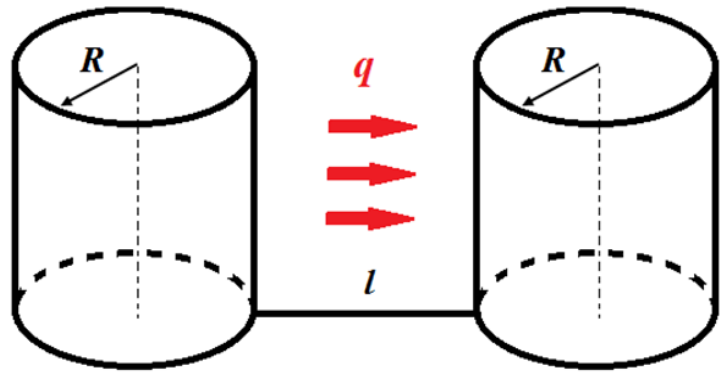


Рисунок 1 – Схематичне зображення процесу нагрівання

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

де  $\alpha^*$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ ;  $\varepsilon_{при}$  – приведений ступінь чорноти стінок резервуарів;  $\psi$  – кутовий коефіцієнт випромінювання,  $T_1$  – температура стінки резервуара, що нагрівається від теплового потоку,  $К$ ;  $T_2$  – температура стінки резервуара, що горить,  $К$ .

Приведений ступінь чорноти залежить від зовнішньої поверхні стінок резервуарів. Він визначається за формулою

$$\varepsilon_{при} = \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} \quad (2)$$

де  $\varepsilon_1$  – ступінь чорноти полум'я;  $\varepsilon_2$  – ступінь чорноти стінки резервуара 2. Кутовий коефіцієнт випромінювання  $\psi$ , який залежить від радіуса резервуарів

Кутовий коефіцієнт випромінювання  $\psi$ , який залежить від радіуса резервуарів  $R$  і віддалі між ними  $l$ , знаходиться за формулою

$$\psi = \frac{1}{\pi} \left( \sqrt{X^2 - 1} + \arcsin \left( \frac{1}{X} \right) - X \right), \quad (3)$$

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

За виразом (3) проведені дослідження зміни кутового коефіцієнта в залежності від віддалі  $l$  між резервуарами для різних значень радіуса  $R$ . Результати досліджень представлені графічно на рис. 2.

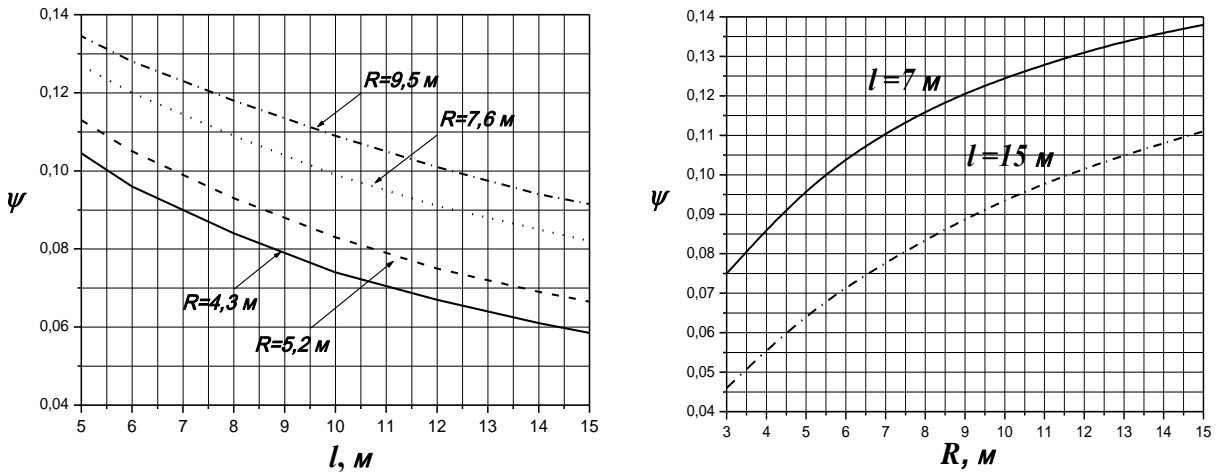


Рисунок 2 – Залежність кутового коефіцієнту  $\psi$  від відстані між резервуарами  $l$  та радіуса резервуара  $R$ .

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

Для температури полум'я  $T_2=1500\text{ K}$  і температури сусіднього резервуара  $T_1=300\text{ K}$  проведено дослідження інтенсивності теплового потоку. Результати представлені графічно на рис. 3.

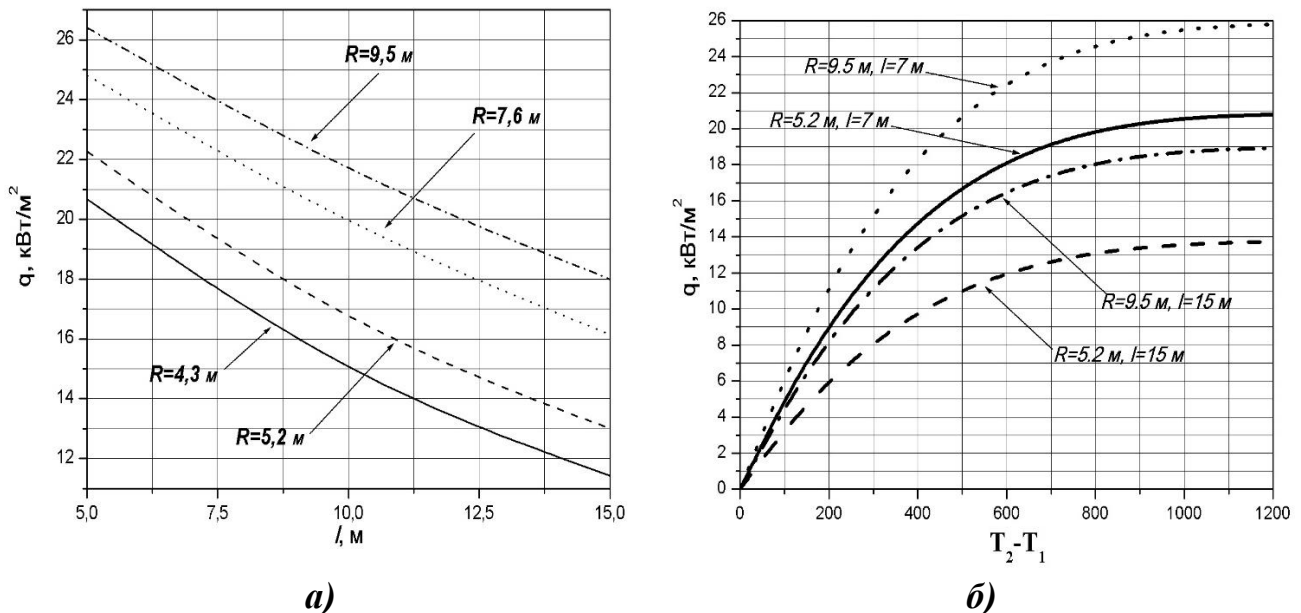


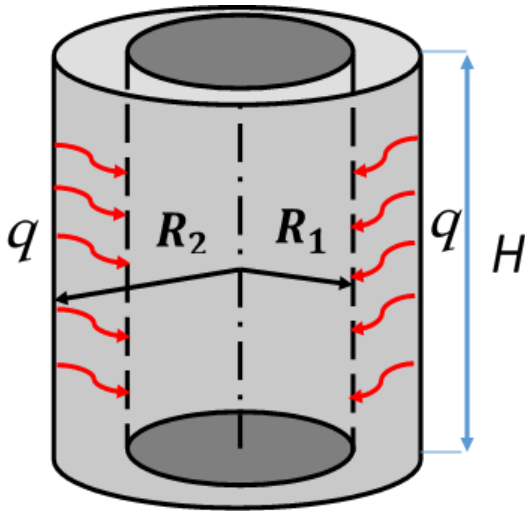
Рисунок 3 – Залежність інтенсивності теплового потоку від: **а)** - відстані між резервуарами та радіусами резервуарів; **б)** - різниці температур стінок резервуарів

Для РВС – 1000 збільшення віддалі між резервуарами з 7 до 10 м інтенсивність теплового потоку зменшиться на 24%. При збільшенні радіуса резервуару від 5,2 до 9,5 м при  $l=7\text{ м}$  інтенсивність теплового потоку збільшиться на 22%.

При нагріванні резервуару, його температура постійно збільшується. Чим більша його температура, тим менше тепла він поглинає. При досягненні



температури  $1500\text{ K}$  між резервуарами буде термодинамічна рівновага, тобто інтенсивність теплового потоку  $q=0$  (рис. 3 б).



Вперше проведено моделювання динаміки теплових процесів у вертикальних сталевих резервуарах ємністю  $75\ 000\text{ м}^3$  з подвійною стінкою та плаваючою покрівлею (рис. 4). Знайдено вирази для дослідження кутового коефіцієнта, інтенсивності теплового потоку між стінками резервуарів в залежності від радіусів та різниці температур резервуарів.

Кутовий коефіцієнт випромінювання для двостінних резервуарів визначається за формулою

Рисунок 4 – Схематичне зображення процесу нагріву двостінного резервуара

$$\psi = \frac{1}{R} - \frac{1}{\pi R} \left[ \arccos\left(\frac{B}{A}\right) - \frac{1}{\pi L} \left( \sqrt{(A+2)^2 - (2R)^2} \arccos\left(\frac{B}{R \cdot A}\right) + B \cdot \arcsin\left(\frac{B}{A}\right) - \pi \frac{A}{2} \right) \right] \quad (4)$$

де  $A = L^2 + B^2 - 1$ ;  $B = L^2 - R^2 + 1$ ;  $R = R_2/R_1$ ;  $H = l/R_1$ ;  $H = 20\text{ м}$  – висота резервуару.

Дослідження кутового коефіцієнта (4) представлені графічно на рис. 5.

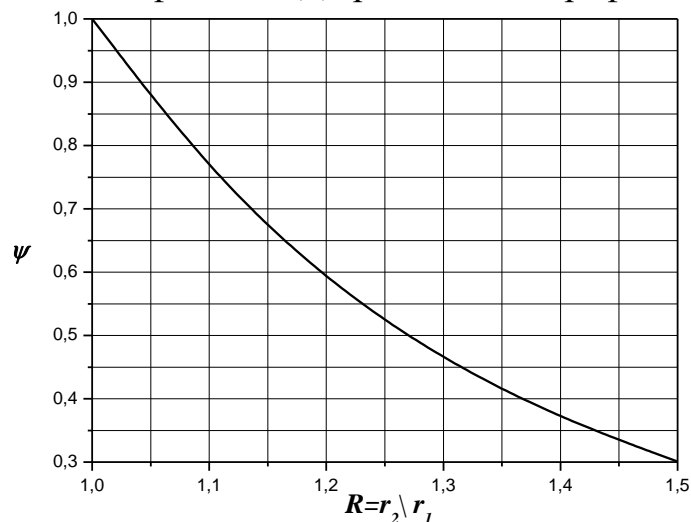


Рисунок 5 – Залежність кутового коефіцієнту  $\psi$  від відношення радіусів зовнішнього та внутрішнього резервуарів

Враховуючи рівність (4) визначено інтенсивність теплового випромінювання, яку сприймає внутрішній резервуар. Результати представлені графічно на рис. 6.

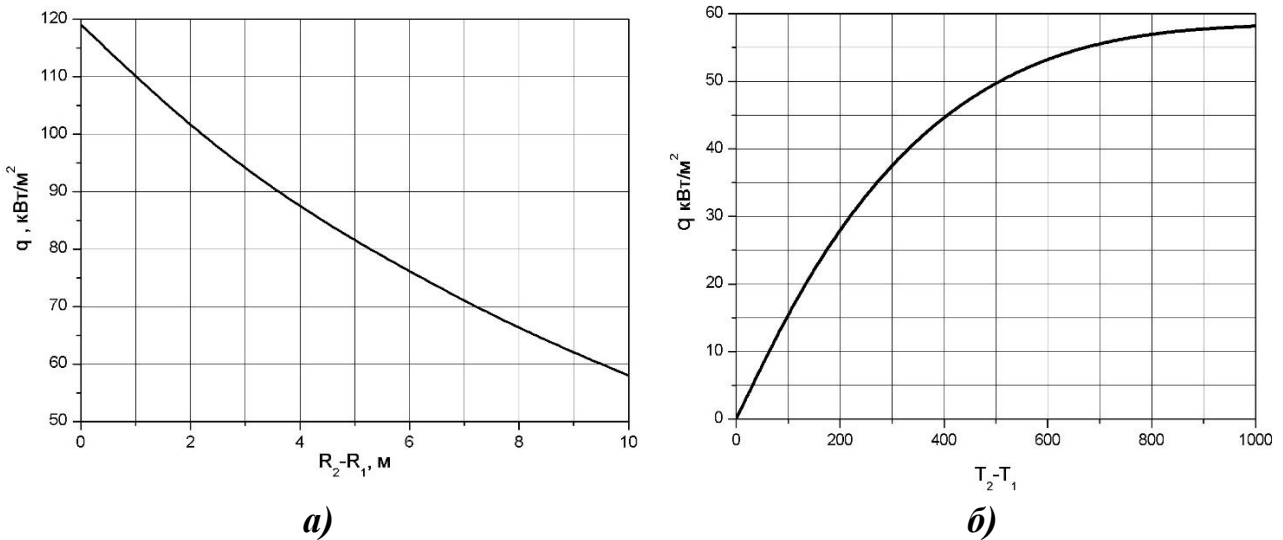


Рисунок 6 – Залежність інтенсивності теплового потоку від: **а)** різниці радіусів двостінного резервуара; **б)** різниці температур стінок коаксіального резервуара

Отримані результати дали можливість дослідити розподіл температурного поля по товщині стінки резервуара. Результати обчислень наведені у третьому розділі.

Змодельовано теплові процеси, які відбуваються в замкненому просторі резервуара. Оскільки резервуар піддається вогневому впливу, то найбільш нагрітими елементами конструкції будуть покрівля резервуара і верхні пояси, які не омиваються нафтопродуктом. В роботі розраховано теплові потоки, які сприймає нафтопродукт, що зберігається в резервуарі, від найбільш нагрітих поверхонь (рис. 7).

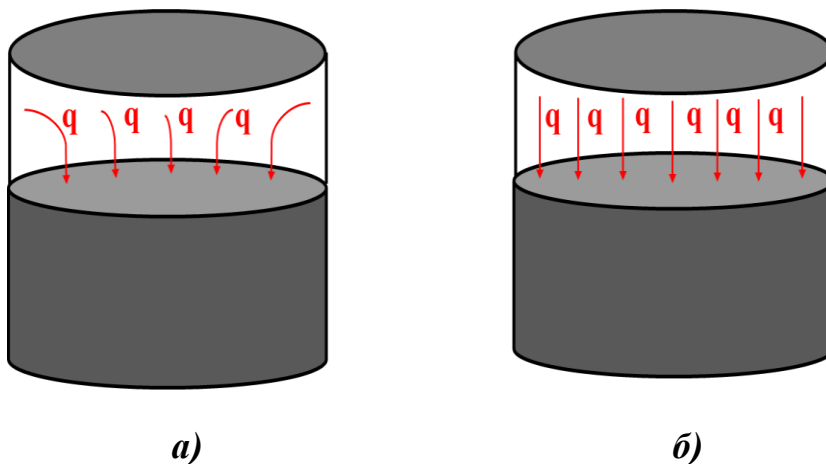


Рисунок 7 – Схематичне зображення теплових потоків, які діють на нафтопродукт в середині резервуара від: **а)**– від бокових стінок; **б)**– від покрівлі

Тепловий потік, який сприйматиме дзеркало нафти, складається з двох складових: тепловий потік від випромінення покрівлі резервуара і тепловий

потік від випромінювання бічних стінок резервуара, які розташовані вище дзеркала нафти. Інтенсивність теплового потоку визначається за формулою

$$q = q_{\delta} + q_n, \quad (5)$$

де  $q_{\delta}$  - інтенсивність теплового потоку, який випромінює бічна стінка резервуару (а),  $Bm / m^2$ ;  $q_n$  - інтенсивність теплового потоку, яку випромінює покрівля резервуару (б),  $Bm / m^2$ .

Для знаходження інтенсивності теплового потоку необхідно визначити кутовий коефіцієнт випромінювання для а)

$$\psi = \frac{X^2 + 0,5}{\sqrt{X^2 - 1}}, \quad (6)$$

де  $X = \frac{x}{2R}$ ;  $x$  - висота нагрітої стінки резервуара, м;  $R$  - радіус резервуара, м.

і б)

$$\psi = 0,5 \left( X - \sqrt{X^2 - 4 \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2} \right), \quad (7)$$

де  $r_1 = \frac{R_1}{h}$ ;  $r_2 = \frac{R_2}{h}$ ;  $X = \frac{1+r_2^2}{r_1^2} + 1$ ;  $h$  - відстань від покрівлі до дзеркала нафтопродукту, м;  $R_1, R_2$  - радіуси покрівлі і дзеркала нафтопродукту відповідно (для даного випадку  $R_1 = R_2$ ), м.

З рівнянь (6) і (7) знайдено кутовий коефіцієнт для обох схем. Результати досліджень представлені графічно на рисунку

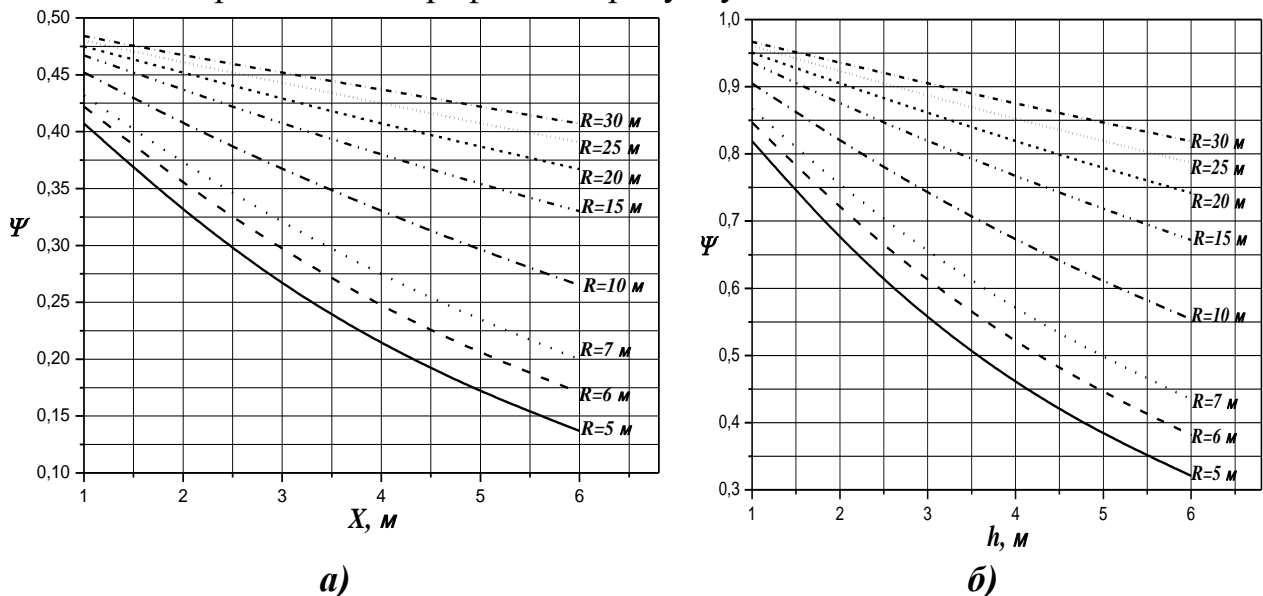


Рисунок 8 – Залежність кутового коефіцієнту випромінювання від величини  $X$  та  $h$  відповідно, для різних радіусів РВС

Проведено дослідження інтенсивності променевого випромінювання, яке сприймає поверхня нафтопродукту. При розрахунку приймалися такі вихідні данні: температура внутрішньої стінки резервуара, що нагрівається внаслідок зовнішньої пожежі  $T_2 = 823 \text{ K}$ , початкова температура нафтопродукту, що нагрівається від теплового потоку, рівна  $T_1 = 300 \text{ K}$ . Ступінь чорноти стінки

резервуара  $\varepsilon_1 = 0,76$ , а дзеркала нафтопродукту –  $\varepsilon_2 = 0,95$ . На рис. 9 зображено залежність інтенсивності теплового потоку з плином часу від геометричних розмірів резервуару.

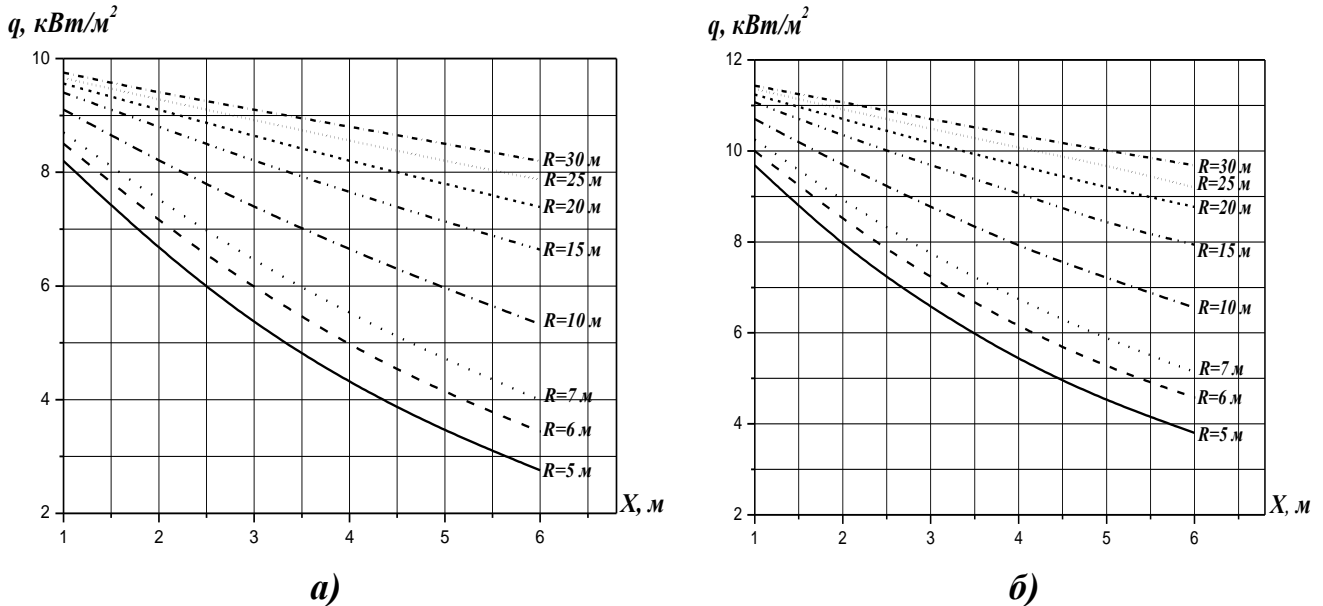


Рисунок 9 – Залежність інтенсивності теплового потоку від: **а)** висоти нагрітої бічної стінки; **б)** відстані нагрітої покрівлі резервуару до дзеркала нафтопродукту, при фіксованих радіусах резервуарів

Графік **а)** відображає динаміку теплового потоку, який випромінює покрівля резервуару, **б)** – бічна стінка. Вісь X це відстань нагрітої поверхні, яка випромінює тепло, до поверхні нафтопродукту. Аналіз графічних залежностей свідчить, що резервуари великих розмірів випромінюють більше тепла на нафтопродукт, який зберігається в середині. Це пов'язано із збільшенням площі поверхні нагрітих стінок резервуару.

У **третьому розділі** на основі законів теплообміну і рівнянь теплопровідності та запропонованих у другому розділі математичних моделей визначення інтенсивності променевих потоків досліджено процес теплообміну між двома резервуарами при виникненні пожежі. Використовуючи вираз (10), з врахуванням результатів досліджень другого розділу, визначено температурний розподіл по товщині стінки резервуарів.

$$t(R, \tau) = \frac{q}{\lambda} R_2 \left\{ \begin{aligned} & \left[ \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left[ 2Fo - \frac{1}{4} \left( 1 - 2 \frac{R^2}{R_2^2} \right) - \frac{R_1^2}{R_2^2} \left( \ln \frac{R}{R_1} + \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{3}{4} \right) \right] + \right. \\ & \left. + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi}{\mu_n} \frac{J_1 \left( \mu_n \frac{R_1}{R_2} \right) J_1(\mu_n)}{J_1^2 \left( \mu_n \frac{R_1}{R_2} \right) - J_1^2(\mu_n)} \left[ J_0 \left( \mu_n \frac{R}{R_2} \right) Y_1 \left( \mu_n \frac{R_1}{R_2} \right) - Y_0 \left( \mu_n \frac{R}{R_2} \right) \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times J_1 \left( \mu_n \frac{R_1}{R_2} \right) \right] e^{(-\mu_n^2 Fo)} \right\} \quad (8) \end{aligned} \right.$$

За виразом (8) розраховано температурне поле по товщині стінки РВС – 1000 і двостінного резервуару об'ємом 75 000 м<sup>3</sup> (рис. 10).

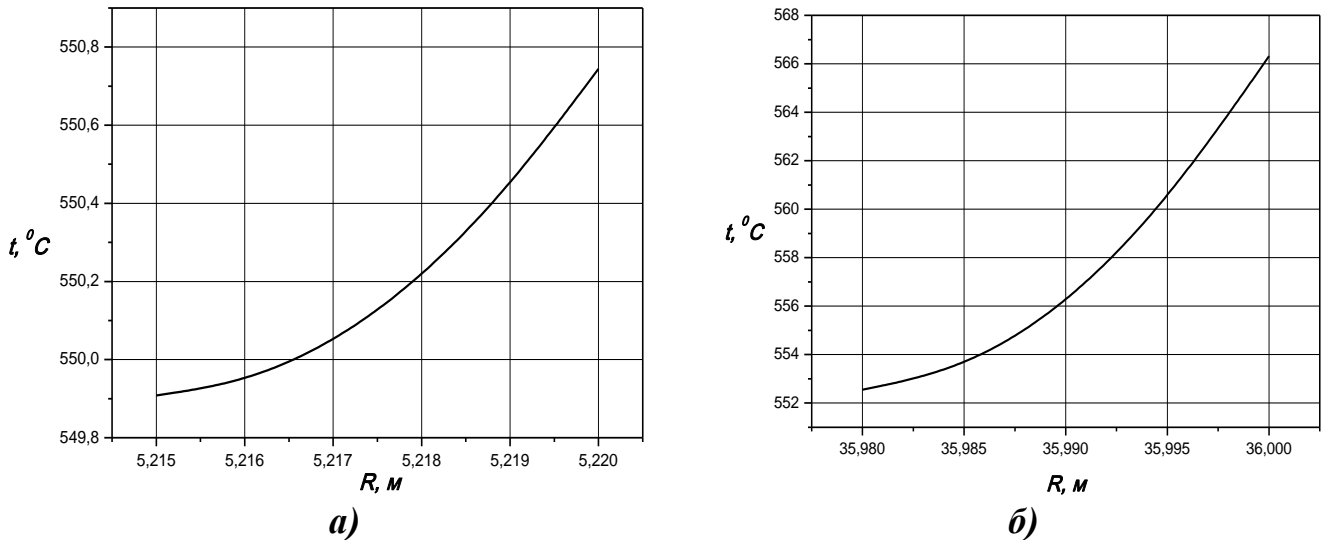


Рисунок 10 – Розподіл температури по товщині стінки: а) – РВС – 1000; б) – коаксіального резервуару радіусом 36 м.

З графічної залежності а) видно, що різниця температур на зовнішній і внутрішній поверхнях стінки РВС – 1000 є незначною. Різниця становить не більше  $0,9^{\circ}\text{C}$ , тому можна прийняти, що середня температура стінки  $550^{\circ}\text{C}$ . У двостінному резервуарі різниця температур становить  $10^{\circ}\text{C}$ , це зумовлено тим, що товщина стінки двостінного резервуару складає 2 см, що у свою чергу у 4 рази більше ніж товщина РВС – 1000. Розрахунок температурного поля резервуарів проводився при постійному і змінному тепловому потоці, різних віддалях між резервуарами та різною температурою.

Визначивши температурний розподіл, проведено дослідження прогріву стінки резервуару до критичної температури  $550^{\circ}\text{C}$  при змінних параметрах. Тобто визначено за який час верхні пояси резервуарів, які не омиваються нафтопродуктом, прогріються до критичної температури. Результати представлені графічно на рис. 11.

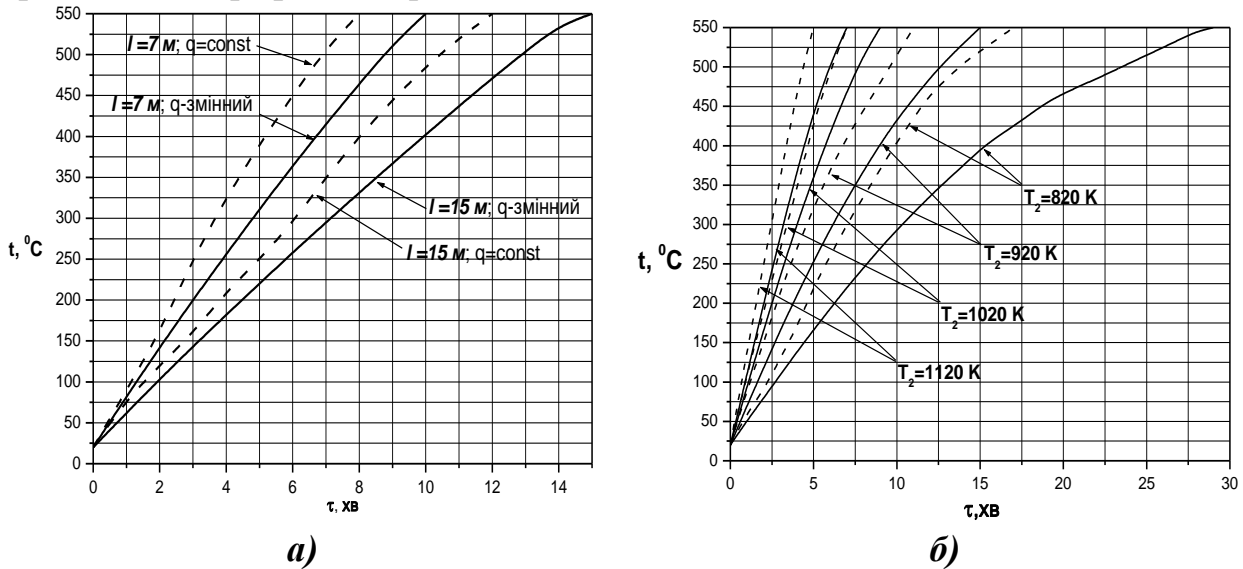


Рисунок 11 – Зміна температури поверхні стінки резервуару з плином часу

Графічна залежність а) відображає температуру поверхні РВС – 1000 при віддалі до джерела випромінювання 7 і 15 метрів, залежність б) відображає температуру поверхні внутрішнього резервуару в залежності від температури

зовнішньої стінки. При дослідженні враховано зміну теплового потоку в часі, що відображає суцільна лінія і постійний тепловий потік – штрихова лінія.

У **четвертому розділі** шляхом математичного моделювання процесу теплообміну при груповій пожежі в резервуарному парку із залученням енергетичного рівняння променевого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності методом кінцевих елементів виявлені закономірності нагрівання стінок резервуару із нафтопродуктом в залежності від ступеня його заповненості, типу палива та відстані між резервуарами. Розглянуто чотири схеми протікання пожежі в резервуарному парку (рис. 12.)

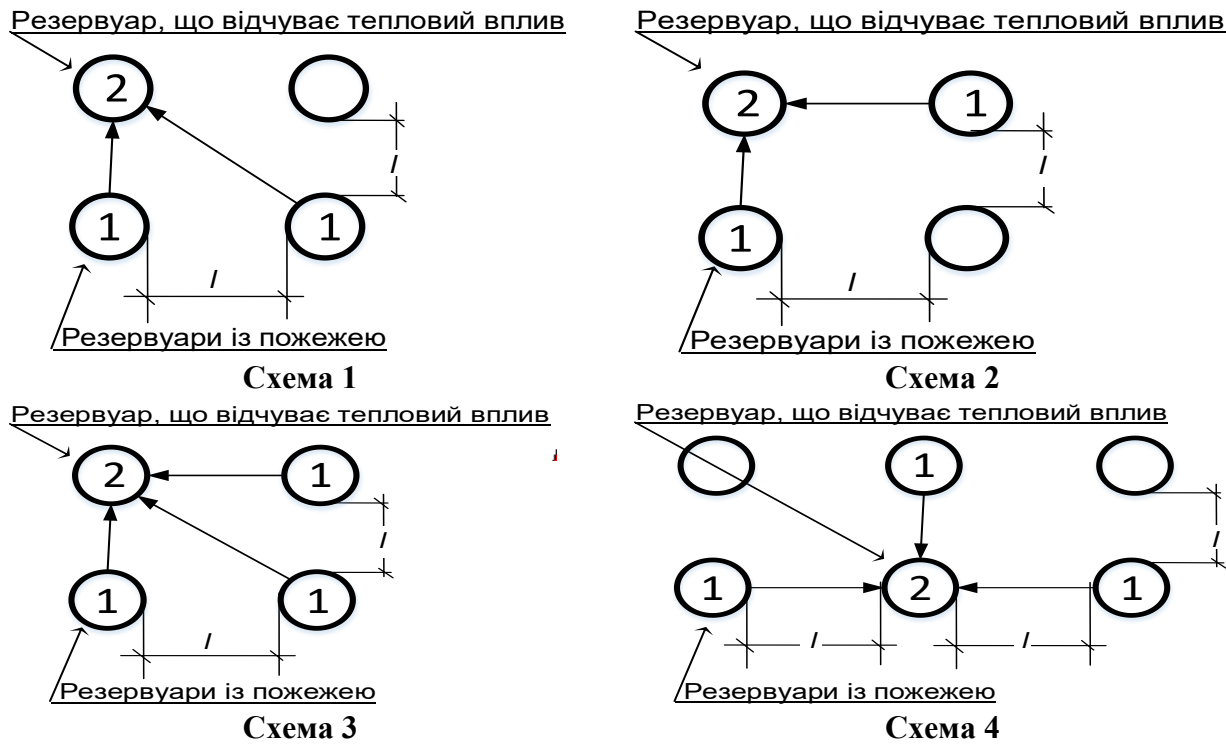


Рисунок 12 – Можливі схеми пожежі

Виявлено, що найбільш небезпечною являється третя схема пожежі. Результати дослідження третьої схеми зображені на рис. 13, 14.

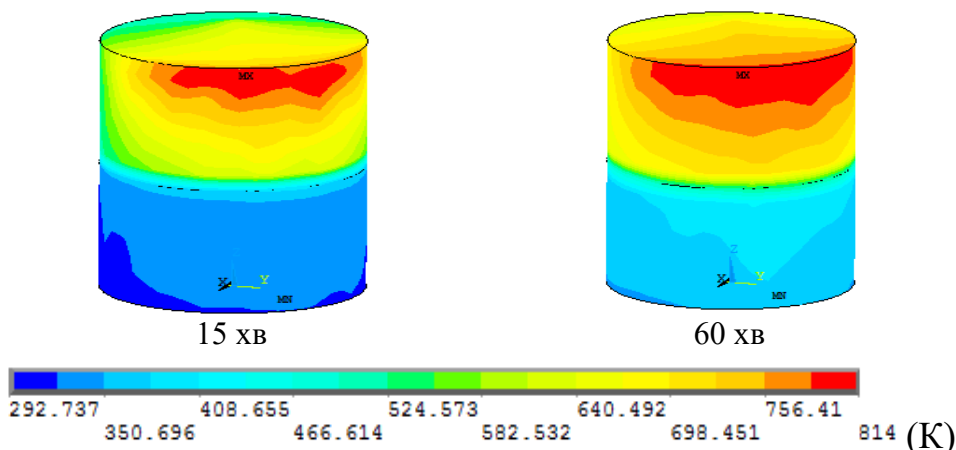


Рисунок 13 – Розподіл температури по стінці РВС – 1000 при ступені наповнення 50% і віддалі 10 м

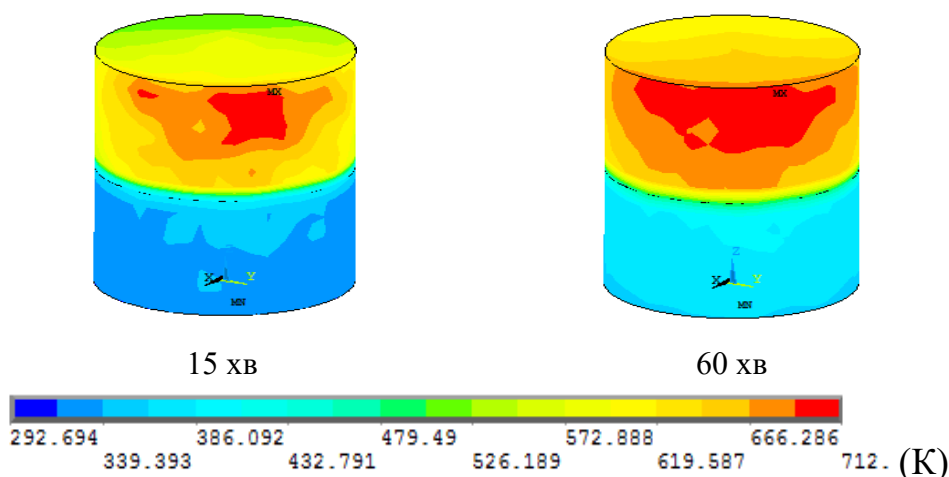


Рисунок 14 – Розподіл температури по стінці PVC – 1000 при ступені наповнення 50% і віддалі 20 м

У п'ятому розділі на основі розв'язку рівнянь термопружності тонких циліндричних оболонок і пластин отримані аналітичні залежності для визначення напружено-деформованого стану резервуару за умов пожежі. Визначено та досліджено температурні напруження і деформації в днищі та боковій стінці резервуара. Одержано аналітичні вирази напружень і переміщень в залежності від геометричних розмірів, механічних та теплофізичних параметрів матеріалу резервуару. У роботі показано, що температурне напруження та деформації залежать найбільше від коефіцієнту температурного лінійного розширення та від модуля пружності матеріалу. Наявність напружень дає можливість оцінити величину температури, за якої настає втрата цілісності резервуара. При вибухах в PVC часто відбувається відрив днища, а бокова циліндрична поверхня і покрівля миттєво відлітають на висоту понад 50м, розливаючи нафтопродукт на сусідні резервуари та територію резервуарного парку. Тоді площа горіння інтенсивно збільшується. Руйнуванню цілісності резервуара внаслідок відриву днища сприяють температурні напруження, величина яких збільшується при збільшенні температури нагріву. Величини температурних напружень додаються до силових напружень, що спричинені тиском, і при досягненні критичної величини відбувається руйнування резервуара.

При аналітичних розрахунках PVC змодельований циліндричною оболонкою, яка з'єднана на торці з днищем (круглою пластиною) методом електродугової зварки (рис.15). Радіус серединної поверхні циліндричної оболонки рівний  $R$ , товщина її стінки  $2\delta$ , товщина днища  $2\delta_0$ .

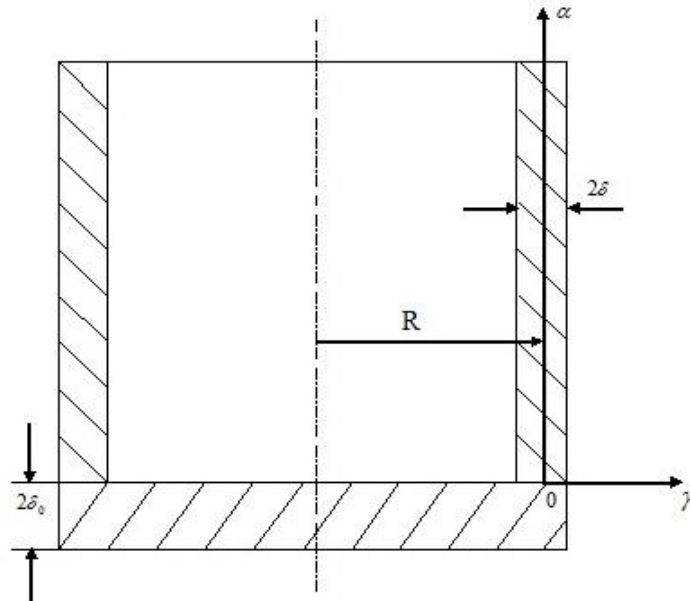


Рисунок 15 – Осьовий переріз резервуара

Циліндрична оболонка резервуара вільна відносно осьових переміщень в напрямку координати  $\alpha$ . Напружений стан оболонки, яка знаходиться під дією температури  $t(\alpha)$  і нормального навантаження  $q_n$  (зумовленого тиском парів), визначається прогином  $w$  її стінки в напрямку координати  $\gamma$

$$\frac{d^4 w}{d\alpha^4} + 4\omega^4 w = \frac{2\omega^4 R^2}{\delta \cdot E} \cdot q_n + 4\omega^4 \alpha_t R t(\alpha), \quad (9)$$

де  $\omega^4 = \frac{3(1-\nu^2)}{4\delta^2 R^2}$ ,  $t(\alpha)$  – зміна температури оболонки по висоті,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $E$ ,  $\nu$  – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матеріалу оболонки;  $q_n$  – силоне навантаження зумовлене тиском, Па.

Нормальні кільцеві зусилля  $N_2$ , моменти  $M_1$ ,  $M_2$  і переміщення  $z$  вздовж осі резервуара визначаються за формулами

$$\begin{aligned} N_2 &= 2E\delta \left( \frac{w}{R} - \alpha_t t(\alpha) \right), & M_1 &= -\frac{E\delta}{2\omega^4 R^2} \frac{d^2 w}{d\alpha^2}, \\ M_2 &= -\frac{E\delta\nu}{2\omega^4 R^2} \frac{d^2 w}{d\alpha^2}, & z &= \frac{1}{R} \int [(1+\nu)\alpha_t R t(\alpha) - \nu w] d\alpha, \end{aligned} \quad (10)$$

де  $\alpha_t$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення,  $\frac{1}{\text{K}}$ .

Осьові напруження циліндричної оболонки  $\sigma_{\alpha\alpha}$  і кільцеві  $\sigma_{\beta\beta}$  знаходимо за формулами

$$\sigma_{\alpha\alpha} = \frac{3M_1}{2\delta^3} \gamma, \quad \sigma_{\beta\beta} = \frac{1}{2\delta} \left( N_2 + 3M_2 \frac{\gamma}{\delta^2} \right), \quad (11)$$

де координата  $\gamma$  відраховується від серединної поверхні циліндричної стінки резервуара по її зовнішній нормалі (рис. 15). У випадку, коли температура  $t(\alpha) = t_1$  постійна, рівняння (9) записується у вигляді

$$\frac{d^4 w}{d\alpha^4} + 4\omega^4 w = \frac{2\omega^4 R^2}{\delta \cdot E} \cdot Q\delta(\alpha) + 4\omega^4 w^*, \quad (12)$$



де  $Q|_{\alpha=0} = Q_1$  – зусилля взаємодії між боковою циліндричною поверхнею РВС і його днищем, яке припадає на одиницю довжини;

$$w^* = \alpha_t R t_1. \quad (13)$$

Днища РВС є подвійними по товщині і мають велику жорсткість на згині. В цьому випадку кут повороту нормалі до серединної поверхні оболонки є досить малим, тому крайові умови на лінії спряження днища і бокової поверхні РВС мають вигляд

$$w|_{\alpha=0} = u|_{r=R}, \quad \frac{dw}{d\alpha}|_{\alpha=0} = 0, \quad \sigma_{rr}|_{r=R} = \frac{Q_1}{2\delta_0}, \quad (14)$$

де  $u$  – переміщення точок днища вздовж радіуса  $r$ , м;  $\sigma_{rr}$  – радіальні температурні напруження в днищі резервуара.

Згідно з розв'язком плоскої задачі теорії пружності радіальні переміщення  $u$  круглого днища, нормальні радіальні напруження  $\sigma_{rr}$  і кільцеві напруження  $\sigma_{\phi\phi}$  записуються у вигляді

$$u = A_0 r + \frac{1+\nu_0}{2} \alpha_t^{(0)} t_0 r \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{E_0}{1-\nu_0^2} \left[ \frac{du}{dr} + \nu_0 \frac{u}{r} - \alpha_t^{(0)} (1+\nu_0) t_0 \right] \\ \sigma_{\phi\phi} &= \frac{E_0}{1-\nu_0^2} \left[ \frac{u}{r} + \nu_0 \frac{du}{dr} - \alpha_t^{(0)} (1+\nu_0) t_0 \right] \end{aligned} \quad (16)$$

де  $A_0$  – постійна інтегрування, яка знаходиться з третьої умови (14);  $E_0$ ,  $\nu_0$ ,  $\alpha_t^{(0)}$  – відповідно модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу днища;  $t_0$  – температура днища, °C.

Враховуючи всі умови (14) розв'язок рівняння (4) запишемо у вигляді

$$w(\alpha) = \alpha_t R t_1 - \frac{R \Delta l}{1+k_0} e^{-\omega \alpha} (\cos \omega \alpha + \sin \omega \alpha), \quad (17)$$

$$\text{де} \quad \Delta l = \alpha_t t_1 - \alpha_t^{(0)} t_0; \quad k_0 = \frac{E \delta (1-\nu_0)}{2 E_0 \delta_0}.$$

Зусилля взаємодії  $Q_1$  записуються таким виразом

$$Q_1 = \frac{4E\delta}{\omega} \frac{\Delta l}{1+k_0}. \quad (18)$$

Тоді співвідношення (15) остаточно запишеться у вигляді

$$u(r) = \frac{4rk_0\Delta l}{1+k_0} + \alpha_t^{(0)} t_0 r. \quad (19)$$

Підставивши вираз (19) в (16), знаходимо температурні напруження в днищі

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\varphi\varphi} = \frac{4k_0 E_0 \Delta l}{(1-\nu_0)(1+k_0)}. \quad (20)$$

Аналіз виразу (20) показує, що напруження в днищі є постійними, тобто не залежать від радіуса.

Враховуючи співвідношення (17), а також (10) і (11), для температурних напружень в циліндричній стінці РВС запишемо такі вирази:

$$\sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) = -\frac{3E\Delta l \gamma \psi(\omega\alpha)}{(1+k_0)\delta_0 \sqrt{3(1-\nu^2)}}, \quad (21)$$

$$\sigma_{\beta\beta}(\alpha, \gamma) = -\frac{E\Delta l}{1+k_0} \left[ \varphi(\omega\alpha) + \frac{3\nu\gamma}{\delta \sqrt{3(1-\nu^2)}} \psi(\omega\alpha) \right],$$

де  $\varphi(\omega\alpha) = e^{-\omega\alpha} (\cos \omega\alpha - \sin \omega\alpha)$ ,  $\psi(\omega\alpha) = e^{-\omega\alpha} (\cos \omega\alpha + \sin \omega\alpha)$ .

Для напружень  $\sigma_{\beta\beta}$  на зовнішній і внутрішній поверхнях стінки резервуара  $\gamma = \pm \delta$  маємо

$$\sigma_{\beta\beta}^+(\alpha) = -\frac{E\Delta l}{1+k_0} \left[ \varphi(\omega\alpha) + \frac{3\nu}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \psi(\omega\alpha) \right], \quad (22)$$

$$\sigma_{\beta\beta}^-(\alpha) = -\frac{E\Delta l}{1+k_0} \left[ \varphi(\omega\alpha) - \frac{3\nu}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \psi(\omega\alpha) \right]. \quad (23)$$

Одержані вище формули використані для дослідження температурних напружень в боковій стінці РВС.

Розрахунки проводились за формулами (20–23) для РВС–1000 при таких параметрах:

$$R = 5.2 \text{ м}; \delta = 0.02 \text{ м}; \delta_0 = 0.04 \text{ м}; \nu = 0.33; \nu_0 = 0.28; E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ Па}; E_0 = 2 \cdot 10^{11}$$

$$\text{Па}; \alpha_t = 14 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{К}}; \alpha_t^{(0)} = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{К}}; t_1 = 200^\circ \text{C}; t_0 = 70^\circ \text{C}.$$

Напруження в днищі резервуара розраховані за виразом (20) рівні  $\sigma_{rr} = \sigma_{\varphi\varphi} = 147 \text{ МПа}$ .

Результати розрахунків за виразами (21–23) зображені графічно на *рис. 16–19*

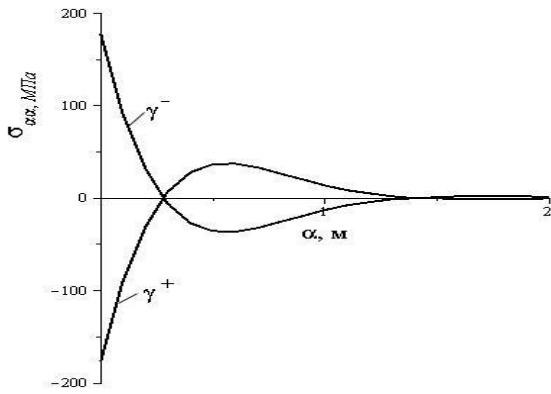


Рисунок 16 – Зміна осьових напружень вздовж координати  $\alpha$

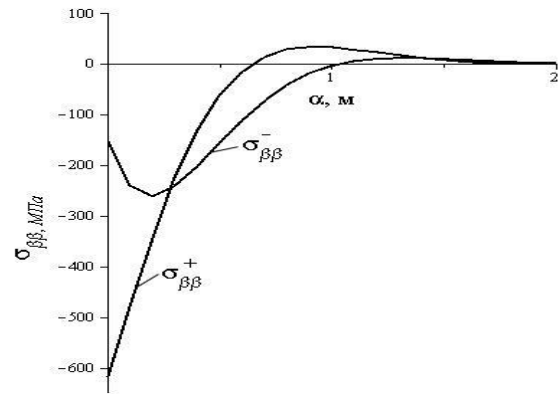
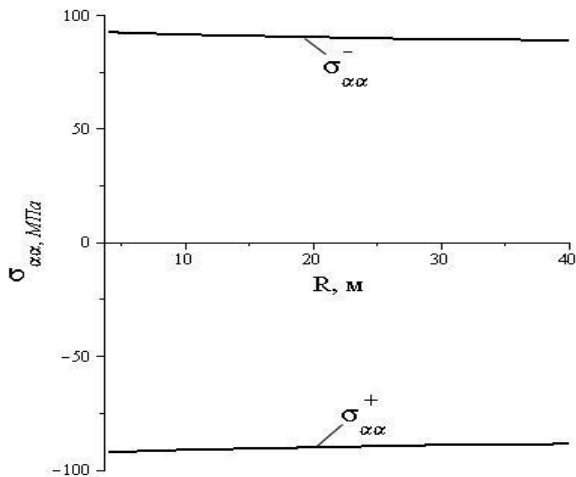


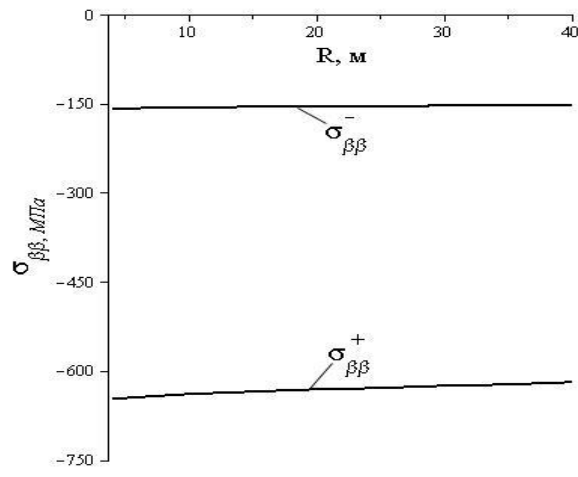
Рисунок 17 – Зміна кільцевих напружень вздовж координати  $\alpha$

Аналіз графічних залежностей показує, що осьові напруження  $\sigma_{\alpha\alpha}$ , приймають максимальні значення на поверхні  $\alpha=0$  (рис. 16). На зовнішній поверхні  $\gamma=+\delta$  вони є стискуючими, а на поверхні  $\gamma=-\delta$  – розтягуючими. По абсолютній величині вони рівні між собою. Їх величина для заданих температурних і механічних характеристик та геометричних розмірів РВС, рівна 176.86 МПа.

Кільцеві напруження  $\sigma_{\beta\beta}$  на поверхні  $\alpha=0$  і точках  $\gamma=\pm\delta$  є стискуючими і по величині рівні 619.04 МПа, та 152.11 МПа відповідно (рис. 17). На зовнішній поверхні резервуара ( $\gamma=+\delta$ )  $\sigma_{\beta\beta}^+$  приймають максимальне значення.



а)



б)

Рисунок 18 – Зміна осьових а) і кільцевих б) напружень в залежності від величини радіуса резервуара при  $\delta=10$  мм

На рис. 18 показана залежність величини осьових і кільцевих напружень від величини радіуса резервуара. Аналіз залежностей показує, що при збільшенні радіуса резервуара від 4 м до 40 м і більше величина напружень зменшується не більше ніж на 5%.

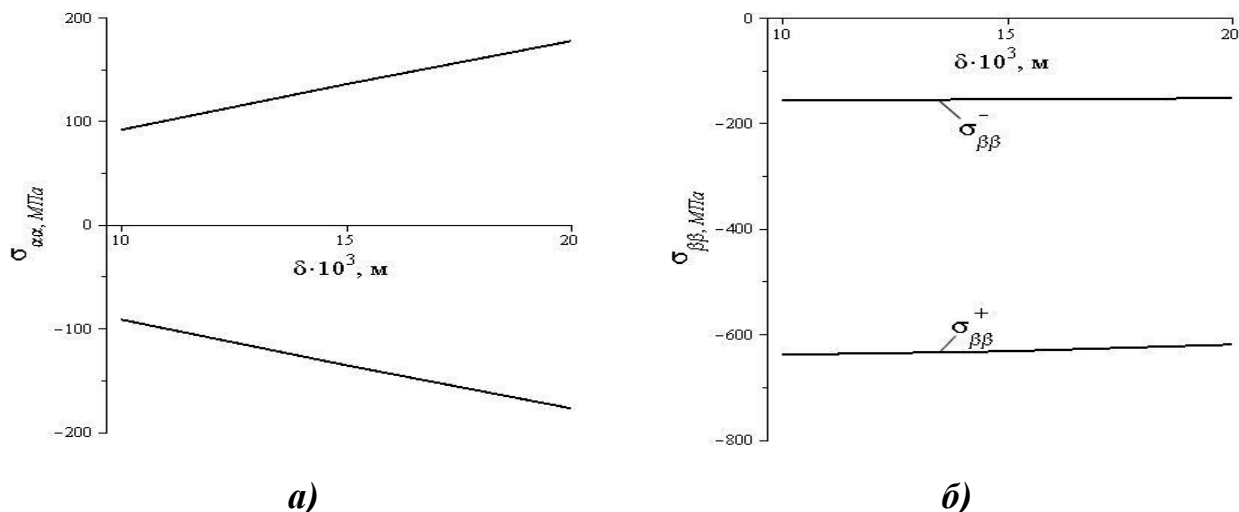


Рисунок 19 – Зміна осьових а) і кільцевих б) напружень в залежності від товщини  $\delta$

Аналіз рис. 19 показує, що при збільшенні товщини стінки резервуара від 10 мм до 20 мм величина осьових напружень збільшується на 93% (рис. 19 а), а кільцеві напруження по величині зменшуються на 3% (рис. 19 б).

Виходячи з основних співвідношень теорії пружності тонких пластин і оболонок одержані аналітичні вирази напружено-деформованого стану циліндричних резервуарів за умов зміни температури їхніх конструктивних елементів, які дають можливість дослідити міцність вузла з'єднання циліндричної поверхні резервуара з днищем з врахуванням температурних і механічних характеристик та геометричних розмірів резервуара.

Показано, що найбільшу величину температурні напруження досягають на поверхні з'єднання циліндричної поверхні з днищем. Найбільшого максимального значення кільцеві температурні напруження досягають на зовнішній поверхні резервуара ( $\gamma = +\delta$ ). Їхня величина більш ніж в три рази перевершує максимальні осьові температурні напруження.

При зміні радіуса резервуара від 4 м до 40 м і більше величина напружень зменшується не більше ніж 5%. При збільшенні товщини стінки резервуара від 10 мм до 20 мм величина кільцевих напружень  $\sigma_{\beta\beta}$  зменшується на 3%, а осьових  $\sigma_{\alpha\alpha}$  – збільшується на 93%.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, наведено розв'язання актуальної наукової задачі виявлення особливостей впливу теплових факторів пожежі на цілісність вертикальних сталевих резервуарів, як підґрунтя підвищення ефективності забезпечення пожежної безпеки резервуарних парків зберігання нафти і нафтопродуктів. За результатами дисертаційної роботи сформульовано нижче наведені висновки.

1. Розроблено методику визначення напружено-деформованого стану циліндричної стінки та вузла її з'єднання з днищем залежно від величини

температури нагріву. Встановлено, що величина температурних напружень залежить від коефіцієнта лінійного температурного розширення матеріалів, модуля пружності та коефіцієнта Пуассона, а також товщині стінки резервуару та його діаметра. Встановлено, що найбільша величина температурних напружень досягається у вузлі з'єднання циліндричної поверхні і днища. При зміні товщини стінки від 10мм...20 мм максимальні осьові напруження збільшуються на 97 %, а кільцеві – на 3%. Із збільшенням радіусу резервуару від 5м до 40 м максимальні напруження зменшуються на 6 %.

2. Розроблено методику визначення температурного поля в стінці резервуара, що нагрівається від теплового потоку полум'я пожежі, з урахуванням зміни в часі теплового потоку та зміни теплофізичних характеристик залежно від значення температури. Це дало можливість встановити, що проміжок часу нагріву резервуару до критичної температури 550 °С є на 40...86 % більшим ніж при розрахунку із постійним потоком та теплофізичними характеристиками.

3. Шляхом математичного моделювання процесу теплообміну при груповій пожежі в резервуарному парку із залученням енергетичного рівняння променевого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності, методом кінцевих елементів, виявлено закономірності нагрівання стінок резервуару із нафтопродуктом залежно від ступеня його заповненості, типу палива та відстані між резервуарами. Виявлено найбільш небезпечне місце розташування резервуару відносно резервуарів, що горять.

4. Побудовані регресійні залежності максимальних температур внутрішніх поверхонь резервуарів, які контактують з нафтопродуктом. Отримані регресійні залежності можна використовувати при проектуванні резервуарних парків з урахуванням діаметрів резервуарів та відстані між ними.

5. Розроблено методику розрахунку процесу нагріву резервуару з подвійною стінкою та плаваючою покрівлею.

6. Розроблена методику визначення теплових потоків залежно від температури полум'я, геометричних розмірів резервуарів та відстані між ними.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*У наукових фахових виданнях:*

1. Чернецький В. В. Математичне моделювання та дослідження теплових процесів у вертикальних сталевих резервуарах за умов пожежі / В. В. Чернецький, М. М. Семерак, М. Р. Михайлишин // Пожежна безпека : зб. наук. праць. – 2015. – №27.– С. 151 – 157.
2. Семерак М. М. Математичне моделювання та дослідження теплових процесів у вертикальних коаксіальних резервуарах за умов пожежі / М. М. Семерак, В. В. Чернецький, М. Р. Михайлишин // Пожежна безпека : зб. наук. праць. – 2015. – №26.– С. 133 – 137.
3. Вогнестійкість циліндричної колони в умовах пожежі / А. М. Домінік, В. М. Байтала, М. М. Семерак, В. В. Чернецький // Пожежна безпека : зб. наук. праць. – 2013. – № 23. – С. 76-80

4. Субота А. В. Математическое моделирование воздействия теплового излучения пожара на несущие конструкции машинных залов электростанций / Субота А. В., Чернецький В. В., Семерак М. М. // *Черезвычайныя сітуацыі: прадупрэджэне і ліквідацыя*. – Мінск : НІІ ПБ і ЧС Рэспублікі Беларусь. 2013. – №2(34). – С. 101 – 107.
5. Чернецький В. В. Організація управління силами та засобами цивільного захисту при гасінні лісових пожеж в гірській місцевості Карпатського регіону / В. В. Чернецький, Т. Й. Кочкодан // *Пожежна безпека : зб. наук. праць*. – 2012. – №21. – С. 177 – 182.
6. Температурне поле масивних будівельних конструкцій зумовлене тепловим потоком полум'я пожежі / М. М. Семерак, І. С. Юнашов, В. М. Байтала, В. В. Чернецький // *Вісник ЛДУБЖД*. – 2013. – №7. – С. 230 – 234.
7. Вогнестійкість бетонних конструкцій циліндричної форми / М. М. Семерак, А. М. Домінік, В. М. Байтала, В. В. Чернецький // *Пожежна безпека : зб. наук. праць*. – 2012. – №21. – С. 160 – 165.
8. Напружено-деформований стан стінки та днища вертикальних сталевих резервуарів при їх нагріві / Семерак М. М., Глова Т. Я., Чернецький В. В., Байтала В. М. // *Вісник ЛДУБЖД*. – 2015. – №12. – С. 228 – 235.

*Особистий внесок здобувача у роботах, які опубліковані у співавторстві:*

[1] – Здобувач здійснив аналіз підходів щодо математичного моделювання теплових потоків і температурних полів, які виникають у вертикальних сталевих резервуарах з подвійною стінкою за умов пожежі. Обґрунтував вихідні диференціальні рівняння та граничні умови. Провів розрахунків і зробив аналіз одержаних результатів. [2] – Здобувачем визначені основні принципи побудови математичної моделі дослідження вогнестійкості циліндричних конструкцій за умов пожежі. Записав розв'язок задачі, провів розрахунки і зробив аналіз одержаних результатів. [3] – дослідив вплив величини теплових потоків на вогнестійкість несучих конструкцій будівель. Провів аналіз графічних залежностей величини температурного поля плоскої конструкції від її розмірів та розміщення відносно полум'я пожежі. [4] – обґрунтував організацію управління силами і засобами цивільного захисту при гасінні лісових пожеж в гірській місцевості Карпатського регіону де прокладені нафтопроводи. [5] – розробив математичну модель і уточнив граничні умови. Дослідив динаміку прогріву конструкцій по глибині. [6] – записав математичну модель визначення температурних полів за умов пожежі в резервуарах, дослідив адекватність моделі реальним умовам. Розробив методику дослідження зміни теплового потоку з часом. [7] – дослідив динаміку прогріву циліндричних конструкцій по радіусу та розробив рекомендації по її вогнезахисту. [8] – на основі розв'язку рівнянь термопружності тонких циліндричних оболонок і пластин одержав аналітичні рівняння для знаходження напружено-деформованого стану РВС за умов пожежі. Провів розрахунки і показав, що температурні напруження в зоні з'єднання стінки і днища резервуара можуть бути причиною його руйнування.

*Опубліковано в інших виданнях:*

1. Семерак М. М. Математичне моделювання та дослідження теплових процесів у резервуарних парках / М. М. Семерак, В. В. Чернецький, М.Р. Михайлишин // Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи : матер. II Міжнар. наук.-практ. конференції. – Львів : ЛДУБЖД, 2015. – 357-358.

2. Субота А. В. Дослідження теплового випромінювання пожежі в машинних залах електростанцій / А. В. Субота, В. В. Чернецький // Забезпечення пожежної та техногенної безпеки: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції. (12-13 грудня 2013 року).– Х. : НУЦЗУ, 2013. – С. 45 –47.

3. Мигаленко К. І. Організація управління силами та засобами цивільного захисту при гасінні лісових пожеж в гірській місцевості Карпатського регіону / К. І. Мигаленко, Я. Й. Лопушанський, В. В. Чернецький // Пожежна безпека. Теорія і практика : II Міжнар. наук.-практ. конференція (12 жовтня). – Черкаси, 2012. – С. 138 –140

4. Температурне поле масивних конструкцій зумовлене інтенсивним нагріванням / М. М. Семерак, І. С. Юнашов, В. М. Байтала, В. В. Чернецький // Пожежна безпека : зб. наук. праць. – 2012. – №21. – С. 154 – 159.

## АНОТАЦІЯ

**Чернецький В. В. Вплив теплових факторів пожежі на цілісність вертикальних сталевих резервуарів з нафтопродуктами.** – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека. – Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, 2016.

Роботу присвячено проблемі забезпечення цілісності вертикальних сталевих резервуарів (РВС) на складах нафти і нафтопродуктів (СНН) за умов пожежі. У роботі проаналізовано сучасний стан проблеми забезпечення цілісності резервуарів у резервуарних парках. Відзначено, що за весь час експлуатації резервуарних парків не проводились дослідження впливу температурних напружень і деформацій, що виникають за умов пожежі, на цілісність резервуарів.

Теплові потоки за умов горіння нафтопродуктів нагрівають стінки і покрівлю резервуарів до високих температур. Конструкція резервуару деформується і в ній виникають температурні напруження, які додаються до напружень від тиску і зумовлюють руйнування резервуару. На основі розв'язку рівнянь термопружності тонких циліндричних оболонок і пластин уперше отримано аналітичні залежності для визначення напружено-деформованого стану резервуару за умов пожежі. Це дало можливість виявити вплив теплових потоків, теплофізичних і механічних характеристик сталі та геометричних розмірів резервуару на його цілісність. Встановлено, що найбільшу величину температурні напруження досягають у вузлі з'єднання циліндричної поверхні і днища. При різниці температур стінки і днища  $70^{\circ}\text{C}$ , температурні напруження

є критичними. При зміні товщини стінки від 10 мм до 20 мм максимальні осьові напруження збільшуються на 97%, а кільцеві на 3%. Із збільшенням радіуса резервуара від 5 м до 40 м напруження зменшуються на 6%.

Розроблена методика визначення та дослідження інтенсивності теплового потоку від полум'я пожежі в залежності від температури полум'я, радіуса резервуарів та віддалі між ними. Досліджено динаміку процесу нагріву стінки резервуару від теплового потоку полум'я пожежі з урахуванням зміни інтенсивності теплового потоку в часі. Показано, що при врахуванні змінного теплового потоку розрахунковий проміжок часу нагріву конструкції до критичної температури збільшується на 40 – 80 %.

**Ключові слова:** пожежна безпека, теплові фактори пожеж, цілісність резервуарів з нафтопродуктами, теплові потоки, напружений стан, температурне поле, температурні напруження, резервуарні парки.

## АННОТАЦИЯ

Чернецкий В. В. **Влияние тепловых факторов пожара на целостность вертикальных стальных резервуаров с нефтепродуктами.** – Рукопись. Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 21.06.02 - пожарная безопасность. – Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности, Львов, 2016.

Работа посвящена проблеме обеспечения целостности вертикальных стальных резервуаров (РВС) на складах нефти и нефтепродуктов (СНН) в условиях пожара. В работе проанализировано современное состояние проблемы обеспечения целостности резервуаров в резервуарных парках. Отмечено, что за все время эксплуатации резервуарных парков не проводились исследования влияния температурных напряжений и деформаций, возникающих в условиях пожара, на целостность резервуаров.

Тепловые потоки в условиях горения нефтепродуктов нагревают стенки и кровлю резервуаров до высоких температур. Конструкция резервуара деформируется и в ней возникают температурные напряжения, слагаются с напряжениями от давления и вызывают разрушения резервуара. На основе решения уравнений термоупругости тонких цилиндрических оболочек и пластин впервые получены аналитические зависимости для определения напряженно-деформированного состояния резервуара в условиях пожара. Это дало возможность исследовать влияние тепловых потоков, теплофизических и механических характеристик стали и геометрических размеров резервуара на его целостность. Установлено, что наибольшая величина температурных напряжений достигается в узле соединения цилиндрической поверхности и днища. При разнице температур стенки и днища, равной  $70^{\circ}\text{C}$ , температурные напряжения являются критическими. При изменении толщины стенки от 10 мм до 20 мм максимальные осевые напряжения увеличиваются на 97%, а кольцевые на 3%. С увеличением радиуса резервуара от 5 м до 40 м напряжения уменьшаются на 6%.



Разработана методика и определены интенсивности теплового потока от пламени пожара в зависимости от температуры пламени, радиуса резервуаров и расстояния между ними. Исследована динамика процесса нагрева стенки резервуара от теплового потока пламени пожара, с учетом изменения интенсивности теплового потока во времени. Показано, что при учете переменного теплового потока, расчетное время нагрева конструкции до критической температуры увеличивается на 40 - 80%.

**Ключевые слова:** пожарная безопасность, тепловые факторы пожара, целостность резервуаров с нефтепродуктами, тепловые потоки, напряженное состояние, температурное поле, температурные напряжения, резервуарные парки.

### ANNOTATION

Chernetsky V.V. **The influence of fire thermal factors on integrity of vertical still oil's tanks.** – Manuscript.

The candidate's thesis of engineering science. Speciality 21.06.02 – Fire safety. – Lviv State University of Life Safety, Lviv, 2016.

This thesis is devoted to problem of safety integrity of vertical still oil's tanks, located on petroleum products storage, under fire condition. The current state of the problem of tanks integrity safety in tank fields was analyzed. It was shown that investigations of influence of thermal stress as well as deformation on tanks integrity, which appear on fire conditions, were not carried out until now.

The thermal flows under burning conditions heat the walls and coated of tanks to high temperatures. The construction of tank deformed, therein appear the thermal stress, which add to pressure stress. These factors lead to tanks damage. The analytical dependences for determination of stress-deformation state of tank in burning conditions, was obtained for the first time, using the solution of thermoelasticity equations of thin cylindrical shells. The influence of thermal flows, the thermal-physical and mechanical characteristics of steel as well as geometrical sizes of tanks on its integrity were established.

It was shown that maximal thermal stress achieved in place of junction of cylindrical surface and bottom. At the difference of temperature of cylindrical surface and bottom on the level more 70 °C, the thermal stresses are critical.

The maximal axial stresses increase on 97%, while the ring stresses - on 3% in case of change of wall thickness from 10 mm up to 20 mm. The maximal stresses decrease on 6% with increase tank radius from 5 m to 40 m.

The methodology of determination of thermal flow intensity on temperature of flame, tank radius and distance between tanks was proposed. The time-dependences dynamics of the processes of heating of tank walls from thermal flow was studied. It was shown that in the case of variable thermal flow time of heating to critical temperature increase on 40 – 80 %.

**Keywords:** tank integrity, thermal flows, thermal field, thermal stress, tank fields.

