

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ  
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

*На правах рукопису*

ЧЕРНЕЦЬКИЙ ВОЛОДИМИР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 614.841.12:539.377

ВПЛИВ ТЕПЛОВИХ ФАКТОРІВ ПОЖЕЖІ НА ЦІЛІСНІСТЬ  
ВЕРТИКАЛЬНИХ СТАЛЕВИХ РЕЗЕРВУАРІВ З НАФТОПРОДУКТАМИ

Спеціальність 21.06.02 – пожежна безпека

Дисертація  
на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник:

Семерак Михайло Михайлович

доктор технічних наук, професор, лауреат

Державної премії України у галузі

науки і техніки, заслужений діяч науки

і техніки України

ЛЬВІВ – 2015

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	
ВСТУП	5
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ РЕЗЕРВУАРНИХ ПАРКІВ</b>	12
1.1. Причини виникнення та розвиток пожежі у резервуарах з нафтопродуктами на основі статистичних даних	12
1.2. Конструктивні особливості сталевих вертикальних резервуарів	14
1.2.1. Резервуарні парки	20
1.3. Характеристика нафти і нафтопродуктів	23
1.3.1. Фізико-хімічні властивості	23
1.3.2. Теплофізичні властивості	25
1.3.3. Термодинамічний стан та вибухонебезпека нафтопродуктів, що зберігаються в резервуарах за умов пожежі	29
1.4. Пожежі в резервуарних парках	34
1.5. Висновки за розділом	37
<b>РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗА УМОВ ГОРІННЯ НАФТОПРОДУКТІВ У РЕЗЕРВУАРАХ</b>	39
2.1. Теплові потоки між двома резервуарами, один з яких горить	39
2.2. Теплові потоки в резервуарі з подвійними стінками	43
2.3. Теплові потоки між резервуаром і будівлею	46
2.4. Теплові потоки в закритому просторі резервуару	50
2.5. Висновки за розділом	53
<b>РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В РЕЗЕРВУАРІ ЗА УМОВ ГОРІННЯ СУСІДНЬОГО РЕЗЕРВУАРА</b>	55
3.1. Температурне поле в стінці резервуару при дії теплового потoku	55

3.2.	Температурне поле в резервуарі з подвійною стінкою	59
3.3.	Температурне поле в стінці будівлі, зумовлене тепловим потоком пожежі в резервуарі	62
3.4.	Нагрів нафтопродуктів в закритому резервуарі	65
3.5.	Висновки за розділом	70
<b>РОЗДІЛ 4. ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ В СТІНЦІ РЕЗЕРВУАРА ПРИ ГРУПОВІЙ ПОЖЕЖІ</b>		73
4.1.	Особливості моделі теплового впливу на резервуари для зберігання нафтопродуктів	73
4.2.	Можливі схеми пожеж в резервуарних парках	76
4.3.	Математичні моделі та метод чисельного розв'язку задачі	79
4.4.	Результати математичного моделювання температури на стінках резервуару при пожежі у сусідніх резервуарах	87
4.5.	Висновки за розділом	101
<b>РОЗДІЛ 5. ТЕМПЕРАТУРНІ НАПРУЖЕННЯ В КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ РЕЗЕРВУАРА ЗА УМОВ ПОЖЕЖІ</b>		102
5.1.	Вихідні рівняння теорії термопружності	103
5.2.	Температурні напруження і переміщення в днищі РВС	104
5.3.	Температурні напруження в з'єднанні стінки з днищем	105
5.4.	Висновки за розділом	108
<b>ВИСНОВКИ</b>		109
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>		111
<b>ДОДАТКИ</b>		121

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЗС	автозаправна станція
ВНК	вибухонебезпечна концентрація
ГДК	гранично допустима концентрація
ГР	горючі речовини
ГУ	граничні умови
ЗНП	зливно-наливні пристрої
ЛЗР	легкозаймисті речовини
НПЗ	нафтопереробний завод
ПП	Резервуар з плаваючою покрівлею
РВС	резервуар вертикальний сталевий із стаціонарним покриттям без понтона
РВС (або СП)	резервуар вертикальний сталевий із стаціонарним покриттям та понтоном
РВСПП	резервуар вертикальний сталевий з плаваючим покриттям
СК	сталева конструкція
СНН	склади нафти і нафтопродуктів
ТКЛР	температурний коефіцієнт лінійного розширення
ТФХ	теплофізичні характеристики
УЛФ	уловлювач легких фракцій

## ВСТУП

Після видобування нафти, її переробки і отримання різноманітних рідких нафтопродуктів (бензину, дизельного пального, мастил та різних розчинників) істотно виникає потреба в їх тимчасовому зберіганні з подальшою реалізацією споживачам. З цією метою створюють спеціальні комплексні споруди, які забезпечують не тільки тимчасове збереження нафти та нафтопродуктів, але і їх прийом від виробників та реалізацію споживачам. Для зберігання нафти та нафтопродуктів використовують переважно вертикальні сталеві резервуари (РВС). Велика кількість легкозаймистих речовин (ЛЗР), що зберігається в резервуарах, створює високу пожежну небезпеку в резервуарних парках. Пожежі, що виникають, наносять значні матеріальні збитки і часто призводять до загибелі людей [1].

На сьогоднішній день склади нафти і нафтопродуктів є одним із найважливіших елементів системи нафтопродуктозабезпечення України. На початку 1992 року в Україні тільки на нафтобазах бувшого Держкомнафтопродукту УРСР експлуатувалось понад 11500 металевих резервуарів загальною місткістю понад 5 млн. м<sup>3</sup>. На нафтоперпекачувальних станціях у системі нафтопроводів ВАТ "Укртранснафта" знаходяться резервуари сумарною місткістю понад 1 млн.м<sup>3</sup>, у системі ДП "Прикарпатзахідтранс" – близько 350 тис.м<sup>3</sup>. Значна кількість резервуарів використовується на нафтопереробних заводах та відомчих складах нафти та нафтопродуктів. Щорічно зростає кількість автозаправочних станцій (АЗС). В 2010 році їх число досягло понад 6400 [2, 3].

**Актуальність теми.** Резервуари для нафти і нафтопродуктів відносяться до промислових споруд підвищеної пожежної небезпеки. Пожежі нафти і нафтопродуктів у резервуарах, як правило, є складними і масштабними, ліквідовуються з великими труднощами, наносять велику шкоду і часто приводять до загибелі людей.

Статистика пожеж в резервуарних парках всіх країн, що продукують нафтопродукти, наглядно показує тенденцію до підвищення пожежної небезпеки

при збільшені масштабів резервуарних парків і вказує на необхідність подальшого вдосконалення заходів пожежної безпеки при їх проектуванні та експлуатації.

При пожежі стінка, покрівля, днище резервуара і сам нафтопродукт нагрівається до високих нестаціонарних температур в результаті чого в елементах конструкції виникають значні температурні напруження і деформації. При цьому різко збільшується внутрішній тиск в закритих резервуарах. Всі ці теплові фактори зменшують механічну міцність резервуара і часто приводять до його руйнування [4-6].

Як свідчить статистика: в США в резервуарних парках щорічно виникає 20 пожеж, у Японії щорічно виникає по одній пожежі.

Кожна четверта пожежа перетворювалась в групову і завершувалась повним вигоранням нафтопродукту.

Згідно з літературними даними, у період з 1970 р. до 1994 р. на території колишнього СРСР зареєстровано 243 пожежі в резервуарах для зберігання нафти і нафтопродуктів, 78 з яких виникли в резервуарах з сировою нафтою. Статистика свідчить про такий розподіл пожеж: на об'єктах «Головтранснафти» – 9,7 %, на нафтопромислах – 14,2 %, на нафтопереробних заводах – 28,4 %, на розподільних нафтобазах – 47,7 %. В наземних резервуарах сталося 93,4 % пожеж, причому 32,1 % з них мали місце в резервуарах з сировою нафтою, 53,9 % – в резервуарах з бензином, 14,0 % – в резервуарах з іншими нафтопродуктами (мазут, гас тощо). Пожежі відбувалися в основному у вертикальних сталевих резервуарах (227 випадків), з них 198 випадків (87,2 %) припадають на резервуари з бензином та сировою нафтою. Зведеної інформації про пожежі в резервуарах, що сталися на колишній «шостій частині землі» пізніше, в доступній літературі не знайдено. Це зрозуміло: з відомих причин власники нафтовидобувних, нафтопереробних та інших підприємств не поспішають оприлюднювати інформацію про пожежі, що сталися на них [7-9].

За результатами аналізу відомих літературних джерел можна зробити висновок, що в період з 1985 р. до 1995 р. пожежі в резервуарах значно

почастішали порівняно з періодом 1974-1984 р. р. Однією з причин цього був незадовільний технічний стан резервуарів. Згідно з літературними даними, 7 % аварійних ситуацій, що виникають під час експлуатації резервуарів, є наслідком конструктивних недоробок, а 50 % – наслідком дефектів під час монтажу і виготовлення конструкцій резервуарів. Чинні норми, які встановлюють вимоги до конструкцій резервуарів, багато спеціалістів вважають застарілими.

Пожежі, під час яких полум'я поширюється на групу, що складається з двох або більшої кількості резервуарів, називають груповими. Статистика свідчить, що груповою стає майже кожна четверта пожежа, яка розпочинається в резервуарі для зберігання нафти (нафтопродукту). Причинами цього бувають теплові потоки, 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).

Тому забезпечення вогнестійкості сталевих конструкцій резервуарів за умов горіння нафтопродуктів є актуальною науково-технічною задачею.

**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. Розробив математичну модель та дослідив термонапружений стан РВС за умов пожежі.

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 «Проблемы техносферной безопасности 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. Європейський 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.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ РЕЗЕРВУАРНИХ ПАРКІВ НАФТОПРОДУКТІВ

#### **1.1. Причини виникнення та розвиток пожежі у резервуарах з нафтопродуктами на основі статистичних даних**

В резервуарах в більшості випадків горіння рідин починається з вибуху парів горючої рідини під дахом резервуара, в зв'язку з цим відбуваються деформація резервуару і спалахування горючої рідини в ньому. Полум'я сягає при цьому висоти майже двох діаметрів резервуара і має температуру залежно від горючої рідини в межах 1000-1300 °С [10-11].

Полум'я може значно відхилитися під час дії вітру і вже на початковій стадії пожежі виникає можливість перекидання полум'я на сусідні резервуари або об'єкти. Такий факел полум'я резервуара, що горить, нагріває стінки, дах, дихальну та іншу апаратуру, розташовану на даху сусіднього резервуара.

Пожежі в резервуарах для зберігання нафти і нафтопродуктів можуть виникати з різних причин і розвиватися за різними сценаріями. Розвиток подібних пожеж можна розділити на такі рівні [12-14]:

- «А» – виникнення і розвиток пожежі у межах одного резервуара без впливу на суміжні;
- «Б» – поширення пожежі з одного резервуара на резервуарну групу;
- «В» – розвиток пожежі з можливим руйнуванням суміжних резервуарів, будівель та споруд на території підприємства та за його межами, а також ураженням небезпечними чинниками пожежі персоналу підприємства та населення поблизьких районів.

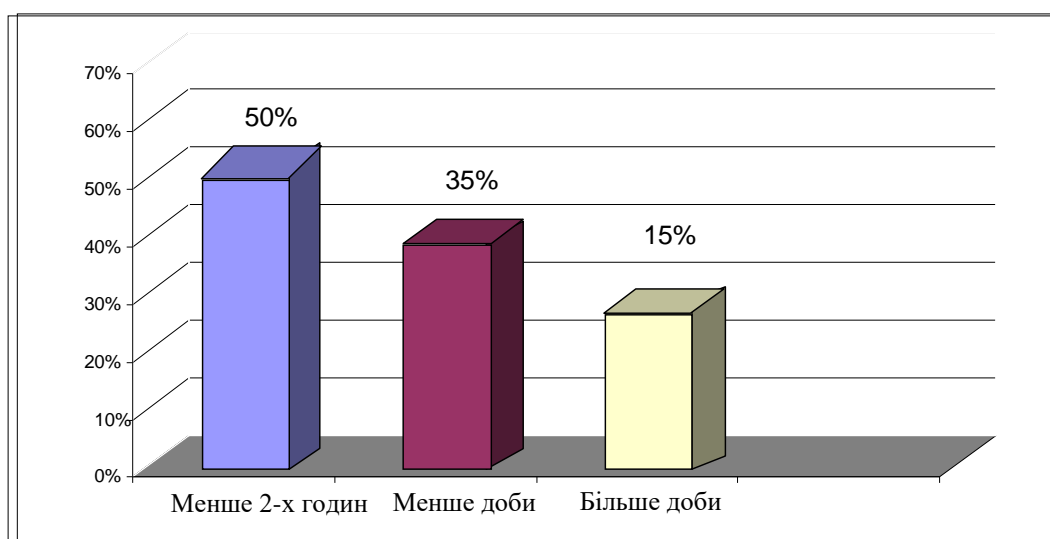
Статистика показує, що за сценарієм «А» відбувається близько 78 %, за сценарієм «Б» – близько 15 %, за сценарієм «В» – близько 6 % від загальної кількості пожеж у резервуарних парках. Для гасіння багатьох пожеж у резервуарних парках залучаються не тільки місцеві пожежні підрозділи та

спеціальна техніка, але й підрозділи і техніка з сусідніх регіонів, окремі пожежі тривають 1-2 доби і більше.

За літературними даними [6, 9, 12] серед встановлених безпосередніх причин виникнення пожеж у резервуарах для зберігання нафти і нафтопродуктів найбільш розповсюдженими є вогневі роботи, через які виникло 26,9 % пожеж. Необережне поводження з вогнем під час ремонту резервуарів, електричні та механічні іскри, а також гарячі вихлопи від глушника автомобіля були причиною 11,6 % від загальної кількості пожеж у резервуарах. В цілому під час очищення та ремонту резервуарів виникло 37,2 % пожеж від їх загальної кількості, 18 % від загальної кількості пожеж виникли від самозаймання пірофорних відкладень, причому 64 % таких пожеж зафіксовано на об'єктах видобування нафти і 36 % – у резервуарних парках нафтопереробних заводів. За решту відсотків «відповідають» підпали та інші причини. Частка пожеж від цих джерел запалювання істотно відрізняється для різних галузей промисловості. Найбільш небезпечним з точки зору можливості виникнення пожеж є весняно-літній період.

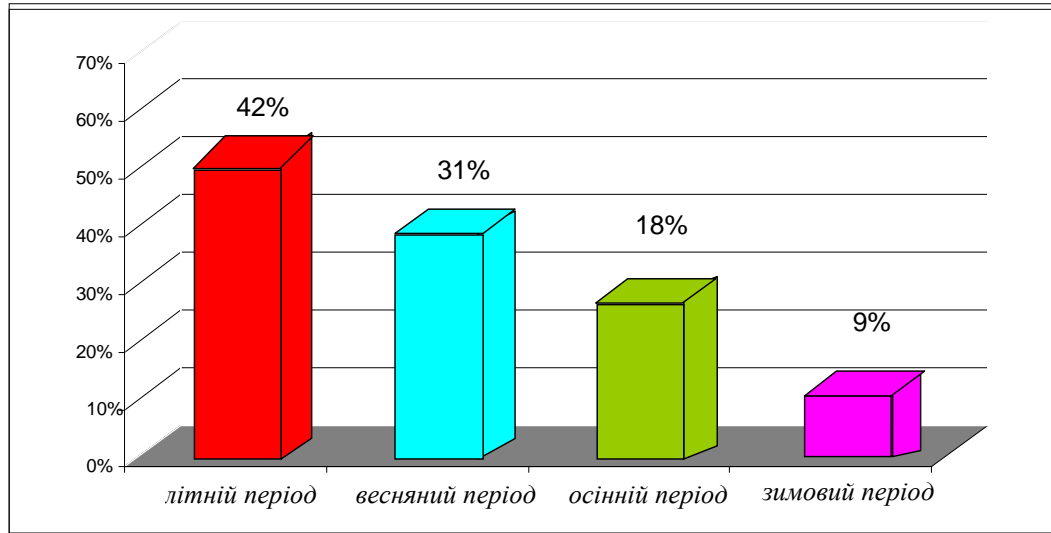
Проаналізувавши аварії, які виникли, можна зробити певні висновки:

а) час гасіння резервуарів з нафтопродуктами є значно тривалий процес, що ускладнюється високою температурою (рис. 1.1);



*Рисунок 1.1 – Основний час гасіння пожеж резервуарів з нафтопродуктами*

б) найбільша кількість пожеж у резервуарах з нафтопродуктами виникає у літній період року (рис. 1.3);



*Рисунок 1.2 – Основний період виникнення пожеж резервуарів з нафтопродуктами*

в) найбільшу небезпеку технологічного процесу становить висока можливість вибуху резервуару з нафтопродуктами.

Всі ці надзвичайні ситуації вимагають розробки надійних, добре обґрунтованих принципів забезпечення безпеки під час експлуатації обладнання у зв'язку з підвищеним рівнем пожежної та вибухопожежної небезпеки резервуарів з нафтопродуктами [15, 16].

Великий тепловий потік при горіння резервуарів з нафтопродуктів впливає на споруди, конструкції та інше, що розміщується неподалік (до 100 м) [17-21].

## **1.2. Конструктивні особливості сталевих вертикальних резервуарів**

Резервуар – споруда призначена для прийому, зберігання, видачі, обліку (кількісного і якісного), а також для відстоювання води і механічних домішок.

Класифікація резервуарів:

За матеріалом:

- залізобетонні (виготовляються із спеціальних марок бетону з відповідною гідроізоляцією);
- сталеві ( виготовляються методом зварювання);
- полімерні.

Сталеві резервуари найбільш розповсюджені і в залежності від форми у свою чергу поділяються на такі різновиди:

За формою:

- циліндричні, які бувають горизонтальні (мають циліндричний горизонтальний корпус та напівсферичні або плоскі з підсилюючими ребрами днища);
- вертикальні (мають вертикальні циліндричні стінки та плоскі днища і покрівлю);

Вертикальні зварні резервуари маркуються в залежності від ємності.

- каплеподібні;
- кулясті (сферичні);
- прямокутні.

За конструктивними особливостями:

- з плаваючою покрівлею (ПП або РВСПК);
- з стаціонарною покрівлею з понтоном (СПП);
- з стаціонарною покрівлею без понтона (СП або РВС);
- з газовою обв'язкою,
- з установкою УЛФ,

За рівнем ґрунту (Відповідно до ВБН В.2.2-58.1-94 п.1.5) :

- підземні (заглиблені у ґрунт або обсіпані ґрунтом, якщо найвищий рівень рідини в резервуарі або рівень рідини, що розлилась в будівлі або споруді, нижчий не менше ніж на 0,2 м найнижчої планувальної позначки прилеглого майданчика на відстані в межах 3-х м від краю сховища. При цьому, як впливає з визначення, ширина обсіпки по верху повинна бути не менше 3-х метрів.);
- наземні (якщо рівень рідини вище прилеглого майданчика).

На відміну від наземних сховищ підземні виключають можливість розливання ЛЗР чи ГР через руйнування стінок від вибуху або температурних напружень, випаровування легких фракцій у них нижче у порівнянні з наземними. При пожежах вони мають значно менший рівень теплового випромінювання, не вимагають проведення охолодження і тому організація їх пожежогасіння значно простіша. В той же час будівництво таких сховищ більш складніше і дорожче. З цієї причини вони використовуються дуже рідко.

За ємністю:

- малої ємності – до 1 000 м.куб.;
- середньої ємності – 1 000, 3 000, 5 000, 10 000 м.куб.;
- великої ємності – 20 000, 50 000, 75 000, 100 000, 120 000 м.куб.

Для зберігання легкозаймистих горючих рідин проектується і встановлюються окремо стоячі та групові резервуари. Максимальний об'єм резервуара встановлюється:

- з плаваючим дахом- 120 тис.м<sup>3</sup>;
- з постійним дахом - 20 тис.м<sup>3</sup>.

Резервуари обладнують пристроями приймання-роздачі, що мають місцеве або дистанційне керування. Кількість таких пристроїв визначають в залежності від максимальної продуктивності заповнення і спорожнення. Пристрій приймання-роздачі повинен обладнуватись надійним запірним орган (хлопавка, підйомна труба). Пристрій з хлопавкою, яка має бокове керування, обладнується запасним тросом. Швидкість руху потоку рідини не більша 2,5 м/с, при заповненні порожнього резервуара – не більше 1 м/с до моменту заповнення кінця патрубку приймання-роздачі.

До обладнання резервуару також відносять дихальну і запобіжну арматуру. Вибір дихальної арматури залежить від типу резервуару і рідини, яка в ній зберігається. Зокрема, на резервуарах типу ПП, СПП розташовують вентиляційний патрубок з вогнеперешкоджувачем; на резервуарах типу СП для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів до 93,3 кПа і з тиском у газовому просторі 2 кПа – дихальний і запобіжний клапан



з вогнеперешкоджувачем. На резервуарах з СП при атмосферному тиску у газовому просторі для зберігання масел і мазутів – вентиляційний патрубок.

Резервуар обладнується приладами місцевого або дистанційного вимірювання рівня і температури рідини, що зберігається, автоматичною сигналізацією верхнього і нижнього рівнів; пристроями відбору середньої проби; пристроями для вилучення підпродуктової води (для вилучення підпродуктової води резервуари всіх типів оснащуються сифонними кранами. Крани встановлюються на першому поясі стінки резервуара в будь-якому місці по обидва боки від осі люка-лазу на відстані не менше 1 м); пристроями для підігрівання в резервуарах високов'язких і застигаючих нафти і нафтопродуктів (в'язкі нафту і нафтопродукти зберігають в резервуарах, які мають теплоізоляційне покриття і обладнані засобами підігріву, що забезпечують збереження якості рідин та пожежну безпеку); пристроями для запобігання нагромадження відкладів у резервуарі; пристроями для зачистки; світловими і монтажними люками, люками-лазами і патрубками для встановлення обладнання (верхній світловий люк забезпечує провітрювання резервуару, підйом хлопавок); люки-лази встановлюються для проникнення в резервуар при ремонті, очищенні та для провітрювання; пристроями і засобами виявлення і гасіння пожеж; пристроями захисту від блискавки, заземлення та захисту від статичної електрики [22-25].

При застосуванні легкоскидної конструкції стаціонарних покрівель у вибухозахищених резервуарах необхідно забезпечити відрив настилу покрівлі від стінки резервуара.

Понтон або плаваюча покрівля – плаваючі покриття, які знаходяться всередині резервуара на поверхні рідини, призначені для скорочення втрат нафти чи нафтопродуктів при зберіганні (понтони бувають металеві та синтетичні).

Синтетичний понтон повинен мати високу плавучість, механічну міцність, довговічність. Понтон з синтетичних матеріалів слід проектувати з негорючих струмопровідних матеріалів або обладнання. Між плаваючою

покрівлею чи понтоном і стінкою резервуара повинен бути зазор 200 мм з допустимим відхиленнями 100 мм.

Плаваючі покрівлі та понтони повинні мати ущільнювачі (затвори), які мають нормовані коефіцієнти герметичності. Ущільнювачі (затвори) бувають жорсткого (механічного) і м'якого (питльованого, з наповненням) типів.

На плаваючій покрівлі у резервуарах з об'ємом більше 5000 м<sup>3</sup> повинен знаходитись кільцевий бар'єр для утримання піноутворюючих засобів пожежогасіння [26-28].

Резервуари з плаваючим дахом (рис.1.3) застосовуються в основному в південних районах України.

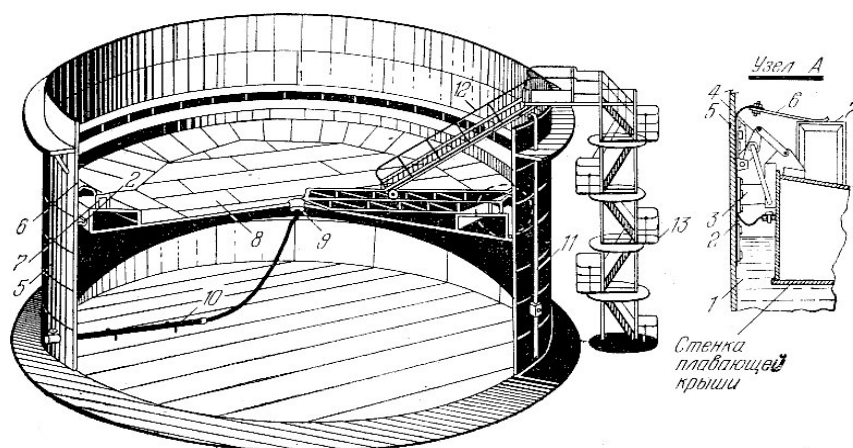
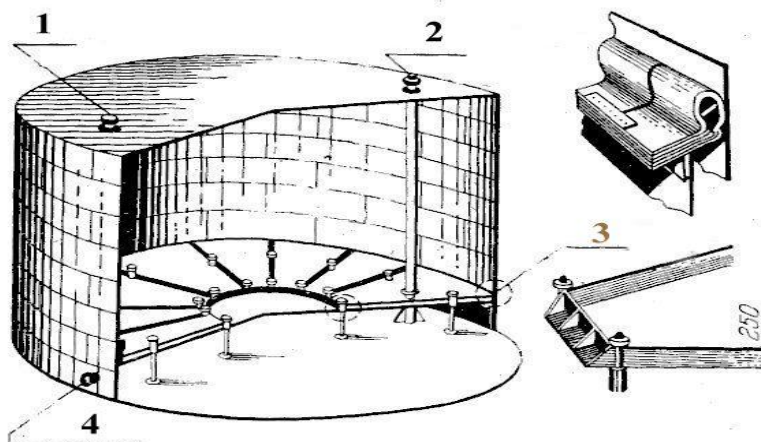


Рисунок 1.3 – Розріз резервуара з плаваючим дахом.

- 1-башмак; 2-мембрана; 3-притискна пружина; 4-шарнірне з'єднання;  
 5-корпус резервуара; 6-захистний козирок; 7-кронштейн козирка;  
 8-плаваючий дах; 9,10-дренажний пристрій для стікання води; 11-мірник;  
 12-пересувна драбина; 13-зовнішня драбина.

Всередині резервуара влаштований металевий дах, який плаває на поверхні нафтопродукту. Нижнє положення плаваючого даху фіксується кронштейнами на висоті 1,8 м від днища резервуара. Відвід дощової води з резервуара в дренажну систему проводиться при допомозі шарнірної труби, яка фіксується в нижній частині.

На підприємствах нафтопродуктів розповсюджені також і резервуари з понтонами. Вони утворюють конструкцію з дном із листового металу і підсилюючими ребрами.



*Рисунок 1.4 – Розріз резервуара з понтоном.*

*1-труба для замірна рівня ; 2-пробовідбірник; 3-затвор; 4-люк-лаз*

Понтон складається із таких основних елементів: поплавка із пінопласту ПХВ-1; ковра із поліамідної плівки ПК-4 в три ряди; підсилюючих елементів, на яких монтуються поплавки, секції затвора і ковра; металевої сітки для зняття зарядів статичної наруги з поверхні рідини. В нижньому положенні понтон опирається на трубчаті стійки. Зазор між понтоном і стінкою резервуара шириною 200 мм перекривається затвором, який складається із внутрішнього і зовнішнього ряду петель, виготовлених із прошитих шарів прогумованого матеріалу.

З метою безпеки і зручності обслуговування обладнання на покрівлі влаштовують майданчики і огороження. В даному виді резервуара передбачено пристрої з трубопроводами для наповнення і викачування продукту. На рис.1.6 зображений загальний вид наземного резервуара для зберігання ЛЗР.

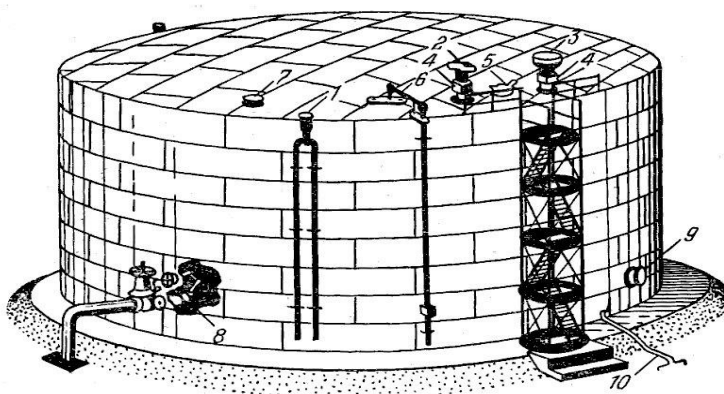


Рисунок 1.5 – Загальний вид наземного резервуара.

1 – піногенераторна камера; 2- дихальний клапан; 3- запобіжний клапан; 4- вогнеперешкоджувач; 5- люк для вимірювання; 6- пристрій для вимірювання рівня нафтопродукта; 7- світловий люк; 8- хлопушка; 9- люк-лаз; 10- заземлення

Рухомі елементи конструкцій плаваючих покривель і понтонів повинні виготовлятися з матеріалів, які виключають іскроутворення за рахунок тертя деталей, що переміщуються та від їх можливих співударів.

При ручному відборі проб та замірі рівня слід використовувати тільки заземлені пристрої, виготовлені з матеріалів з питомим опором менше  $10^5$  Ом.

### 1.2.1 Резервуарні парки

Резервуарний парк - це сукупність великих резервуарів (одиничною ємністю більш ніж 400 куб.м.), що розташовані на одному майданчику.

Склади нафти і нафтопродуктів (СНН) – комплекси споруд (резервуарів, цистерн) і устаткування (насосні станції), що необхідні для прийняття, зберігання і відпуску споживачам нафти та нафтопродуктів. СНН класифікуються відповідно до табл. 1.

Таблиця 1

### Класифікація СНН

Категорія СНН	Підкатегорія СНН	Загальна місткість по підкатегорія, м <sup>3</sup>
I	I – а	Понад 300000
	I – б	Понад 100000 до 300000 вкл.
II	II – а	Понад 50000 до 100000 вкл.
	II – б	Понад 20000 до 50000 вкл.
III	III – а	Понад 10000 до 20000 вкл.
	III – б	Понад 2000 до 10000 вкл.
	III – в	До 2000 вкл.

Нафтопродукти потрапляють (на склад чи до споживача) залізничним, автомобільним, водним транспортом або трубопроводами.

Такі склади називають також «складами ЛЗР-ГР», «паливно-мастильними складами» (ПМС), а великі склади – нафтобазами.

Для резервуарних парків нафти і нафтопродуктів, незалежно від категорій і групи СНН слід застосовувати типи резервуарів у відповідності до ГОСТ 1510-84.

Для нафти і нафтопродуктів з температурою загущення вище  $0^{\circ}\text{C}$ , для яких не можуть застосовуватись резервуари з плаваючою покрівлею або резервуари з понтоном, незалежно від температури спалаху і тиску насичених парів слід передбачати резервуари зі стаціонарною покрівлею.

Резервуари, як правило, слід розміщувати групами. В межах однієї групи дозволяється зберігання легкозаймистих і горючих рідин.



*Рисунок 1.6 – Вид на розміщення резервуарів по групах в резервуарному парку*

Загальна місткість групи наземних резервуарів в залежності від типу і номінального об'єму резервуарів, що в ній розміщуються, виду нафти і нафтопродуктів, що зберігаються, а також відстані між стінками резервуарів в залежності від діаметру резервуарів, що розташовуються в одній групі, слід визначати у відповідності до таблиці 2.

Таблиця 2

## Загальна місткість групи резервуарів

Тип сталених резервуарів	Одиничний номінальний об'єм резервуарів, що встановлюються в ґрунті, м <sup>3</sup>	Вид рідин, що зберігаються	Допустима загальна номінальна місткість групи, м <sup>3</sup>	Відстань між резервуарами в групі в залежності від Д або в метрах
Вертикальні резервуари: 1. З плаваючою покрівлею	50000 і більше	ЛЗР, ГР	200000	0,5 Д, але не більше 30 м
	менше 50000	ЛЗР, ГР	120000	0,5 Д
2. З понтоном	50000	ЛЗР, ГР	200000	30 м
		ГР, ЛЗР, крім бензину	120000	0,5 Д
	Менше 50000 до 400	Бензин	120000	0,65 Д
	100 до 400 вкл.	ЛЗР, ГР	один блок 4000	не нормується
3. Зі стаціонарною покрівлею	від 50000 до 400	Дизпаливо, ГР	80000	0,5 Д, але не більше 30 м
	від 50000 до 400	ЛЗР	Одним блоком 4000	0,7 Д, але не більше 30 м
Горизонтальні резервуари	До 100 вкл.	ЛЗР, ГР	Одним блоком 4000 див. п.17.1.31	Не нормується
	Від 100 до 400 вкл.	ЛЗР, ГР	Одним блоком 4000	Не нормується
	Більше 100	ЛЗР, ГР	80000	0,5 Д

Таблиця 3

## Номінальні об'єми та оптимальні розміри резервуарів

Номінальний об'єм резервуару (типорозмір) м <sup>3</sup>	Оптимальні розміри, м (діаметр, Д, і висота, Н) вертикальних резервуарів таких типів			
	зі стаціонарною покрівлею (з понтоном або без понтона) СПП або СП		з плаваючою покрівлею ПП	
	Д	Н	Д	Н
100	4,7	6,0		
200	6,6	6,0		
300	7,6	7,5		
400	8,5	7,5		
700	10,4	9,0		
1000	10,4	12,0	12,3	9
2000	15,2	12,0	15,2	12
3000	19,0	12,0	19,0	12
5000	21,0	15,0	22,8	12
10000	28,5	18,0	28,5	18
20000	40,0	18,0	40,0	18
30000	45,6	18,0	45,6	18
40000	56,9	18,0	56,9	18
50000	60,7	18,0	60,7	18

На теренах України відбувається збільшення та розширення резервуарних парків для зберігання нафти та нафтопродуктів. А саме, нещодавно, будучи лідером у сфері виготовлення і монтажу резервуарів в Україні, ВАТ «Укрстальконструкція» виграло тендер на виготовлення парку таких об'єктів для ВАТ «Нафтохімік Прикарпаття». Спочатку було виготовлено 6 резервуарів загальною місткістю 120 тис. куб. м., що відповідає загальній масі в 3 тисячі тон металоконструкцій. Згодом в стислі терміни був побудований найбільший резервуарний парк загальною місткістю 220 тис. куб.м.

### **1.3. Характеристика нафти і нафтопродуктів**

#### **1.3.1. Фізико-хімічні властивості**

Вибухопожежонебезпека нафтопродуктів полягає в особливості їх характеристик та властивостей, адже нафта є природними маслянистими горючими рідинами з своєрідним запахом і густиною частіше за все менше  $1 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Вони мають різну консистенцію — від легколетких до густих, малорухливих. Колір нафт у більшості випадків бурий і темно-коричневий (до чорного), рідше жовтий і зеленуватий і, зовсім рідко, зустрічається майже безбарвна, так звана «біла нафта». Хоча нафти різних родовищ значно відрізняються за хімічним складом і властивостями, проте елементний склад їх коливається в досить вузьких межах (%): C = 83-86, H = 11 –14,0 = 0,2-1,3, N — 0,06-1,7, S = 0,01 –5,0.

Нафти є складними сумішами вуглеводнів і різноманітних кисневих, азотних і сірчистих сполук. В природі зустрічаються нафти, що містять більше гетероатомних органічних сполук, ніж власне вуглеводнів, і такі, що складаються майже виключно с вуглеводнів. З фізичної точки зору нафта розглядається як розчин газоподібних і твердих вуглеводнів в рідині. Природна нафта, що видобувається з надр землі, завжди містить деяку кількість розчинених в ній газів (попутні природні гази), головним чином метану і його гомологів. Як правило, одержувані при фракційній перегонці нафти дистиляти — бензинові, гасові, соляркові, масляні і мазут — рідкі речовини. До твердих (при кімнатній температурі) нафтоскладових належать парафіни, церезини і гудрон.

Головне місце в груповому хімічному складі нафт належить вуглеводням — метановим, нафтовим і ароматичним. Ця обставина використана при побудові хімічної класифікації нафт, основи якої розроблені в ГрозНДІ (Грозненський НДІ).

За переважанням (більше 75% по масі) якого-небудь одного з класів вуглеводнів розрізняють, по-перше, 3 основні класи нафт, а саме:

Клас нафти за груповим хімічним складом вуглеводнів умовно визначають не у всій пробі нафти, а лише в її погонах, що википають до 300 °С. Нафти не тільки різних, але і одного і того ж родовища можуть давати при розгоні фракції, що википають до 300 °С, в різних кількостях. Проте в більшості нафт вуглеводні складають частіше всього 30-50% і лише досить рідко вони переважають вміст інших органічних сполук. Разом з тим такі кисень- і сірковмісні сполуки нафти, як смолянисті і асфальтові речовини, іноді можуть досягати у складі нафт 10-20% і більше. В таких випадках їх відносять до особливої групи смолянистих нафт. Якщо нафти містять ще більше смолянистих і асфальтових речовин, вони відносяться до перехідних утворень між нафтами і природними асфальтами. Тверді залишки, що випарувалися і вивітрені, нафти називаються кір (звідси закіровані породи).

Нафти в природних умовах містять як розчинені в них попутні гази, так і воду, в якій розчинені мінеральні солі. Крім розглянутої вище хімічної класифікації нафт розроблені також технологічні класифікації.

В основу технологічної класифікації нафт покладено: вміст сірки в нафтах і світлих нафтопродуктах, вихід фракцій, що википають до 350 °С, потенційний вміст базових масел (а також індекс їх в'язкості) і парафіну.

Звичайно нафти густиною менше 0,9 г/см<sup>3</sup> починають кипіти при температурі нижче 100 °С. Температура початку кипіння нафти залежить від її хімічного складу, причому при одній і тій же густині нафтові й ароматичні вуглеводні киплять при нижчій температурі, ніж метанові. При переробці нафти в лабораторних умовах відбирають такі фракції:



1) від 40 до 180–200 °С — бензинові фракції, у яких можуть виділяти вузькі відгони:

від 40 до 70-90 °С — петролейний ефір і від 160 до 205 °С — лігроїн;

2) від 200 до 300 °С — гасові фракції;

3) 270–350 °С — газойлева фракція;

4) 300–370 °С — солярна фракція;

5) залишок після відгону усіх фракцій називається мазутом.

Значна частина мазуту використовується як паливо на електростанціях і в суднових двигунах. Деяка кількість мазуту є сировиною для одержання легких моторних палив методами крекінгу. Перегону на олії піддають тільки мазути так звані «масляні нафти», мазути яких у деяких випадках використовуються як мастила без перегонки.

Видобуток нафти супроводжується вилученням із природних підземних резервуарів значних кількостей газу, води, механічних домішок і солей. При надходженні на поверхню газ, розчинений у нафті, відокремлюють від неї за допомогою системи сепарації. Найбільш легкі компоненти вуглеводних газів відокремлюють від нафти в нафтових трапах, колонках і мірниках. Найважчі вуглеводні гази відокремлюють від нафти в газових сепараторах. У трапі також відбувається очищення газу від нафтового пилу. Відділення газу від нафти і пилу в трапі відбувається за рахунок зміни тиску і швидкості нафтового потоку, що рухається. Для поліпшення процесу сепарації суміш, що надходить у трап, розприскують, для чого в трапах встановлюють ґрати, відбійники, тарілки й ін. пристосування. Для поділу продуктів фонтанування високого тиску (вище 20 атм.) застосовують східчасту сепарацію, при якій досягається грубе фракціонування газу і використовується пластовий тиск для транспорту газу. Відділена від газу нафта спрямовується в промислові резервуари, а звідти на нафтопереробні заводи.

### 1.3.2. Теплофізичні властивості

Усі процеси переробки нафти пов'язані з нагріванням чи охолодженням, що вимагає всебічного вивчення теплових властивостей нафти і нафтопродуктів.

Чим легша нафта чи її фракція, тим більше значення її коефіцієнта теплового розширення. Питома теплоємність нафт при температурах від 0 до 50 °С коливається у вузьких межах — від 1,7 до 2,1 кДж/кгК. Найчастіше з підвищенням густини нафти вона зменшується. Теплоємність окремих відгонів однієї і тієї ж нафти зменшується в міру підвищення густини, молекулярної маси фракцій і залежить від хімічного складу нафтопродукту і температури.

Теплота випару нафтових дистилатів при атмосферному тиску становить 160–320 кДж/кг. Теплота згоряння нафт коливається від 40 до 45 МДж/кг, причому вона тим більше, чим менше густина нафти чи фракцій.

При переробці нафти основна маса процесів супроводжується хімічними реакціями, розчиненням, адсорбцією, абсорбцією і змочуванням поверхонь реакторів, що протікають з поглинанням чи виділенням тепла. Тепловий ефект процесу в цілому складається з теплот цих етапів.

Розчинення вуглеводневих газів і нафтової пари у рідких нафтопродуктах супроводжується виділенням тепла, яке дорівнює теплоті їхньої конденсації. Розчинення твердих вуглеводнів у рідких нафтопродуктах звичайно супроводжується поглинанням тепла.

Для нафт і нафтопродуктів, як для складних сумішей, немає однієї точки затвердіння чи точки плавлення, а характерна наявність температурних інтервалів затвердіння і плавлення. Рідка нафта звичайно застигає при температурі близько  $-20$  °С, але іноді і при  $+10$  °С, що залежить від вмісту в ній твердих парафінів. Найнижчу температуру затвердіння (до  $-80$  °С) мають бензини.

Температурою спалаху називають температуру, при якій з нафтопродукту, що нагрівається в стандартних умовах, виділяється стільки пари, що вони при піднесенні відкритого полум'я і доступності повітря загоряються з коротким

спалахом, утворюючи легке полум'я, що перебігає, й відразу ж гасне. Чим вище температура кипіння нафтопродуктів, тим вище температура їхнього спалахування. Бензинові фракції мають температуру спалаху до  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , гасові — понад  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ , масляні від  $130$  до  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура спалахування дає уявлення про те, наскільки дані продукти багаті легколеткими фракціями, і вказує на ступінь пожежонебезпеки і вибухонебезпеки стосовно нафтопродуктів.

Температура самозаймання — це та температура, при якій нафтопродукт при наявності кисню повітря загоряється без зіткнення рідини чи її пари з полум'ям або іскрою, а тільки внаслідок підігріву ззовні (через стінку). Для бензину вона дорівнює  $420\text{--}530\text{ }^{\circ}\text{C}$ , гасу —  $380\text{--}440\text{ }^{\circ}\text{C}$ , газойлю —  $340\text{--}360\text{ }^{\circ}\text{C}$  й реактивного палива —  $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Алкани мають найнижчу температуру самозаймання (пентан —  $284,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), нафтени — середню (циклопентан —  $385\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) і арени — найвищу (бензол —  $591,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Безводні нафти і нафтопродукти є діелектриками, і деякі з них застосовуються як електроізоляційний матеріал (парафін) чи ізолююче середовище (трансформаторна олія) у трансформаторах, масляних реостатах і вимикачах. Діелектрична проникність нафт і нафтопродуктів у порівнянні з іншими діелектриками невелика і їх діелектрична постійна коливається в межах  $1,86\text{--}2,5$ . Вивчення діелектричних властивостей олій різного групового складу показало, що найстійкішими електричними параметрами володіють олії, що не мають ароматичних вуглеводнів, асфальто-смолистих речовин і твердих парафінів.

Нафта і нафтопродукти при терті (заповненні сховищ і перекачуванні з великою швидкістю по трубах, а також фільтрації) сильно електризуються і на їхній поверхні можуть накопичуватися заряди статичної електрики, у зв'язку з чим можуть відбуватися вибухи і пожежі. Найнебезпечніші в цьому відношенні світлі нафтопродукти, що особливо сильно електризуються. Для запобігання вибухів і пожеж апаратуру, трубопроводи і резервуари заземлюють, а також застосовують спеціальні антистатичні присадки до нафтопродуктів. З водою ані нафти, ані нафтопродукти практично не змішуються, а їхня взаємна розчинність

дуже мала і не перевищує сотих часток відсотка. У нафтових вуглеводнях вода розчиняється в невеликих кількостях — від 0,003 до 0,13% при 40 °С. Розчинність води підвищується з ростом температури і зниженням молекулярної маси вуглеводнів. Взаємна розчинність води і нафтопродуктів має велике практичне значення в зв'язку з можливістю виділення з моторного палива мікрокрапельок чи кристаликів води, що може ускладнювати роботу двигунів.

Аналіз відомих властивостей продуктів нафтопереробки дозволив побудувати сім'ю кривих для кожного окремого виду нафтопродукту. У дизельній фракції спостерігається найбільша розбіжність в значеннях, тому для прикладу графічне відображення її властивостей представлено в агрегатному стані рідини (рис. 1.7). Суцільними лініями позначено залежності за відомими виразами

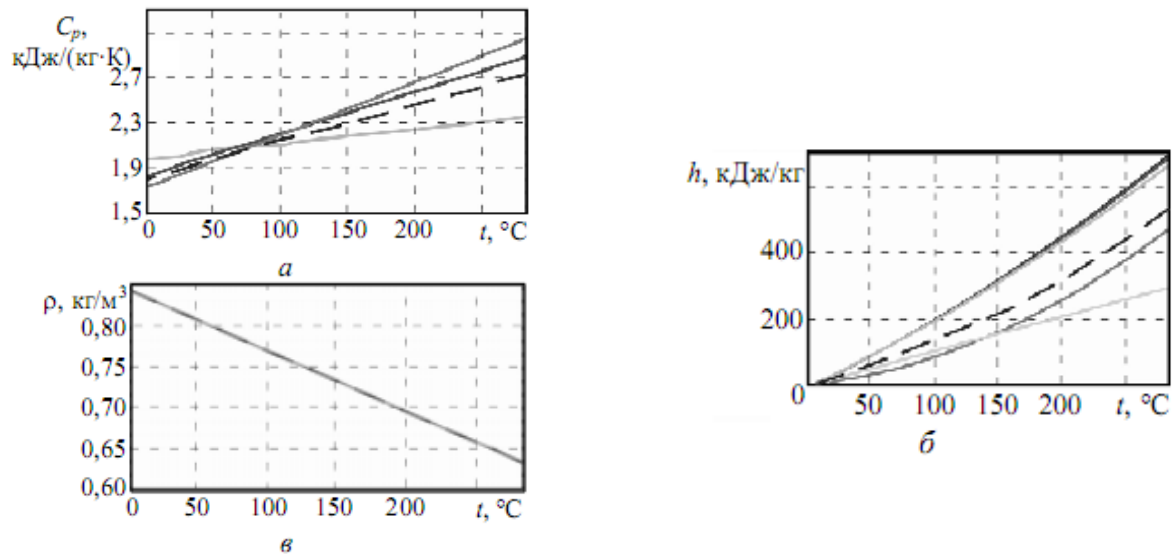


Рисунок 1.7 – Залежності теплофізичних властивостей дизельної фракції від температури в рідинній фазі:  
теплоємність (а); ентальпія (б); густина (в).

За результатами дисперсійного аналізу розроблена імітаційна модель теплофізичних властивостей залежно від температури. У рідинному стані теплоємність, кДж/(кг·К)

$$C_p(T) = aT^2 + bT + c, \text{ ентальпія, кДж/кг}$$

$$h(T) = AT^2 + BT - C, \text{ густина, кг/м}^3$$

$$\rho t^4 (T) = n - mT,$$

де  $T$  — температура нафтопродукту, К;

$a, b, c, A, B, C, m, n$  — коефіцієнти поліномів, значення яких визначаються шляхом апроксимації даних про властивості речовини.

Графічне відображення теплофізичних властивостей імітаційної моделі для дизельної фракції представлено пунктирною лінією (рис. 1.7).

### **1.3.3. Термодинамічний стан та вибухонебезпека нафтопродуктів, що зберігаються в резервуарах за умов пожежі**

Внаслідок нагріву стінок і даху сусіднього резервуара підвищується швидкість випаровування горючої рідини, що зберігається в ньому. При цьому, якщо в резервуарі зберігається авіапаливо, що має низьку температуру спалаху, то всередині резервуара може утворитися концентрація горючої суміші вищої за верхню межу вибуховості авіапалива.

У такому випадку всередині резервуара створюється надмірний тиск, який перешкоджає проникненню полум'я всередину, а витікаючі через дихальну апаратуру горючі пари можуть запалати від полум'я резервуара, що горить, горючі пари над дихальною апаратурою, викликаючи нагрівання цієї конструкції.

Нагрівання резервуара, в якому зберігається горюча рідина з високою температурою спалаху, наприклад, дизельне паливо, небезпечно і полягає в тому, що всередині резервуара в процесі нагрівання може утворитися вибухонебезпечна концентрація парів дизельного палива. У такому випадку сусідні резервуари з тим, що горять, з самого початку пожежі необхідно охолоджувати водою, запобігаючи тим самим можливості вибуху всередині них.

В резервуарі з початку горіння рідини на її поверхні встановлюється температура, що дорівнює середній температурі кипіння багатofракційної рідини. По мірі горіння температура поверхні буде поступово підвищуватися, і горюча рідина прогріватиметься углиб. При цьому стійкість і ефективність піни при гасінні пожежі знижуються [22, 32-36].

Швидкість горіння нафтопродуктів залежить від величини вільної поверхні, фізичних властивостей рідини, швидкості вітру, температури рідини. Швидкість горіння рідини визначається швидкістю її випаровуванням, яка, в свою чергу, залежить від швидкості прогрівання поверхні рідини. З підвищенням початкової температури рідини зростає швидкість її горіння [37-49].

Під дією полум'я, навіть в перші хвилини пожежі сухі стінки резервуарів втрачають міцність і деформуються. Тому при виникненні пожежі в резервуарі з низьким рівнем горючої рідини, щоб уникнути руйнування, необхідно вести інтенсивне, постійно охолодження його зовні водою [19-26].

Закипання і викид із резервуара рідини, що горить, пов'язано з її прогріванням на велику глибину. При горінні оливи, мазуту, нафти виникає прогрітий шар води, товщина якого згодом збільшується, а температура трохи відрізняється від температури поверхні рідини. Під цим шаром температура рідини різко знижується до початкової. Авіабензин і світлі нафтопродукти при пожежах прогриваються на незначну глибину.

У всіх нафтопродуктах виникає скипання, що містять в собі воду і прогриваються в процесі горіння до 100 °С. Тоді вода, що міститься в рідині у вигляді дрібних крапель, переходить в пару, котра виривається на поверхню і створює піну, яка переливається через край резервуара і продовжує горіти, загрожуючи пожежею сусіднім резервуарам і спорудам.

Такий викид нафтопродуктів спостерігається переважно при горінні темних нафтопродуктів, наприклад, нафти, що містить 3,8% води, і мазуту, що містить 0,6 % води. Викид виникає при зіткненні нафтопродукту, що прогрівся, з водяною подушкою на дні резервуара. Викид відбувається при температурі нафтопродукту вищою 100 °С на межі розподілу нафтопродукт - вода. Саме тут протікає процес інтенсивного пароутворення, який призводить до утворення парової подушки, що рухається вертикально вгору через товщу нафтопродукту, захоплюючи і викидаючи його за межі резервуара.

При гасінні пожеж резервуарів з нафтопродуктами спостерігалися випадки, коли при викиді нафтопродукт, що горить, підіймався на велику висоту

і падав на відстані 70-120 м від резервуара, викликаючи пожежну небезпеку сусідніх резервуарів, будівель, споруд, а також наражаючи на небезпеку бійців пожежної команди.

Існує можливість утворення вибухонебезпечних концентрацій (ВНК) в резервуарах та ємностях, а саме за умов:

- якщо є вільний простір і достатня кількість парів ЛЗР; (вільний простір у більшості резервуарів завжди має місце, оскільки їх нормативний коефіцієнт заповнення не повинен перевищувати 0,85. Винятком є резервуари з плаваючою покрівлею, в яких за будь-яких умов вільний простір відсутній. Кількість парів залежить від робочої температури, яка для резервуарів дорівнює температурі зовнішнього середовища. ВНК буде утворюватися, якщо робоча температура буде знаходитись у межах від  $T_n$  до  $T_v + 15$ , тобто:  $T_n < T_p < T_v$ ).

Для бензинів такий інтервал буде знаходитись у межах від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+15^{\circ}\text{C}$ . Тобто в таких резервуарах ВНК буде мати місце тільки при достатньо холодній погоді, оскільки при теплій парів буде з надлишком.

Для гасів такий інтервал буде знаходитись у межах від  $+20^{\circ}\text{C}$  до  $95^{\circ}\text{C}$ . Тобто в таких резервуарах ВНК буде мати місце тільки при достатньо теплій погоді, оскільки при холодній парів буде недостатньо.

Для дизпалива такий інтервал буде знаходитись у межах від  $+50^{\circ}\text{C}$  до  $110^{\circ}\text{C}$ . В резервуарах з іншими нафтопродуктами за будь-яких погодних умов парів буде недостатньо.

Як видно з температурних властивостей нафтопродуктів, це стосується тільки бензинів. При цьому надлишок парів буде розбавлятися повітрям, яке надходить крізь дихальні отвори до вибухонебезпечної концентрації (ВНК). Після закінчення зливу вільний простір знову почне насичуватися парою і резервуар, ще деякий час, буде залишатися небезпечним. Таку властивість поведінки резервуарів з бензинами під час зливів треба враховувати не тільки при аналізі пожежної небезпеки, а і під час гасіння пожеж у резервуарних парках [41-43].

Як видно з температурних властивостей нафтопродуктів це буде стосуватися бензинів постійно та гасів при теплій погоді. При цьому розрізняють два види так званого "дихання" резервуарів: "мале дихання" - вихід парів через випаровування при зміні температури довкілля; "велике дихання" - вихід парів під час наповнення резервуарів чи підсмоктування повітря.

Істотно, що найбільша одночасна кількість пари буде виходити з резервуарів під час "великого дихання", але і при "малому диханні" ця кількість теж достатньо велика. Так, у літній період резервуар ємністю 10 000 куб.м з бензином АИ-93 може втрачати за добу до 2-х тон бензину за рахунок випаровування.

Достатність кількості пари над мазутами може виникати при їх перегріві, аваріях. Причинами аварій можуть бути:

- переповнення резервуарів та ємностей при відмові контрольних приладів або помилках операторів;
- пошкодження резервуарів при відмові дихальної арматури від підвищеного тиску або вакууму;

Нормативна ступінь заповнення РВС наведена в табл. 4

Таблиця 4

Нормативна ступінь заповнення РВС

Номінальний об'єм резервуару, м <sup>3</sup>	Коефіцієнт використання об'єму ( $K_v$ ) в залежності від типу резервуару		
	СП	СПП	ПП
До 5000 вкл	0,83	0,76	0,80
Понад 5000	0,85	0,80	0,83





*Рисунок 1.8 – Пожежа резервуарного парку*

Сучасні резервуари розраховують на внутрішній тиск не більше 2 кПа (200 мм вод.ст.) та на вакуум не більше 0,2 кПа (20 мм вод.ст.) Підтримування таких параметрів при наливах та зливах забезпечує дихальна арматура - дихальні та запобіжні клапани. Але при неохайному догляді вони можуть забруднюватись або взимку примерзати, що значно підвищує їх опір.

- знос сальників засувок та продуктових насосів;
- старіння прокладок фланцевих з'єднань трубопроводів та апаратів;
- пошкодження від корозії (особливо вразливі на корозію днища сталевих резервуарів поскільки відсутній доступ для їх контролю);
- пошкодження від вібрації насосів та їх електродвигунів при поганому закріпленні.

При аваріях з виходом назовні ЛЗР-ГР з  $T_p < T_n - 10^\circ \text{C}$  біля апаратів буде виникати пожежонебезпечне середовище [19-27].

При цьому розмір зони В-І буде становити:

- від герметичних апаратів та установок - 3 м;
- від дихальних пристроїв - 5 м;
- від місць відкритого наливу - 20 м.

Наявність джерел запалювання, серед яких: теплові прояви відкритого вогню (куріння робочих у неналежних місцях; іскри від зварювання металу при

проведені ремонтних робіт; відкритий вогонь та високонагріті поверхні котельних установок; іскри та високонагріті поверхні ДВЗ автотранспорту та тепловозів); теплові прояви механічної енергії (іскри від співударів речей з чорного металу; перегріву погано змащених підшипників насосів та електродвигунів); теплові прояви електричної енергії (іскри від КЗ в електричних мережах через старіння ізоляції та механічні пошкодження; перегріву через перевантаження; перегріву з'єднань через великі перехідні опори; розряди статичної електрики; розряди атмосферної електрики; невідповідне та несправне електричне обладнання); теплові прояви хімічної енергії (самозаймання замащеного ганчір'я; самозаймання пірофорних сполук сірки при контакті з повітрям (такі сполуки можуть виникати в резервуарах з сировою нафтою, мазутом та окремих видах дизпалива).

#### **1.4. Пожежі в резервуарних парках**

Пожежі на об'єктах, де розміщені резервуари з нафтопродуктами дуже швидко набувають великих розмірів і можуть розповсюджуватися: вибухом резервуарів; вибухом пароповітряних хмар; по розливам ЛЗР чи ГР; спінення та викид нафтопродукту; тепловий вплив резервуару, що горить; по трубопроводах; по дихальних трубах; випромінюванням; по промканалізації [29, 41-45].

Ускладнюють гасіння пожежі резервуарів виділення великої кількості теплової енергії при горінні, нагрівання сусідніх резервуарів, обладнання і установок; наявність складного, громіздкого обладнання і пристроїв, в ряді випадків здатних розповсюджувати пожежу і отруднювати її гасіння; викид палаючого продукту із резервуарів. Встановлено, що якщо в продукті є вода і інші неоднорідні продукти, які здатні бурхливо скипати і вспінюватись, то при довготривалому нагріванні можливий їх викид із ємкостей. Вважають, що при наявності в нафті до 1% вологи, може статися вскипання приблизно через 40-60 хвилин, а при 1-1,5%- через 40 хвилин [46-49].

Відстань, на яку викидається велика кількість продукту, досягає декілька діаметрів ємкості, а площа яку покриває палаюча рідина - декілька тисяч

квадратних метрів. Розповсюдження вогню залежить від швидкості вітру і рельєфу місцевості.



*Рисунок 1.9 – Пожежа резервуару*

Відомі випадки, коли після довготривалого горіння (7-10 год.) сотні тон палаючої нафти, протягом 1-2 хвилини, були викинені на відстань 100 м, при цьому, площа горіння рідини досягала 17 000 м<sup>2</sup>. При сильному вітрі викинутий продукт може досягати відстані до 150 м. Висота вильоту рідини іноді перевищує подвоєну висоту резервуару (до 80 м і більше). Початок викиду характеризується значним шумом [48-50].

Із аналізу пожеж і даних експериментів інтервал часу, через який можливе утворення викиду, залежить від висоти шару нафти, товщини шару підтоварної води, швидкості викидання і прогріву рідини.

Таким чином, склади нафти та нафтопродуктів відносяться до досить складних, комплексних об'єктів і мають значну пожежну небезпеку. Найбільшу небезпеку мають зони зберігання нафтопродуктів через їх значні об'єми.

Основними ускладненнями, які виникають під час пожеж в резервуарах з нафтою і нафтопродуктами і значною мірою перешкоджають їх гасінню, є утворення так званих «карманів», а також скипання і викиди нафти (нафтопродуктів) з резервуарів [51-53].

«Карманами» називають закриті зони, в яких тепло- і масообмін відбуваються незалежно від основної маси нафти (нафтопродукту). «Кармани» можуть мати різну форму і утворюватися на стадії виникнення пожежі в результаті підриву стаціонарної покрівлі, який супроводжується її зависанням або частковим обрушенням всередину резервуара, або перекосу плаваючої покрівлі (понтону). «Кармани» можуть утворюватися також під час розвитку пожежі внаслідок низької стійкості вільних стінок резервуарів [47].

Як свідчить аналіз статистичних даних, протягом 5-15 хвилин вільний борт резервуара втрачає свою несучу здатність і під впливом сили тяжіння деформується до рівня наливу нафтопродукту. У деяких випадках деформація борта відбувається нижче рівня наливу, і нафта (нафтопродукт) виходить в обвалування. Якщо резервуар споряджено плаваючою покрівлею або стаціонарну покрівлю підірвано внаслідок вибуху по всьому периметру або вона обрушилася всередину резервуара, то навіть за нормативної інтенсивності подавання води на охолодження ненавантажена стінка, як правило, поступово складається всередину резервуара [55-57].

За літературними даними, утворення «карманів» під час пожеж у резервуарах має місце аж у 60 % випадків. Успішне гасіння пожежі в них можливе лише за умови забезпечення подавання вогнегасних речовин (із забезпеченням інтенсивності подавання, що в декілька разів або навіть десятків разів перевищує значення, регламентоване нормативними документами) як на поверхню рідини в резервуарі, так і в зону «кармана», що являє собою надзвичайно складну задачу [58-65].

Пожежі в резервуарах для зберігання нафти і темних нафтопродуктів у багатьох випадках супроводжуються скипаннями і викидами. Викиди нафтопродуктів можуть статися після певного періоду спокійного розвитку пожежі в недостатньо заповненому резервуарі. Під час горіння у верхньому шарі утворюються важкі продукти розкладу нафтопродуктів, що опускаються донизу. Утворюється так звана теплова хвиля, яка в певний момент швидко опускається на дно резервуара, де вона стикається з шаром емульсії води

і нафти. Вода миттєво перетворюється на водяну пару, відбувається збільшення її об'єму приблизно в 2000 разів, в результаті чого палаюча рідина може викидатися на висоту до 10 діаметрів резервуара. Про те, якими наслідками супроводжувалося падіння цієї маси на землю поблизу резервуара під час ряду реальних пожеж, не хочеться навіть писати.

Під час гасіння пожежі в резервуарі шляхом подавання піни на поверхню рідини, нагрітої вище 100 °С, може статися скипання з переливанням рідини, що горить, через борт, і поширення пожежі в межах обвалування або навіть за його межі. Скипання нафтопродуктів також може бути пов'язане з наявністю в нафті (нафтопродукті) води у вигляді дрібних краплин. За даними дослідників, під час скипання різко збільшується температура полум'я (приблизно до 1500 °С), а його висота і потужність теплового потоку збільшуються в 2-4 рази. Скипання може бути багаторазовим, що підтверджується реальними пожежами. Це явище значною мірою ускладнює дії пожежних підрозділів і в багатьох випадках призводить до «зривання» пінних атак. Якщо існує загроза викиду, то доводиться створювати другий рубіж захисту із встановленням пожежних автомобілів на віддалені джерела водопостачання і прокладанням резервних рукавних ліній з підключеними водяними стволами і стволами-генераторами піни [66-72].

Значні ускладнення виникають також під час гасіння пожеж в резервуарах за низьких температур повітря внаслідок замерзання води в пожежних рукавах, трубах, порушення роботи технічних засобів пожежогасіння і т. ін. Середня тривалість гасіння пожежі у резервуарі взимку значно більша, ніж в інші пори року[73-75].

## **1.5. Висновки за розділом**

Аналіз особливостей аварійних ситуацій в резервуарних парках вертикальних сталевих резервуарів за умов пожежі є підґрунтям таких висновків.

1. Розглянуто особливості виникнення пожеж в окремому резервуарі і динаміку розвитку пожежі та її поширення на резервуарний парк;
2. Проаналізовано сучасний стан аналітичних досліджень процесу протікання пожежі і прогріву резервуарів;
3. З'ясовано, що руйнування резервуарів при вибуху іноді супроводжується відривом корпусу від днища і його польотом на значні віддалі;
4. Встановлено, що за період використання резервуарів (близько 140 років) при проектуванні, виготовленні та експлуатації резервуарних парків зовсім не враховується вплив температурних напружень, які виникають в стінці та днищі резервуару за умов пожежі, на їх міцність.

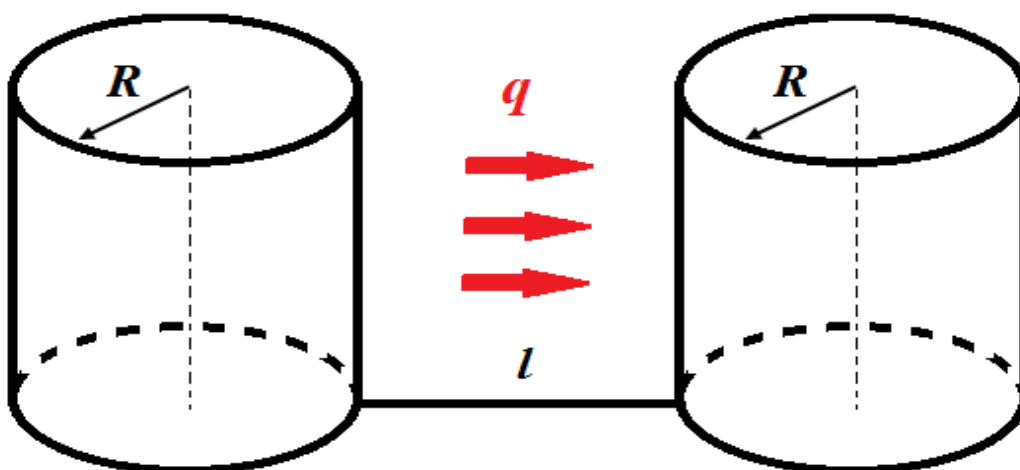
## РОЗДІЛ 2

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЗА УМОВ ГОРІННЯ НАФТОПРОДУКТІВ У РЕЗЕРВУАРАХ

#### 2.1. Теплові потоки між двома резервуарами, один з яких горить

Горіння нафтопродуктів характеризується високим тепловим випроміненням. При горінні рідких вуглеводнів температура може сягати 1300 °С. При пожежі в резервуарному парку можливі різні варіанти розвитку, такі як пожежі в обвалуванні, факельне горіння резервуарів, горіння відкритого резервуару тощо. Кожен з варіантів розвитку пожежі буде характеризуватися різними тепловими потоками.

**Постановка задачі.** Розглянемо пожежу в резервуарному парку. В одній групі, в межах одного обвалування розташовані два резервуари. В наслідок удару блискавки в РВС №2 стався вибух. В наслідок вибуху зірвало покрівлю резервуару та зайнявся нафтопродукт який знаходиться в середині. РВС №1 знаходиться під дією теплового потоку випромінення РВС №2 та конвективних потоків полум'я (рис. 2.1.).



*Рисунок 2.1 – Схематичне зображення процесу нагрівання*

Інтенсивність теплового потоку який поглинається резервуаром визначається за формулою [54]

$$q = \alpha^* (T_2 - T_1) + \varepsilon_{при} \psi \cdot 5,67 \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \quad (2.1)$$

де  $\alpha^*$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ ;  $\varepsilon_{при}$  – приведений ступінь чорноти стінок резервуарів;  $\psi$  – кутовий коефіцієнт випромінення,  $T_1$  – 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 [59]

$$\varepsilon_{при} = \left( \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} \quad (2.2)$$

де  $\varepsilon_1$  – ступінь чорноти полум'я;  $\varepsilon_2$  – ступінь чорноти стінки резервуара 2.

Кутовий коефіцієнт випромінення  $\psi$ , який залежить від радіуса резервуарів  $R$  і віддалі між ними  $l$ , знаходимо за формулою [59]

$$\psi = \frac{1}{\pi} \left( \sqrt{X^2 - 1} + \arcsin \left( \frac{1}{X} \right) - X \right) \quad (2.3)$$

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

За виразом (2.3) проведені дослідження зміни кутового коефіцієнту в залежності від віддалі  $l$  між резервуарами для різних значень радіуса  $R$ . Результати досліджень представлені графічно на рис. 2.2.



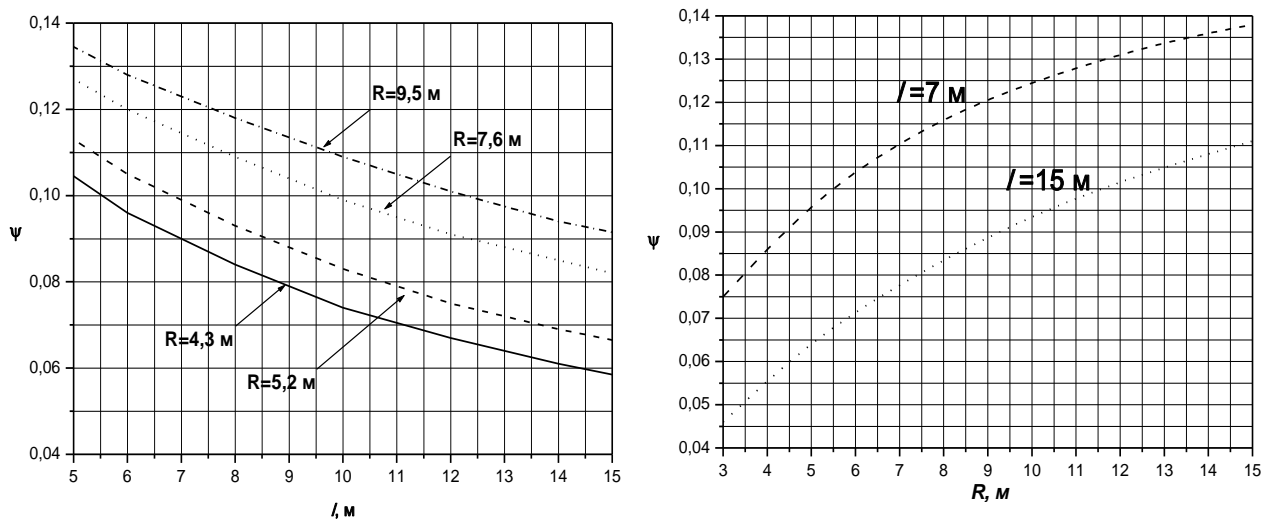


Рисунок 2.2 – Залежність кутового коефіцієнта  $\psi$  від відстані між резервуарами  $l$  та радіуса резервуара  $R$

Радіуси наведені на рисунку відповідають номінальним об'ємам резервуарів (див. табл. 3).

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.

Використовуючи залежність (2.1) з врахуванням виразу (2.3) досліджено зміну величини теплового потоку від температури полум'я, величини кутового коефіцієнту випромінювання і ступеня чорноти, полум'я і стінки резервуару, що нагрівається. Результати досліджень зображені на рис. 2.3.

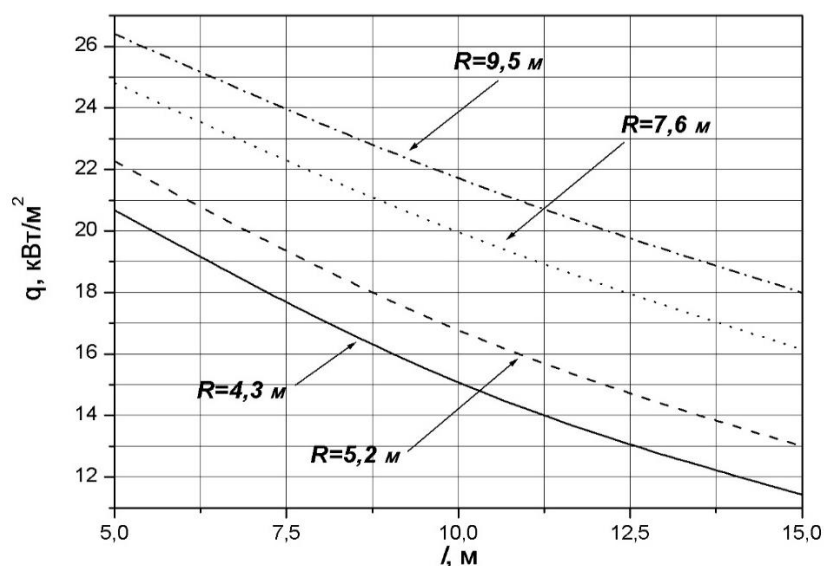


Рисунок 2.3 – Залежність інтенсивності теплового потоку від відстані між резервуарами та радіуса резервуарів.

Аналіз графічних залежностей (рис. 2.3) показує, що для РВС – 1000 ( $R=5,2 \text{ м}$ ) збільшення віддалі  $l$  між резервуарами з 7 до 12 м приводить до зменшення інтенсивності теплового потоку на 24 %. Збільшення радіуса резервуара від 5,2 м до 9,5 м при  $l=7 \text{ м}$  збільшує інтенсивність теплового потоку на 22 %.

Якщо температура полум'я  $T_2=1500 \text{ К}$ , а початкова температура стінки сусіднього резервуара  $T_1=300 \text{ К}$ , то різниця температур в початковий момент пожежі  $T_2-T_1=1200 \text{ К}$ , а при нагріванні з часом сусіднього резервуара до температури  $T_1=1500 \text{ К}$  ця різниця буде дорівнювати нулю. В цей момент резервуари будуть знаходитися в тепловій рівновазі, а інтенсивність теплового потоку  $q=0$ . За формулою (2.1) проведені розрахунки величини теплового потоку залежно від різниці температур стінок резервуарів. Результати досліджень зображені графічно на рис. 2.4.

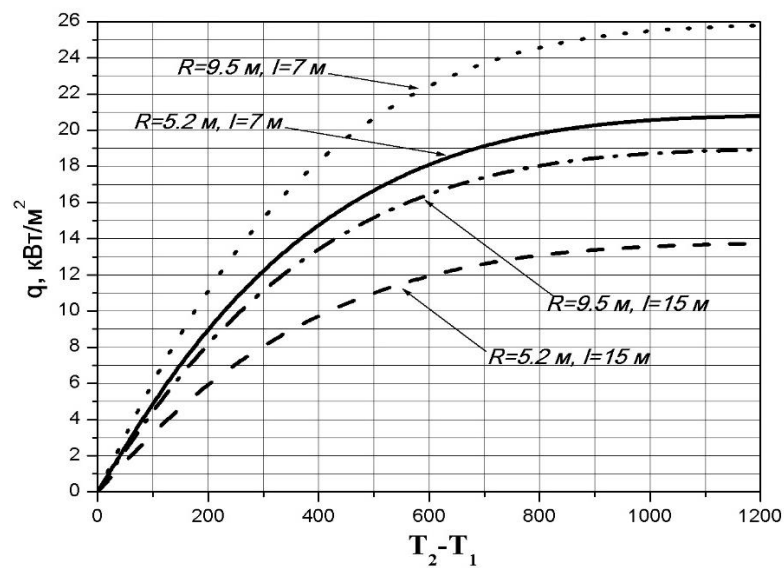


Рисунок 2.4 – Залежність інтенсивності теплового потоку від різниці температур стінок резервуарів

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

при віддалі  $15 \text{ м} - 13 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$ , тобто зменшується на  $17,3 \%$ . Аналіз графічних залежностей показує, що при різниці температур  $T_2 - T_1 = 800 \text{ К}$  і більше, інтенсивність теплового потоку змінюється не більше ніж на  $5 \%$ . При зменшенні різниці  $T_2 - T_1$  від  $800 \text{ К}$  до  $0$ , інтенсивність теплового потоку різко зменшується до нуля.

## 2.2. Теплові потоки в резервуарі з подвійними стінками

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. експлуатується двостінний коаксіальний резервуар РВС об'ємом  $75$  тисяч  $\text{м}^3$ . Діаметр його зовнішньої стінки рівний  $78 \text{ м}$ , а внутрішньої –  $72 \text{ м}$ . Товщина стінки змінюється по висоті від  $2 \text{ см}$  в нижній частині резервуара до  $1 \text{ см}$  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.

**Постановка задачі.** 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  $1$  (рис. 2.5.).

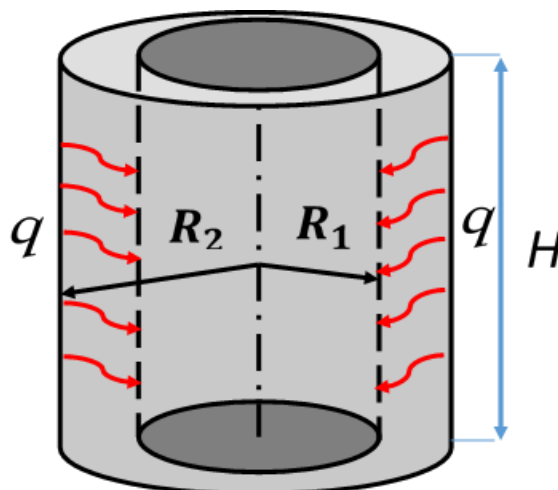


Рисунок 2.5 – Схематичне зображення процесу нагріву

Для даного випадку тепло яке передається за рахунок конвективних потоків полум'я буде відігравати не значну роль. Тому при розрахунку інтенсивності теплового потоку яку сприймає резервуар 1, кількість тепла від конвективних потоків не враховується. Інтенсивність теплового потоку визначається за формулою [59]

$$q = \varepsilon_{\text{при}} \psi \cdot 5,67 \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \quad (2.4)$$

Кутовий коефіцієнт випромінення для двостінних резервуарів визначається за формулою [54]

$$\psi = \frac{1}{R} - \frac{1}{\pi R} \left[ \arccos \left( \frac{B}{A} \right) - \frac{1}{\pi L} \left( \sqrt{(A+2)^2 - (2R)^2} \arccos \left( \frac{B}{R \cdot A} \right) + B \cdot \arcsin \left( \frac{B}{A} \right) - \pi \frac{A}{2} \right) \right] \quad (2.5)$$

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

Графічна залежність  $\psi$  від радіусів  $R_1$  і  $R_2$  показана на рис. 2.6.

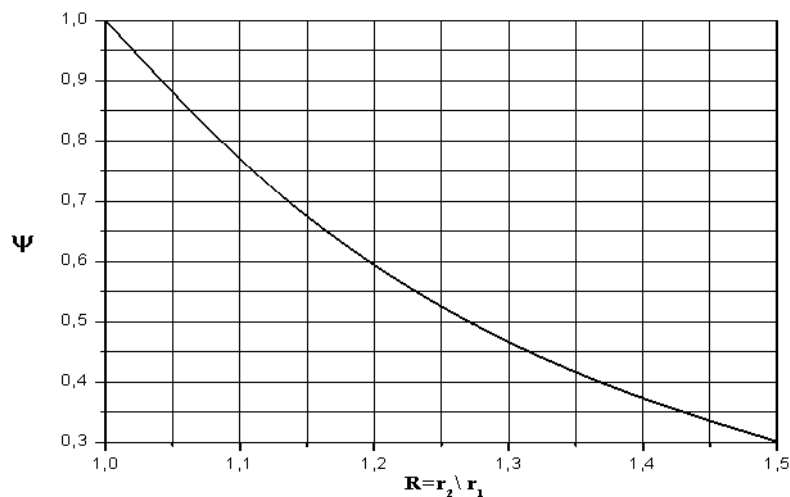
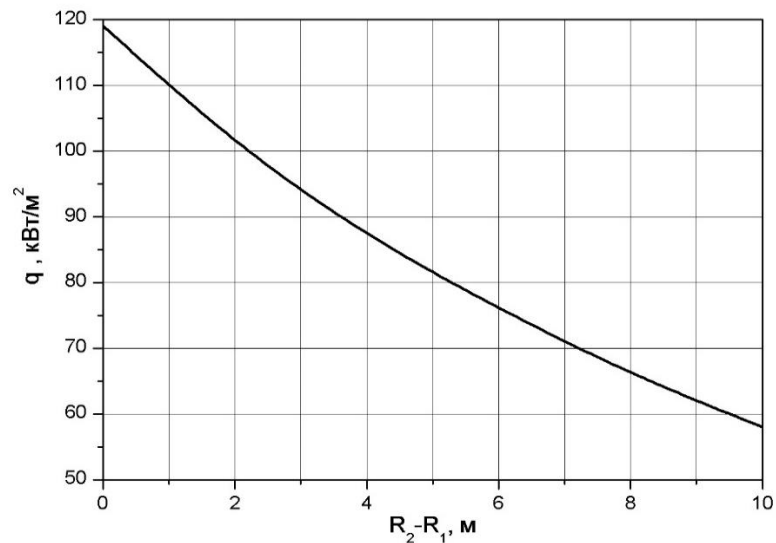


Рисунок 2.6 – Залежність кутового коефіцієнту  $\psi$  від відношення радіусів зовнішнього та внутрішнього резервуарів

Аналіз графічної залежності показує, що при збільшенні відношення радіусів  $R_2/R_1$  від 1,05 до 1,22 кутовий коефіцієнт зменшується на 36 %.

Для знаходження інтенсивності теплового потоку використано рівняння (2.4) з врахуванням виразу (2.5). Результати досліджень представлені графічно на рис. 2.7



*Рисунок 2.7 – Залежність інтенсивності теплового потоку від різниці радіусів двостінного резервуара*

Аналіз графічної залежності (рис. 2.7) показує, що при збільшенні різниці радіусів  $R_2 - R_1$  від 1 м до 6 м, інтенсивність теплового потоку зменшується на 31 %.

В процесі розвитку пожежі зовнішня поверхня внутрішнього резервуара буде нагріватися і значення температури  $T_1$  буде збільшуватися, а тепловий потік у виразі буде зменшуватися. В момент коли температура  $T_1$  досягне температури  $T_2$ , інтенсивність теплового потоку буде рівна нулю. Резервуари будуть знаходитися у тепловій рівновазі (рис. 2.8).

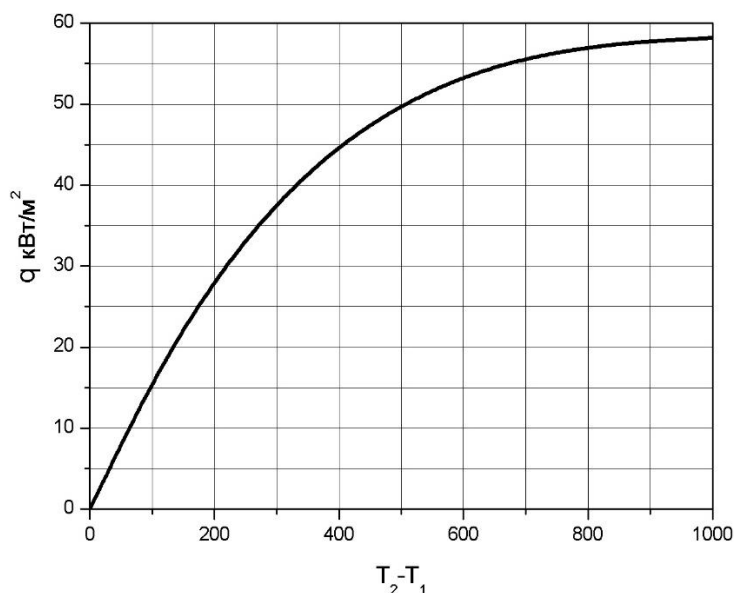


Рисунок 2.8 – Залежність інтенсивності теплового потоку від різниці температур стінок коаксіального резервуара.

Аналіз графічної залежності (рис. 2.8) показує, що зменшення різниці  $T_2 - T_1$  від 500 К до нуля інтенсивність теплового потоку різко спадає до нуля.

### 2.3. Теплові потоки між резервуаром і будівлею

Розглянемо вплив теплового випромінювання від полум'я пожежі на несучі стіни будівель, які розташовані на території резервуарного парку. До таких будівель можуть належати адміністративний корпус, лабораторія, автомобільний гараж, пожежне депо тощо.

Аналіз досліджень резервуарних парках свідчить, що факел полум'я при горінні нафтопродуктів можна описати у вигляді циліндричної теплової колонки.

Під час дослідження факел полум'я, що утворюється в результаті горіння нафтопродуктів, змодельюємо циліндричною колонкою, яка характеризує об'ємне випромінювання факела пожежі (рис. 2.9) [54].

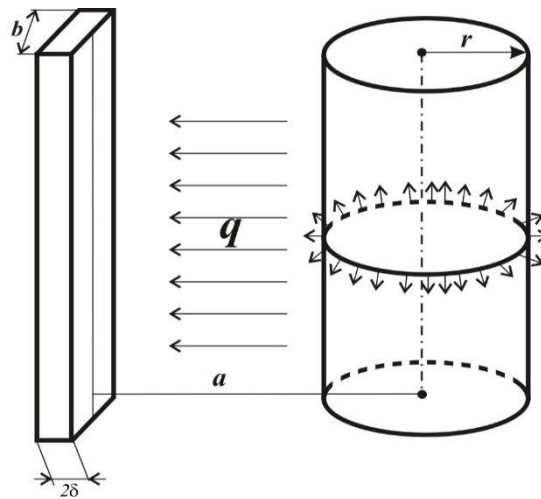


Рисунок 2.9 – Просторове зображення розташування стінки будівлі відносно факела пожежі

При дослідженні прийнято, що теплообмін здійснюється в середовищі з вологістю повітря від 0 до 100%, для усієї системи “полум’я-конструкція” справедливі закони Стефана-Больцмана і Ламберта.

Радіаційний тепловий потік випромінювання факела, який поглинається конструкцією, визначимо за формулою

$$q = 5,67 \cdot \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \cdot \varepsilon_{1-2} \cdot \psi_{1-2}, \quad (2.6)$$

де  $\varepsilon_{1-2} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}$  – зведений ступінь чорноти системи “полум’я-конструкція”;  $\varepsilon_1$  – ступінь чорноти поверхні плоскої конструкції;  $\varepsilon_2$  – ступінь чорноти факела полум’я;  $\psi_{1-2}$  – кутовий коефіцієнт випромінювання;  $T_1$  – температура поверхні конструкції,  $K$ ;  $T_2$  – температура факела,  $K$ .

Для дослідження кутових коефіцієнтів випромінювання розглянемо два випадки розміщення конструкції відносно факела пожежі:

1. Кутовий коефіцієнт випромінювання між факелом полум’я і симетрично розташованою конструкцією (рис. 2.10 а) визначається із залежності

$$\psi_{1-2} = \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{b}{2 \cdot a}, \quad (2.7)$$

де  $b$  – ширина конструкції, м.

2. Кутовий коефіцієнт випромінювання між факелом полум'я і несиметрично розташованою конструкцією (рис. 2.10 б) рівний

$$\psi_{1-2} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left( \operatorname{arctg} \frac{b+c}{a} - \operatorname{arctg} \frac{c}{a} \right), \quad (2.8)$$

де  $c$  – зміщення конструкції відносно факела, м.

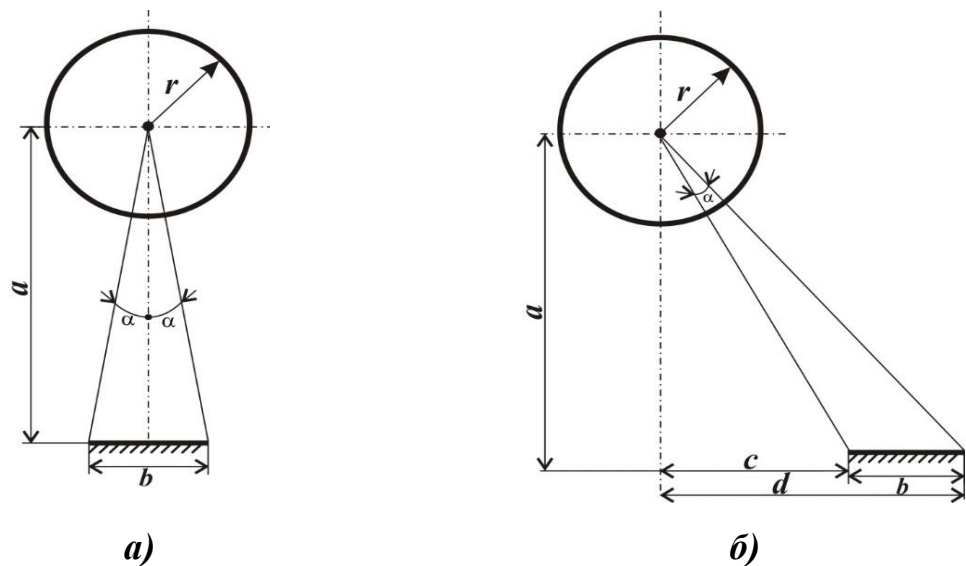


Рисунок 2.10 – Схематичне зображення симетричного (а) і несиметричного (б) розташування конструкції відносно факела пожежі

За формулами (2.5) – (2.8) виконані розрахунки величини кутового коефіцієнта випромінювання  $\psi_{1-2}$  і теплового потоку  $q$  залежно від відстані  $a$ ) взаємного розташування факела відносно конструкції і величин температур  $T_1$  і  $T_2$ .

Отримані результати чисельного експерименту дослідження залежності величини кутового коефіцієнта випромінювання від відстані між полум'ям і конструкцією для симетричного і несиметричного розташування представлені графічно на рис. 2.11.



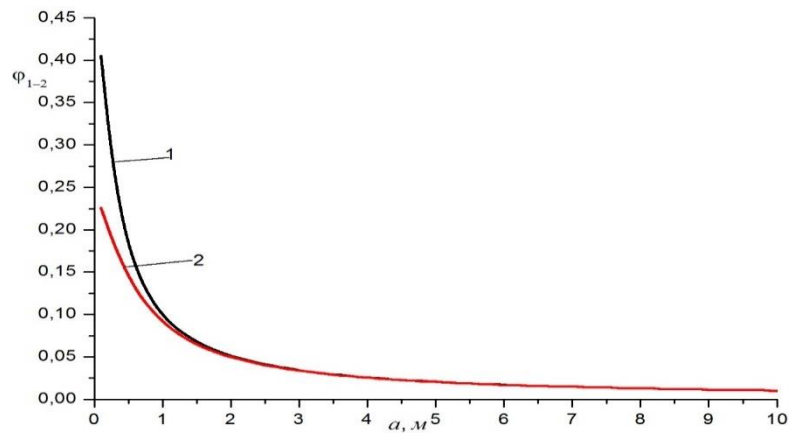
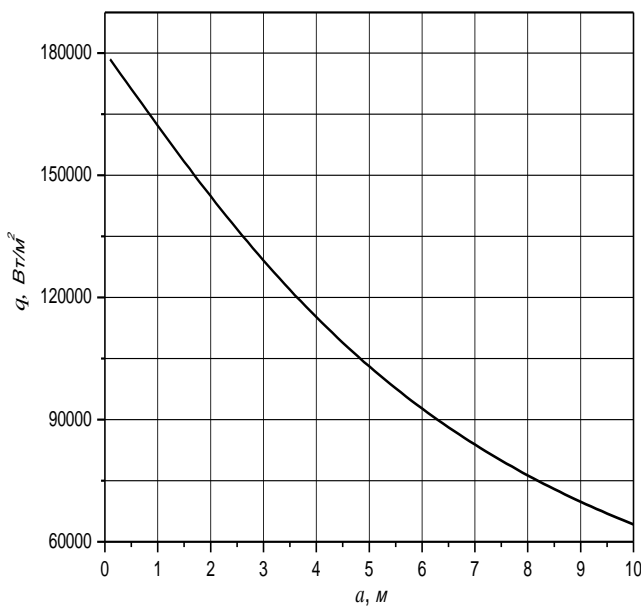
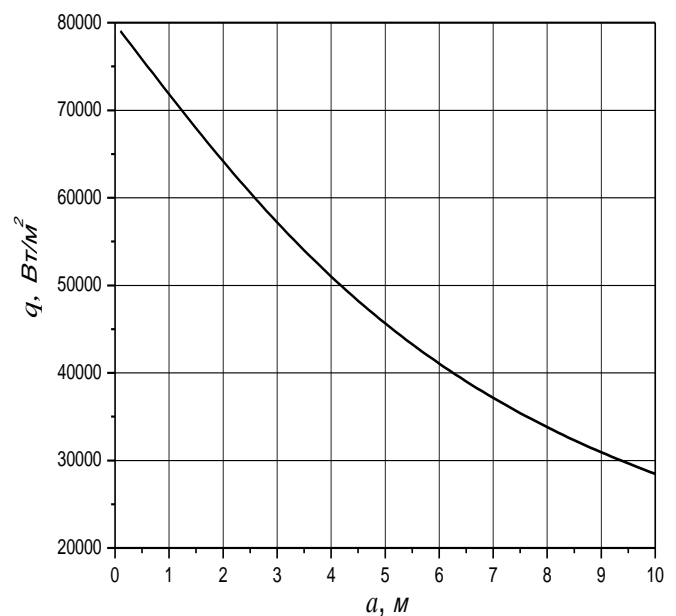


Рисунок 2.11 – Залежність величини кутового коефіцієнта випромінювання від відстані між полум'ям і конструкцією для симетричного (1) і несиметричного (2) розташування

На рис. 2.11 відображено залежність величини кутового коефіцієнта випромінювання від відстані між факелом полум'я і конструкцією. Криві 1 і 2 показують, що при симетричному розташуванні конструкції і факела величина коефіцієнта різко зменшується із збільшенням відстані між ними.



а)



б)

Рисунок 2.12 – Залежність величини теплового потоку полум'я від відстані до конструкції

Аналіз графічних залежностей представлених на рис. 2.12 показує, що величина теплового потоку, який поглинається симетрично розташованою конструкцією більша у 2 рази ніж конструкцією розташованою не симетрично. З графіків видно, що для обох конструкцій при збільшенні відстані, інтенсивність теплового потоку зменшується.

#### 2.4. Теплові потоки в замкнутому просторі резервуару

В даному розділі досліджено вплив теплового потоку, при горінні вертикальних сталевих резервуарів, на нагрів нафтопродуктів які зберігаються у резервуарі, який нагрівається внаслідок зовнішньої пожежі. Коли виникає пожежа в одному із резервуарів, заповненого рідкими вуглеводнями, то сусідній резервуар буде нагріватися від полум'я пожежі [54, 76-79].

При розв'язанні даної задачі було розглянуто дві схеми: *а)* теплове випромінення від бічних стінок резервуара; *б)* теплове випромінення від стаціонарної покрівлі резервуара (рис 2.13)

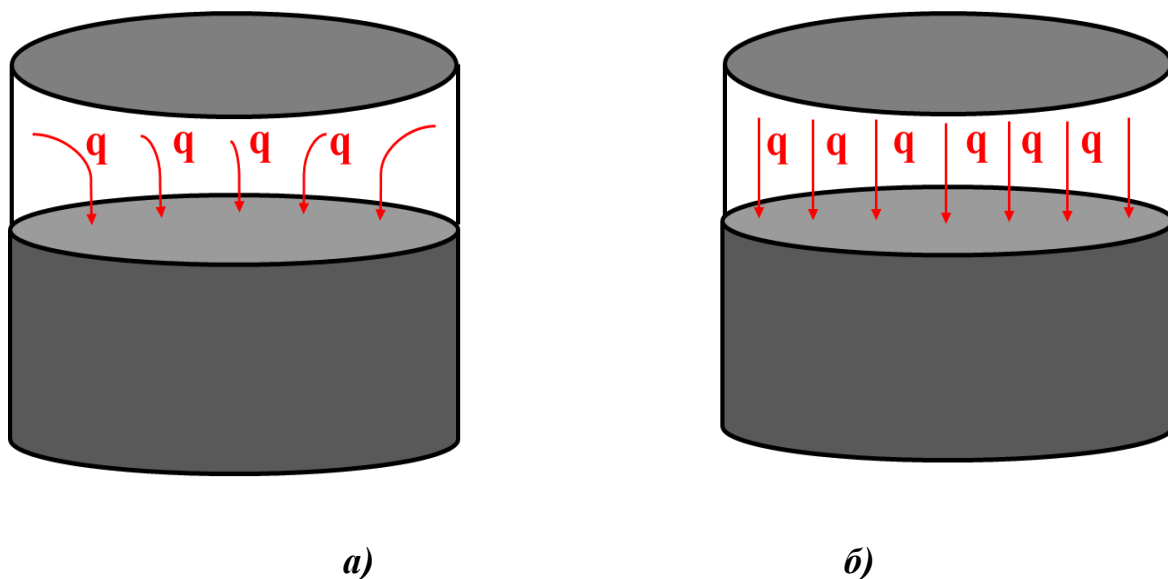


Рисунок 2.13 – Схематичне зображення теплових потоків які діють на нафтопродукт в середині резервуару від: *а)* – бокових стінок; *б)* - покрівлі

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

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

$$q = q_{\delta} + q_n \quad (2.9)$$

де  $q_{\delta}$  - інтенсивність теплового потоку яку випромінюють бічні стінки резервуару (**a**),  $Bm / m^2$ ;  $q_n$  - інтенсивність теплового потоку яку випромінює покрівля резервуару (**б**),  $Bm / m^2$ .

Для знаходження інтенсивності теплового потоку потрібно визначити кутовий коефіцієнт випромінення для **a**)

$$\psi = \frac{X^2 + 0,5}{\sqrt{X^2 - 1}} - X, \quad (2.10)$$

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

і **б**)

$$\psi = 0,5 \left( X - \sqrt{X^2 - 4 \left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2} \right), \quad (2.11)$$

$r_1 = \frac{R_1}{h}$ ;  $r_2 = \frac{R_2}{h}$ ;  $X = \frac{1+r_2^2}{r_1^2} + 1$ ;  $h$  - 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.

Використовуючи рівняння (2.10) і (2.11) знайдено кутовий коефіцієнт для обох схем. Результати досліджень представлені графічно на рисунку

Аналіз графічних залежностей (рис. 2.14) показує, що із збільшенням віддалі між покрівлею і дзеркалом нафтопродукту кутовий коефіцієнт зменшується.

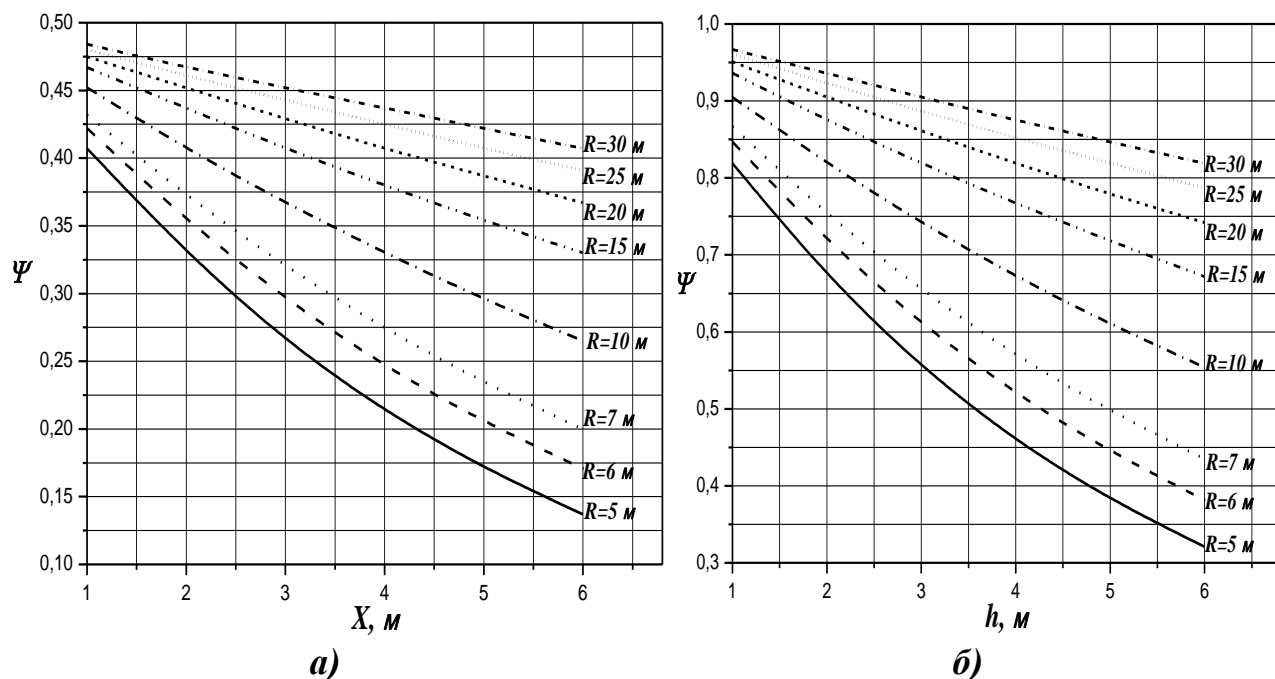


Рисунок 2.14 – Залежність кутового коефіцієнту випромінювання від величини  $X$  та  $h$  відповідно, для різних радіусів РВС

Використовуючи вираз (2.9) з врахуванням виразу (2.10) для **a)** і (2.11) для **б)** досліджено зміну інтенсивності теплового потоку. При розрахунку приймалися такі вихідні данні: температура внутрішньої стінки резервуара, що нагрівається внаслідок зовнішньої пожежі  $T_2=823$  К, температура дзеркала нафтопродукту, що нагрівається від теплового потоку  $T_1=300$  К. Ступінь чорноти стінки резервуара  $\varepsilon_1=0,76$ , а дзеркала нафтопродукту -  $\varepsilon_2=0,95$ . Результати досліджень зображені графічно на рис. 2.15

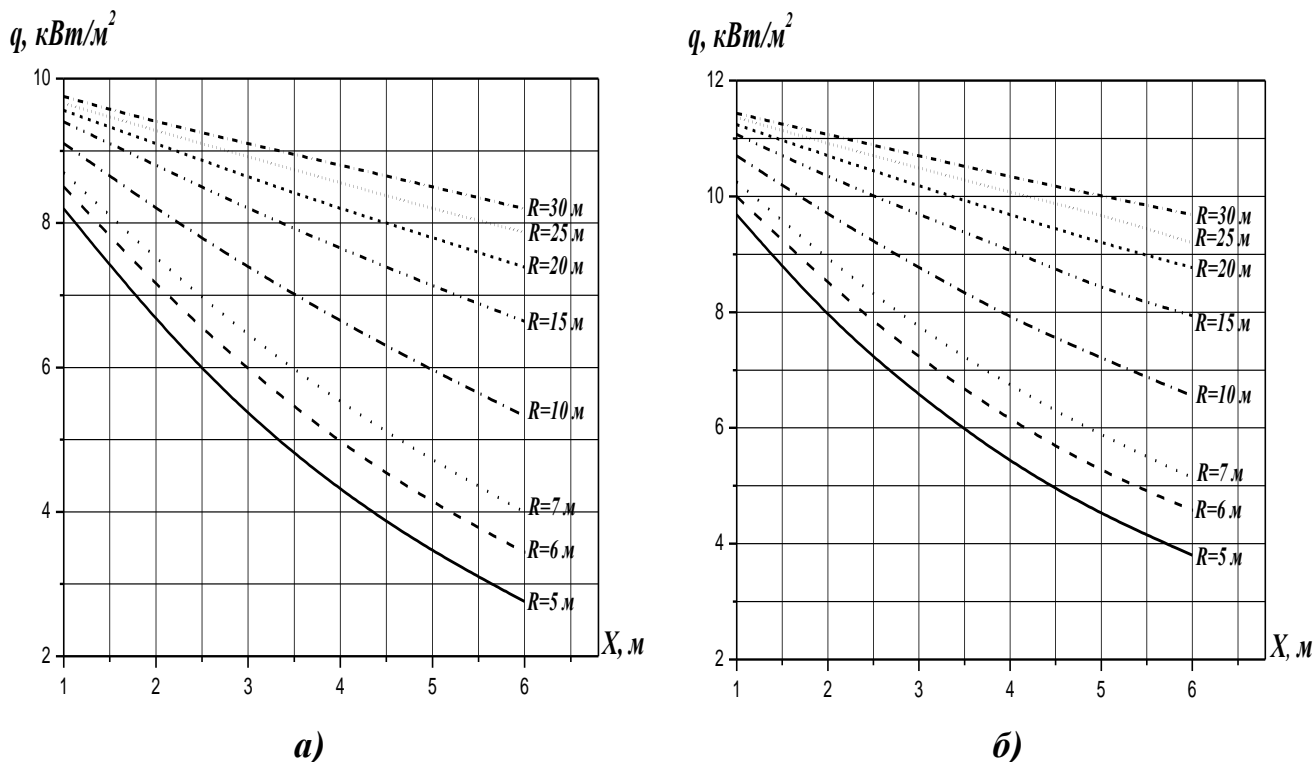


Рисунок 2.15 – Залежність інтенсивності теплового потоку від: **а)** висоти нагрітої бічної стінки; **б)** відстані нагрітої покрівлі резервуара до дзеркала нафтопродукту, при фіксованих радіусах резервуарів

Аналіз графічних залежностей (рис. 2.15) показує, що при збільшенні величини  $X$  і  $h$  інтенсивність теплового потоку зменшується. При збільшенні радіуса  $R$  інтенсивність теплового потоку збільшується.

## 2.5. Висновки за розділом.

Теплові потоки, зумовлені полум'ям пожежі, при попаданні на стінки і покрівлю сусідніх резервуарів, а також на дзеркало нафтопродукту нагрівають їх. Інтенсивність теплових потоків залежить від багатьох параметрів: температури полум'я, часу вогневого впливу, віддалі між резервуарами, геометричних розмірів тощо. За одержаними результатами можна зробити висновки:

1. Розроблена методика визначення інтенсивності теплових потоків між двома резервуарами в залежності від віддалі між резервуарами і їхніми радіусами.

2. Розроблена методика визначення інтенсивності теплового потоку між зовнішньою і внутрішньою стінками двостінного резервуара в залежності від віддалі між стінками та різниці їх температур.
3. Одержана аналітична залежність величини теплового потоку, який падає на стінки будівель, від полум'я резервуара, що горить.

Одержані в другому розділі аналітичні вирази для знаходження інтенсивності теплових потоків використовуються в третьому розділі для знаходження температурних полів в стінці сусіднього резервуару, стінці будівлі та по глибині нафтопродукту.

### РОЗДІЛ 3

## ВИЗНАЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ЗА УМОВ ГОРІННЯ СУСІДНЬОГО РЕЗЕРВУАРА

### 3.1. Температурне поле в стінці резервуару при дії теплового потоку

У другому розділі за рівнянням (2.1) розраховано кількість тепла, яке поглинатиме стінка резервуара при пожежі в резервуарному парку. Вся тепла енергія, яку поглинає стінка резервуара, піде на збільшення температури стінки. Оскільки у другому розділі розраховано інтенсивність теплового потоку, яку сприймають стінки резервуара і нафтопродукт, що зберігається в ньому, то для розрахунку температурного поля раціонально скористатися граничними умовами другого роду. Для розрахунку температурного поля за граничними умовами другого роду повинні бути задані такі величини як: інтенсивність теплового випромінювання –  $q$ , коефіцієнт теплопровідності тіла –  $\lambda$ . Розрахунок інтенсивності теплового випромінювання представлений вище (розділ 2), а коефіцієнт теплопровідності –  $\lambda$  визначається за табл. 4 – для стінок РВС і за виразом (3.16) – для нафтопродуктів.

#### Постановка задачі [102].

При відомих значення теплового потоку полум'я пожежі (2.1) знайдемо нестационарне температурне поле по товщині стінки резервуару. Температурне поле знаходиться з розв'язку диференціального рівняння теплопровідності [60].

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad (3.1)$$

з початковою умовою

$$t(r, 0) = t_0, \quad (3.2)$$

та граничною умовою другого роду

$$-\lambda \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} + q(t) = 0, \quad (3.3)$$

де  $t_0$  – початкова температура резервуара, °C.

Розв'язок задачі (3.1) – (3.3) знайдено з використанням перетворень Лапласа [60]

$$t(r, \tau) = \frac{q}{\lambda} R_2 \left\{ \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left[ 2Fo - \frac{1}{4} \left( 1 - 2 \frac{R^2}{R_2^2} \right) - \frac{R_1^2}{R_2^2} \left( \ln \frac{r}{R_1} + \frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{3}{4} \right) \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi}{\mu_n} \frac{J_1 \left( \mu_n \frac{R_1}{R_2} \right) J_1(\mu_n)}{J_1^2 \left( \mu_n \frac{R_1}{R_2} \right) - J_1^2(\mu_n)} \left[ J_0 \left( \mu_n \frac{r}{R_2} \right) Y_1 \left( \mu_n \frac{R_1}{R_2} \right) - Y_0 \left( \mu_n \frac{r}{R_2} \right) \times J_1 \left( \mu_n \frac{R_1}{R_2} \right) \right] \right\} e^{(-\mu_n^2 Fo)}, \quad (3.4)$$

де  $J_i, Y_i$  - функції Бесселя першого і другого роду порядку 0 і 1 відповідно;

$Fo = a\tau/R_2^2$  – критерій Фур'є;

$a = \lambda/C_p \rho$  – коефіцієнт теплопровідності,  $m^2/c$ ;

$C_p$  – теплоємність,  $Дж/кг \cdot K$ ;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності сталевих резервуарів,  $Вт/м \cdot K$ ;

$\mu_n$  – корені характеристичного рівняння

$$J_1 \left( \mu \frac{R_1}{R_2} \right) Y_1(\mu) = Y_1 \left( \mu \frac{R_1}{R_2} \right) J_1(\mu) \quad (3.5)$$

За виразом (3.4) проведено розрахунок температурного поля по товщині сухої стінки РВС – 1000. Суха стінка резервуара, це стінка, яка не омивається нафтопродуктом, тобто верхні пояси резервуара. Часто резервуари наповнюють до половини його номінального об'єму. В таких випадках висота сухої стінки буде сягати 6 м і більше. Відповідно до нормативної документації номінальний радіус резервуара РВС – 1000 рівний  $R=5,22$  м, а товщина сталевих поясів, з яких



складається стінка резервуара, рівна 5 мм. Результати представлені графічно (рис. 3.1).

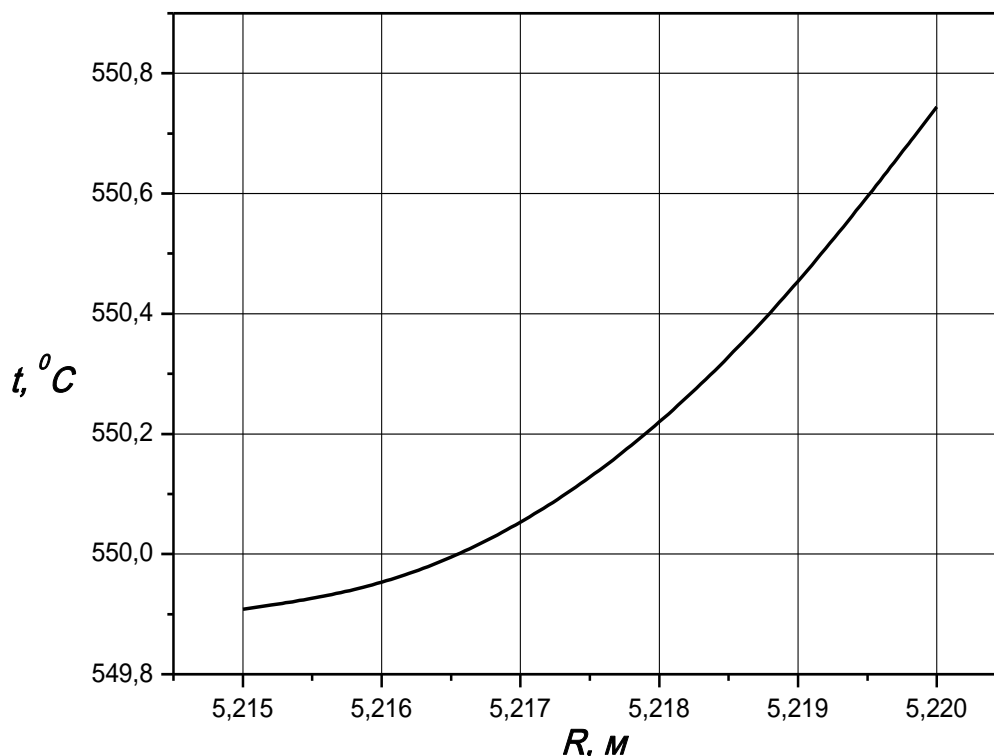


Рисунок 3.1 – Розподіл температури по товщині стінки РВС – 1000

З графічної залежності видно, що різниця температур на зовнішній і внутрішній поверхнях стінки РВС – 1000 є незначною. Різниця становить не більше  $0,9$  °C. Це зумовлене високим коефіцієнтом теплопровідності металу з якого виготовлений РВС. При розрахунках приймалось, що резервуар виготовлений з сталі марки Ст3, коефіцієнт теплопровідності якої коливається в межах  $37 - 57 \frac{Вт}{м \cdot К}$ , в залежності від температури. Оскільки різниця температур на зовнішній та внутрішній поверхнях стінки не перевищує одного градуса, можна прийняти, що середня температура стінки  $550$  °C.

Всі матеріали змінюють свої термофізичні параметри при зміні температури. Сталі з яких виготовляються резервуари не виключення. При розрахунку температурного поля стінок РВС враховано зміну теплофізичних характеристик металу (див. табл. 5) [47, 112].

## Теплофізичні характеристики сталевих резервуарів

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

Визначивши температурний розподіл проведено дослідження прогріву стінки резервуару до критичної температури  $550\text{ }^\circ\text{C}$  при змінних параметрах. Тобто визначено за який час верхні пояси резервуарів, які не омиваються нафтопродуктом прогріються до критичної температури. Результати представлені графічно (рис. 3.2)

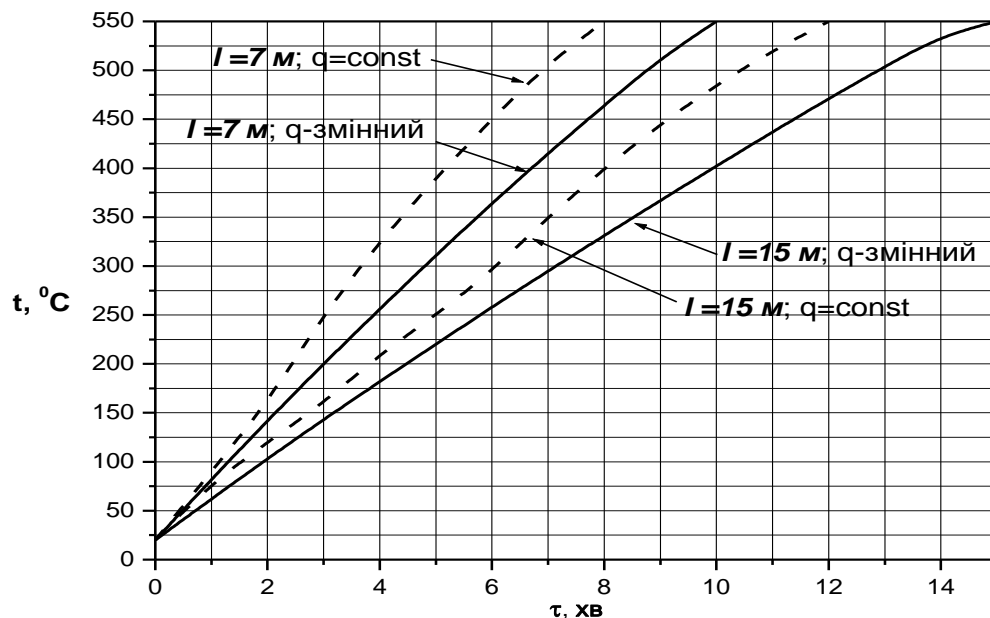


Рисунок 3.2 – Зміна температури стінки РВС - 1000, з часом при різних відстанях між резервуарами.

Аналіз рисунку показує, що при віддалі між резервуарами  $7\text{ м}$ , стінка резервуару РВС – 1000 нагрівається до критичної температури  $550\text{ }^\circ\text{C}$  за  $10$

*хвилин* при змінному в часі тепловому потоці, а при постійному – за *8 хвилин*. Якщо віддаль між резервуарами рівна *15 м* то критична температура досягається за *15 хвилин* при змінному потоці, а при постійному – за *12 хвилин*.

### 3.2. Температурне поле в резервуарі з подвійною стінкою [97]

Більш безпечними при експлуатації, з точки зору пожежної безпеки, є двостінні резервуари (рис. 3.3) [90-93]. У двостінних резервуарів є ряд переваг над одностінними, а саме:

- Наявність зовнішньої стінки дає можливість обмежити розтікання нафтопродукту при аварії або руйнації резервуару;
- Зовнішня стінка обмежує площу пожежі, чим не дає їй поширюватися на сусідні об'єкти.
- При експлуатації таких резервуарів не потрібно облаштовувати обвалування;
- Менша площа резервуарного парку;
- Можливість використання в прибережних зонах і на воді.

Проте у двостінних резервуарів є і ряд недоліків:

- Великі затрати при будівництві;
- Складність при будівнанні і монтуванні плаваючої покрівлі.



*а)*



*б)*

*Рисунок 3.3 – а) двостінний резервуар на стадії будівництва; б) двостінний резервуар з номінальним об'ємом 40 тис. м<sup>3</sup>*

З метою дослідження часу за який температура стінки двостінного резервуару прогріється до критичної –  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  розв’язано задачу (3.1) – (3.5). Розв’язок представлений графічно (рис. 3.4).

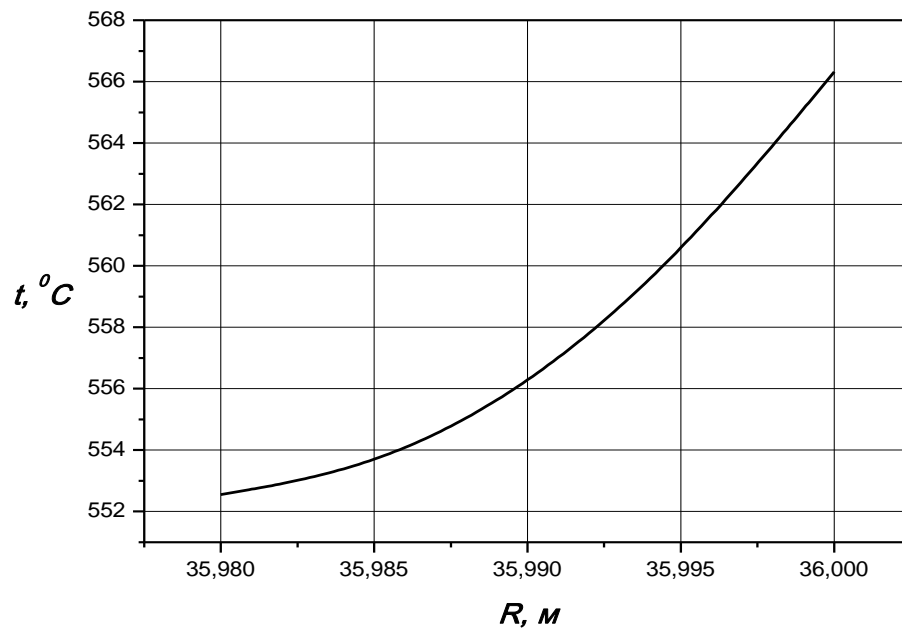


Рисунок 3.4 – Розподіл температури по товщині стінки коаксіального резервуару радіусом 36 м

Аналіз рисунку показує, що різниця температур між зовнішньою і внутрішньою поверхнями стінки не перевищує  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Якщо розглянути результати аналогічних розрахунків для РВС – 1000 (див. рис. 3.1), то можна побачити, що різниця температури між зовнішньою і внутрішньою поверхнями стінки не перевищувала  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що у  $15$  разів менше ніж у двостінного. Це пояснюється тим, що стінка двостінного резервуару має товщину  $2\text{ см}$ , що у свою чергу у  $4$  рази більше ніж товщина стінки РВС – 1000.

Однією із причин такого швидкого прогрівання сталевих конструкцій є великий коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$  і малий теплоємності  $C_p$ ,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\cdot\text{К}$ , що веде до зростання коефіцієнта температуропровідності  $a = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho}$ ,  $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ , що характеризує швидкість розповсюдження тепла усередині конструкції. За таких значень теплопровідності величина градієнта температури по товщині

стілки резервуара є незначною і зумовлює швидке нагрівання всієї конструкції. З огляду на це при розрахунку температурного поля внутрішньої стінки двостінного резервуару який нагрівається було враховано зміну теплофізичних параметрів, в залежності від температури відповідно до таблиці 4.

Результати дослідження температурного поля по товщині стінки, дали можливість розрахувати час за який суха стінка двостінного резервуару прогріється до критичної температури. Розрахунок проводився для різних температур випромінення  $T_2$ . Результати представлені графічно на рис. 3.5.

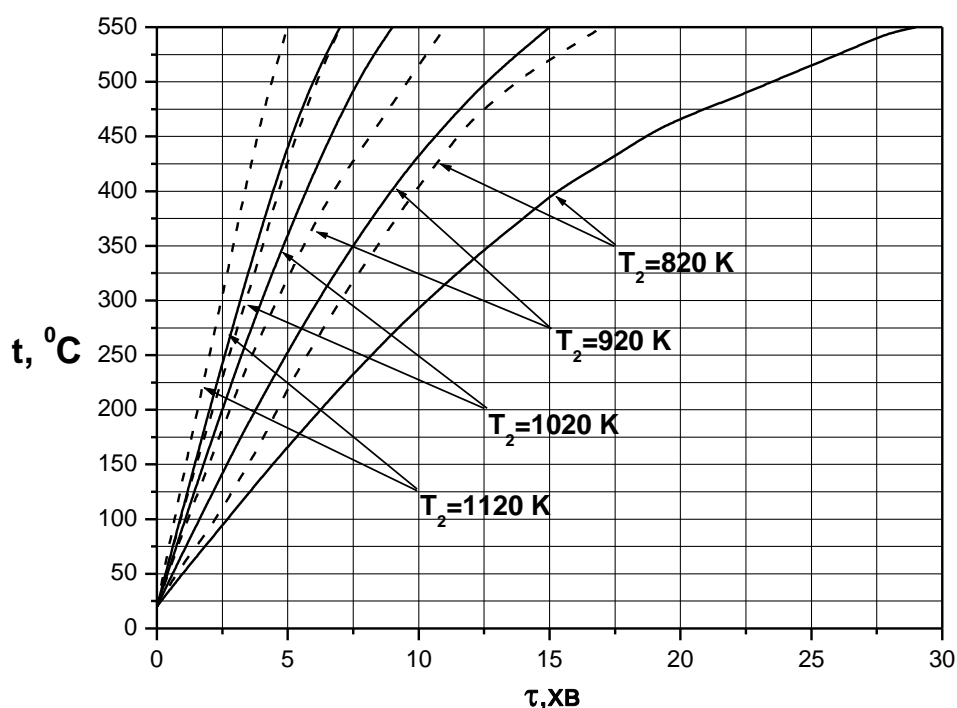


Рисунок 3.5 – Залежність температури внутрішньої стінки двостінного резервуара від, часу при різній температурі зовнішньої стінки резервуара

На рисунку 3.5 суцільними лініями показано зміну температури при змінному тепловому потоці в часі, а штриховими – при постійному тепловому потоці. При постійному потоці час нагріву стінки резервуара до критичної температури практично на 60 % менший ніж при змінному тепловому потоці в часі.

З виразу (3.4) видно, що температура  $t$  прямопропорційно залежить від інтенсивності теплового випромінення  $q$ . В свою чергу  $q$  залежить від температури тіла яке випромінює тепло і від температури тіла яке нагрівається. З плином часу температура тіла яке нагрівається (в нашому випадку резервуар №1 – для пункту 2.1 і внутрішня стінка двостінного резервуару – для пункту 2.2) буде збільшуватися. Відповідно інтенсивність теплового потоку буде зменшуватися, оскільки різниця температур  $T_2 - T_1$  буде зменшуватися і спадати до нуля (див. рис. 2.4 і рис. 2.8). За виразом (3.4) можна визначити розподіл температури по товщині стінки в будь який момент часу. Для того щоб врахувати зміну теплового потоку в часі необхідно скористатися покроковим методом. Тобто розрахувати температурне поле на момент часу  $\tau$ . Результатом обчислень буде температурне поле стінки  $t(x, \tau)$  резервуару в момент часу  $\tau$ . Наступним кроком буде ще один розрахунок температурного поля за той самий час  $\tau$ , але початкова температура буде рівна  $t_0 = t(x, \tau)$ , і так далі. При розрахунках представлених на рис. 3.2 і рис. 3.6 крок  $\Delta\tau$  прийнято рівним 100 с, оскільки при багаторазових розрахунках встановлено, що похибка в результатах при  $\Delta\tau = 100\text{с}$  і  $\Delta\tau = 50\text{с}$  становить всього 3%. При зменшенні кроку  $\Delta\tau$  похибка буде зменшуватися, але для даних розрахунків похибка в 3% є допустимою. При використанні даної моделі для розрахунку інших конструкцій похибка може відрізнятись, тому похибку  $\Delta\tau$  потрібно встановлювати індивідуально для кожної моделі.

### **3.3. Температурне поле в стінці будівлі, зумовлене тепловим потоком пожежі в резервуарі [99]**

У підрозділі 2.3 були визначені величини теплових потоків за умов пожежі. Дослідимо вплив цих потоків на температурні поля будівель і споруд які виконані із кам'яних матеріалів, які можуть знаходитися поблизу резервуарного парку.

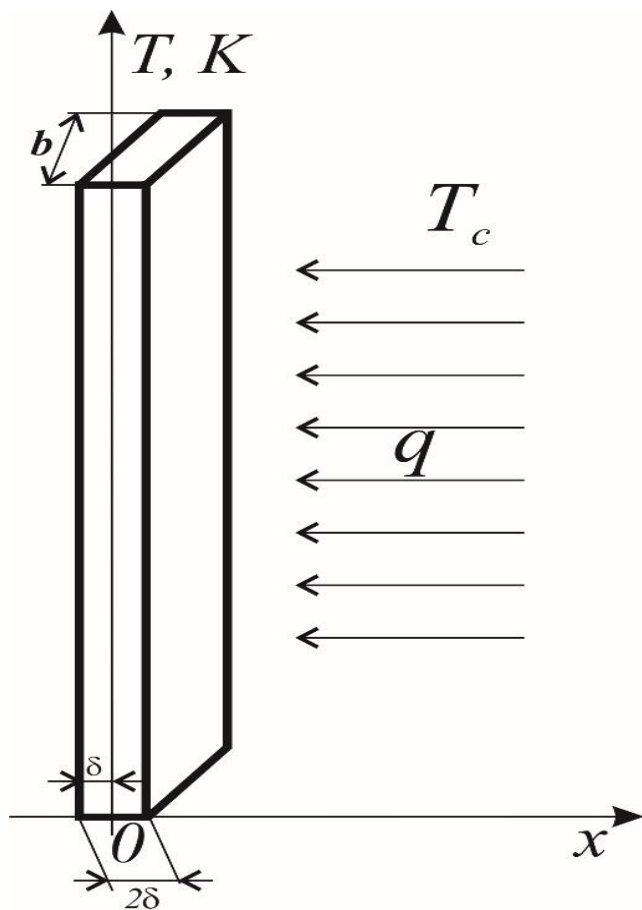


Рисунок 3.6 – Схематичне зображення плоскої конструкції

При дослідженні температури несучої стінки будівлі, змодельємо її як пластину з приведеною товщиною  $2\delta$  (рис. 3.6), температура якої дорівнює  $t_0$ . З деякого часу, який приймемо за початок відліку  $\tau = 0$ , конструкція нагрівається тепловим потоком  $q$  [105]. Необхідно визначити розподіл температури по товщині конструкції в будь-який момент часу.

Початок координат системи  $xOt$  розмістимо в середній площині пластини. Вісь  $x$  лежить у площині перерізу пластини і перпендикулярна до площини стінки.

Для визначення температурного поля по товщині конструкції розв'язано диференціальне рівняння теплопровідності [60]

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (\tau > 0; -\delta < x < +\delta), \quad (3.6)$$

При крайових умовах

$$-\frac{\partial t(\delta, \tau)}{\partial x} + \frac{q}{\lambda} = 0, \quad (3.7)$$

$$t(x, 0) = t_0 = const, \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (3.9)$$

де  $t(x, \tau)$  – нестационарна температура в поперечному перерізі пластини, °C;

$\pm \delta$  – бокові поверхні пластини;

$q$  – тепловий потік, що поглинається поверхнею конструкції  $x = \delta$ , Вт/м<sup>2</sup>;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;

$t_0$  – початкова температура конструкції, °C.

Застосувавши перетворення Лапласа, отримуємо рішення задачі у вигляді [58]

$$t(x, \tau) - t_0 = \frac{q}{\lambda} \left[ \frac{a\tau}{\delta} - \frac{\delta^2 - 3x^2}{6\delta} + \delta \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^2} \cos \mu_n \frac{x}{\delta} \exp(-\mu_n^2 Fo) \right], \quad (3.10)$$

де  $\mu_n = n\pi$  – характеристичні числа,  $n = 1, 2, \dots$

За формулою (3.10) проведені дослідження розподілу температурного поля по товщині бетонної стінки – **а**) і цегляної стінки – **б**). При розрахунках враховані : початкова температура конструкції  $t_0 = 20$  °C. Дослідження проводились для температури факела  $T_2 = 1600$  K (горіння рідких вуглеводнів - нафтопродуктів. Тепловий потік, який поглинався несучими стінками будівель при симетричному та несиметричному розташуванні конструкції відносно факела пожежі, коливався в межах від 2,3 до 3 кВт/м<sup>2</sup>. Результати розрахунку зображені графічно на рис. 3.7.



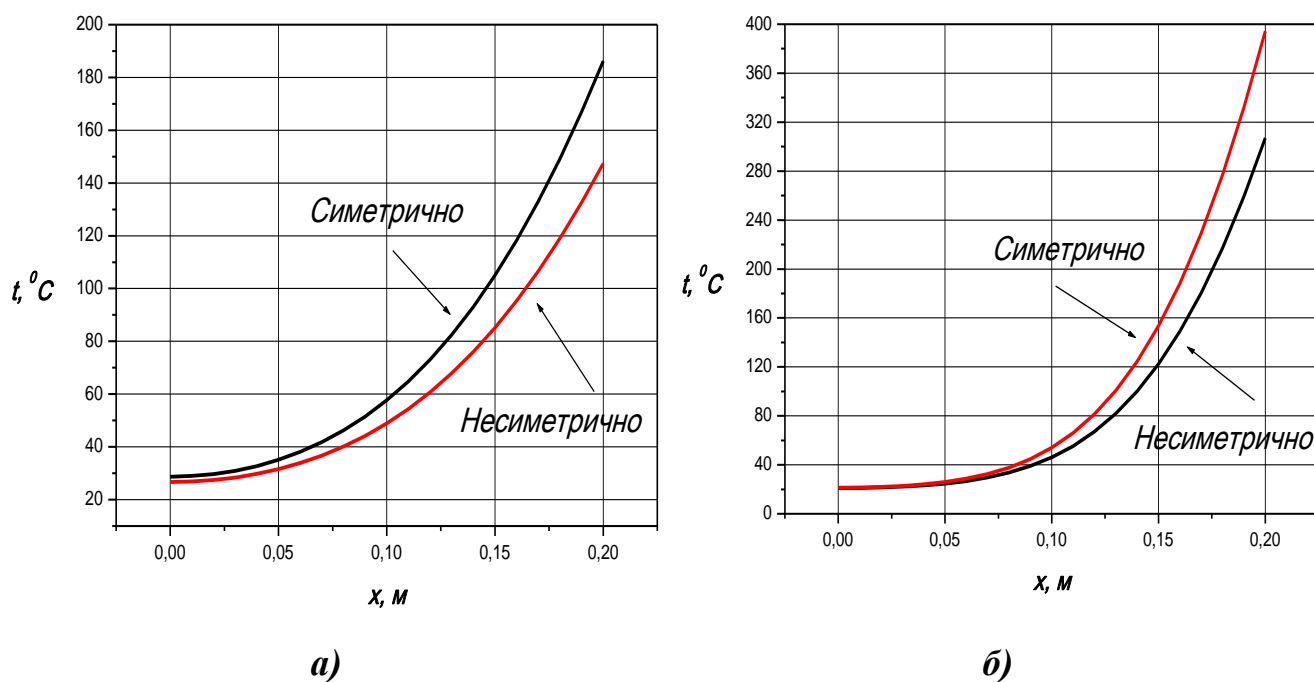


Рисунок 3.7 – температурне поле а) – бетонної і б) – цегляної стінки при відстані від факелу полум'я 10 м за час 2 години

Проаналізувавши рисунок можна сказати, що за дві години ні цегляна ні бетонна стінка не прогрівуються до значної температури (менше  $15^{\circ}\text{C}$ ). Температура на поверхні цегляної стінки вища за температуру бетонної стінки на  $200^{\circ}\text{C}$ . Це зумовлено тим, що коефіцієнт теплопровідності цегли –  $\lambda = 0,455 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$  у три рази менший ніж у бетону –  $\lambda = 1,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ . При симетричному розташуванні конструкції, її стінки зазнають більшого температурного впливу ніж при несиметричній.

### 3.4. Нагрів нафтопродуктів в закритому резервуарі

Найбільшу загрозу для людей і навколишнього середовища становлять вибухи резервуарів та викиди нафтопродуктів. Зазвичай викиду передують зовнішні ознаки: посилення горіння, зміна кольору полум'я, вібрація верхніх поясів стінки резервуару, посилення шуму під час горіння, можуть спостерігатися окремі потрiскування – хлопки. Товщина шару придонної води, як правило на потужність викиду не впливає [3]. Передбачити точний час викиду нафтопродуктів надзвичайно важко, оскільки він залежить від багатьох факторів: від кількості

нафтопродукту, геометричних розмірів резервуара, сили вітру, наявності охолодження резервуару тощо.

Для вирішення цієї задачі проведений аналіз фізико – хімічних властивостей нафти. Із літературних джерел відомо, що при горінні нафтопродуктів утворюється гомотермічний шар [22, 23, 75, 76]. Гомотермічний шар являє собою шар нафтопродукту який рівномірно прогрітий до однакової температури. Він змінює свою глибину і температуру з плином часу. Причиною його утворення є наявність у нафтопродуктах різних фракцій (гас, бензин, дизельне паливо, мазут тощо), які характеризуються різною температурою кипіння.

Викид відбувається коли температура нафтопродукту на межі розподілу нафтопродукт – придонна вода, сягає температури понад 100 °С. Гомотермічний шар з температурою понад 100 °С опускається до придонного шару води, вода починає інтенсивно випаровуватися і підніматися в гору. При випаровуванні води, її об'єм збільшується у 1700 разів, що викликає різке зростання тиску в середині резервуару. Парова подушка яка утворилася під шаром нафтопродукту в наслідок випаровування води, під дією тиску виштовхує рідину вгору. При цьому стовп нафтопродукту з великою швидкістю вилітає з резервуару. В наслідок цього зриває покрівлю резервуару. Конструкція вертикальних сталевих резервуарів передбачає послаблений зварний шов який з'єднує стаціонарну покрівлю з стінками резервуару. Цей шов убезпечує резервуар від руйнування його стінок при підвищенні внутрішнього тиску, тобто при вибуху і викиді. Як свідчить світова практика даний вид захисту від руйнувань резервуарів не є ефективний, оскільки часто траплялися випадки коли покрівля резервуару не відривалася, що призводило до відривання днища резервуару та піднімання в повітря всієї споруди (рис. 3.8).



*Рисунок 3.8. – Політ резервуара*

Такий варіант розвитку пожежі є найбільш небезпечним, оскільки пожежа миттєво поширюється на велику площу. Траплялися випадки, коли при вибуху РВС – 5000 корпус відлітав приблизно на 50 м, при вибуху РВС – 700 – на 25 [3]. За свідченнями очевидців схожі випадки трапилися при горінні нафтобази у Васильківському районі у 2015 р. У науковій літературі проблема руйнування резервуарів з відривом днища від корпусу є недослідженою. Це ставить перед нами завдання дослідити причини відриву стінок резервуарів від днища та їх квазімиттєвого руйнування. З цією метою досліджено вплив теплових потоків на температурне поле нафтопродуктів, які зберігаються в середині резервуарів. При дослідженні температурного поля нафтопродукту, який зберігається в резервуарі використано результати другого розділу, а саме враховано інтенсивність теплового випромінення. З метою більш точного розрахунку температурного поля ми врахували зміну тепло-фізичних характеристик нафтопродуктів, а саме:

Густина нафтопродуктів визначається за формулою [61]

$$\rho = \rho_{20} - \zeta_t (t - 20), \quad (3.10)$$

де  $\rho_{20}$  - густина нафти чи нафтопродукту при температурі  $20^\circ\text{C}$ ,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;

$\zeta_t = 1,825 - 0,001315\rho_{20}$  - температурна поправка.

Теплоємність нафтопродуктів визначається за формулою Кrego

$$c = \frac{31,56}{\sqrt{\rho_{20}}} (762 + 3,39T), \quad (3.11)$$

де  $c$  – теплоємність нафти чи нафтопродукту,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;

$T$  – температура,  $\text{К}$ .

Теплопровідність нафтопродуктів визначається за формулою Кrego-Сміта

$$\lambda = \frac{156,6}{\rho_{20}} (1 - 0,00047T), \quad (3.12)$$

де  $\lambda$  - теплопровідність нафти чи нафтопродукту,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;

$T$  – температура,  $\text{К}$ .

При математичному дослідженні використаємо декартову систему координат. Початок вісі  $x$  розмістимо на поверхні нафтопродукту, її напрямок спрямуємо вниз. Вісь  $y$  відобразить температурну шкалу.

З метою дослідження процесу прогрівання нафти по глибині резервуара, розв'яжемо нестационарне рівняння теплопровідності [60]

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \right) \quad (3.13)$$

з початковою умовою

$$t(x, 0) = t_0 \quad (3.14)$$

та граничною умовою другого роду

$$\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} + q(t) = 0, \quad (3.15)$$

де  $t_0$  – початкова температура нафти, °С.

Розв'язок рівняння (3.13) – (3.15) знаходимо з використанням перетворень Лапласа

$$t(x, \tau) = \frac{2q}{\lambda} \sqrt{a\tau} \left[ \frac{1}{\pi} \exp\left(-\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right)^2\right) - \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) \right]. \quad (3.16)$$

$a = \lambda / C_p \cdot \rho$ , Дж/кг · К – коефіцієнт теплопроводності, м<sup>2</sup>/с ;

$C_p$  – теплоємність, Дж/кг · К ;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопроводності сталевго резервуара, Вт/м · К .

За формулою (3.16) проведені розрахунки зміни температурного поля по глибині слою нафти з плином часу. При розрахунку прийнято, що  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ,

$\rho_0 = 840 \text{ кг/м}^3$ ,  $q = q_{\delta} + q_n$ ,  $q_{\delta} = 4 \text{ кВт/м}^2$ , – інтенсивність теплового

випромінення бічної поверхні РВС;  $q_n = 6 \text{ кВт/м}^2$  – інтенсивність випромінення

покрівлі РВС. При математичному дослідженні використаємо декартову систему координат. Початок вісі  $x$  розмістимо на поверхні нафтопродукту, вона відобразатиме температурну шкалу. Вісь  $y$  відобразатиме глибину шару нафтопродукту, її спрямуємо вниз (рис. 3.9).

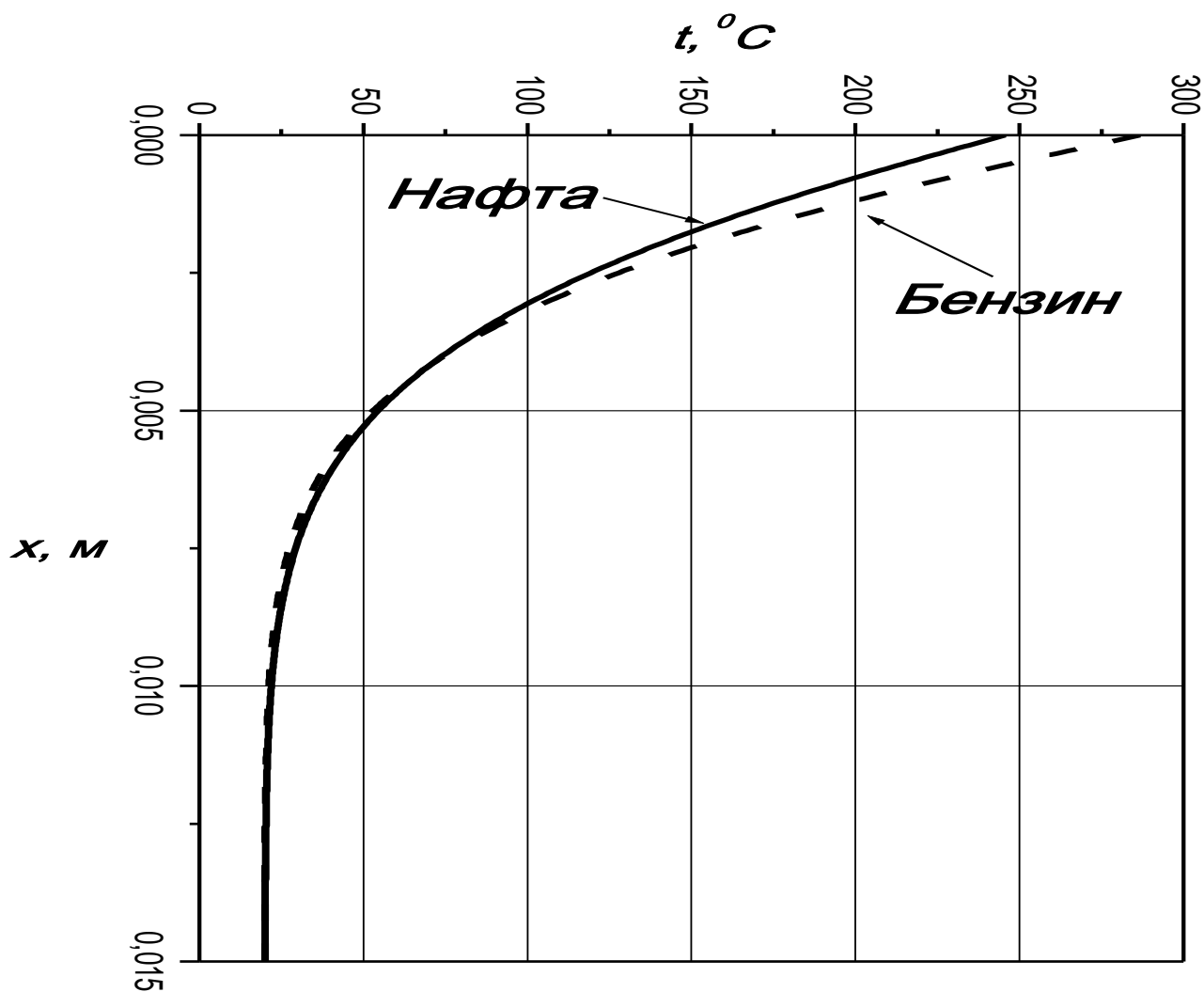


Рисунок 3.9 – Температурне поле нафти і бензину по глибині її слою за час 100 с.

Аналіз графічної залежності, показує що за 100 секунд при поверхневий шар нафти прогривається до температури  $70...245^{\circ}\text{C}$ , а бензину –  $50 - 285^{\circ}\text{C}$ . Отже середня температура нафти і бензину в шарі товщиною 4 мм становить  $100^{\circ}\text{C}$  і  $120^{\circ}\text{C}$  відповідно.

### 3.5. Висновки за розділом

1. Вперше запропоновано математичну модель для розрахунку температурного поля при тепловому потоці – змінному в часі. Це дало можливість встановити, що час нагріву резервуару до критичної температури  $550^{\circ}\text{C}$  є на 40...86 % більший ніж при розрахунку із постійним потоком та теплофізичними характеристиками.

2. Встановлено, що при пожежі в резервуарному парку сухі стінки РВС – 1000 прогріються до критичної температури  $550^{\circ}\text{C}$  за *10 хвилин*, при віддалі між резервуарами *7 м* і за *15 хвилин*, при віддалі між резервуарами *15 м*. При досягненні такої температури стінка резервуару почне “згортатися” в середину утворюючи так звані “кармани”. Утворення карманів значно ускладнює процес гасіння резервуарів. Для запобігання утворення карманів необхідно інтенсивно охолоджувати стінки резервуарів. Отже дуже важливим параметром є час за який сухі стінки резервуарів почнуть втрачати несучу здатність, оскільки він повинен бути більший ніж час прибуття перших підрозділів до місця пожежі. Оскільки збільшення віддалі між резервуарами на *8 м* збільшує критичний на *50%*, рекомендується збільшувати відстань між резервуарами при проектуванні не менше ніж на *15 м*, оскільки середній час прибуття перших підрозділів до місця пожежі *10-15 хв*.

3. Вперше розроблено математичну модель для розрахунку температурного поля по товщині сухої стінки двостінного резервуару об’ємом *75 000 м<sup>3</sup>*, з врахуванням теплового потоку, який змінюється з плином часу. При розрахунках враховано зміну теплофізичних параметрів стінки резервуарів при змінній температурі. Визначено час за який внутрішня стінка, яка не омивається нафтопродуктом прогріється до критичної температури.

4. Досліджено вплив теплового потоку на стінки сусідніх будівель, які можуть розташовуватися в резервуарному парку. Розраховано температурний розподіл по товщині бетонної і цегляної стінок при дії теплового потоку. Встановлено, що за час пожежі *2 години* температура на поверхні цегляної стінки буде на *200 °C* вища ніж бетонної. Це викликано тим, що коефіцієнт теплопровідності цегли  $\lambda$  у *3,3 рази* менший ніж у бетону. Розрахунки проводилися для симетричного і несиметричного розташування стінки відносно факела пожежі.

5. У пункті 3.3 досліджено вплив теплових потоків на нафтопродукт який зберігається в середині резервуару. Встановлено, що вже за перші *100 секунд* теплового впливу, шар нафтопродукту товщиною *4 мм* прогріється до температури кипіння. При розрахунках враховано зміну теплофізичних характеристик нафтопродуктів при збільшенні температури. Дослідження температурного поля проводилось для нафти і бензину.



## РОЗДІЛ 4

### ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ В СТІНЦІ РЕЗЕРВУАРА ПРИ ГРУПОВІЙ ПОЖЕЖІ

**4.1. Особливості моделі теплового впливу на резервуари для зберігання нафтопродуктів.** При зберіганні нафтопродуктів на складах паливно-мастильних матеріалів використовуються резервуари, найпоширеніша конструкція яких наведена на рис. 4.1. Щодо проектування резервуарів на нафтосховищах існують рекомендації [1].

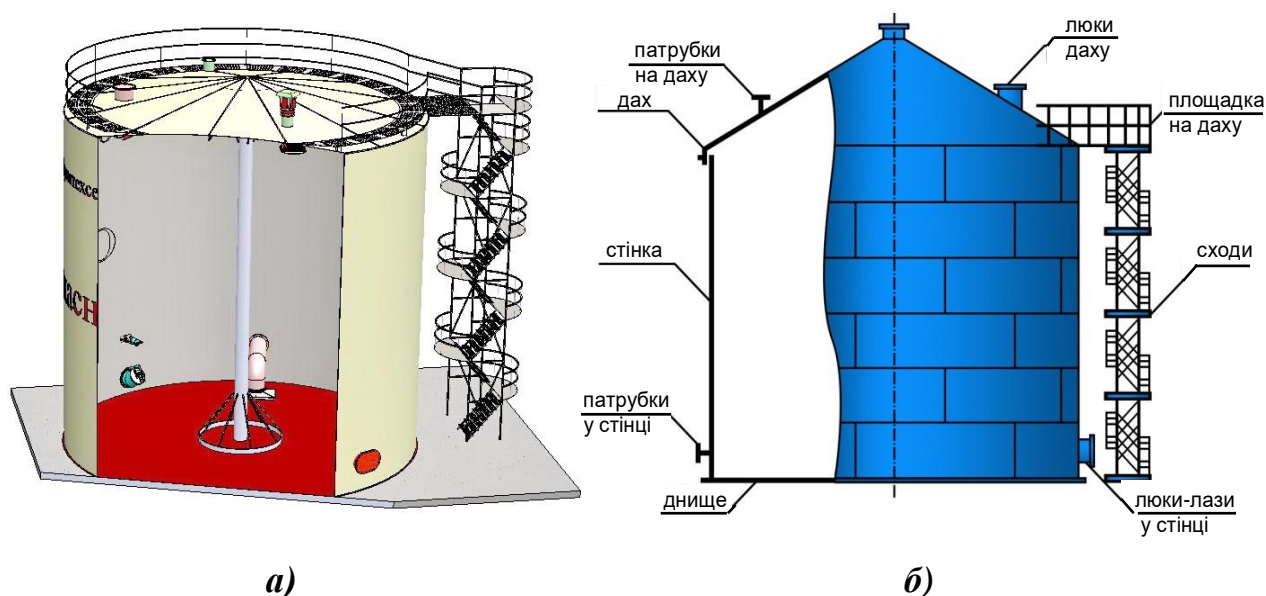
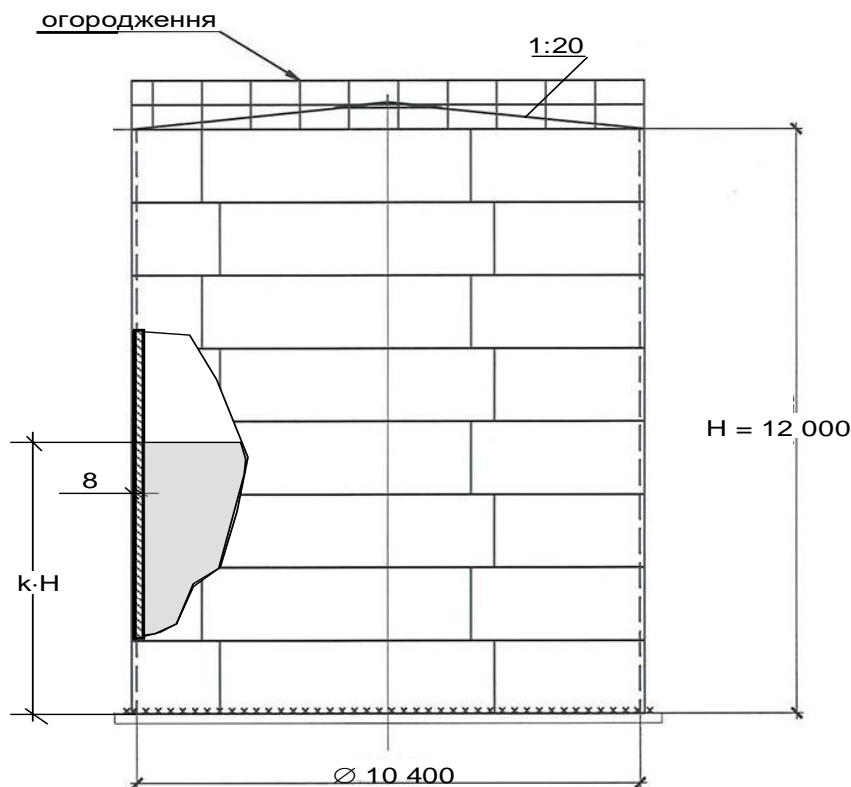


Рисунок 4.1 – Конструкція резервуара для зберігання нафтопродуктів (а) та схема його конструктивних елементів (б)

Згідно із рис. 4.1 огорожувальні конструкції резервуару для нафтопродуктів складається з вертикальної стінки, днища та даху. Дані конструкції виготовляються з сталених листів, що з'єднуються між собою за допомогою електрозварювання.

Для моделювання теплового впливу пожежі на резервуари із нафтопродуктами нами була розглянута одна із поширених їх конструкцій. Схожу конструкцію мали резервуари, що використовувалися на нафтобазі БРСМ

у Василькові Київської обл. На рис. 4.2 представлена вибрана конструкція із геометричними параметрами, що використані нами для моделювання.



*Рисунок 4.2 – Конструктивна схема резервуару ля нафтопродуктів, що вибраний для моделювання теплового впливу пожежі*

Товщина листів сталі які використовуюються при проектуванні та будівництві РВС наведена в табл. 5.

**Постановка задачі.** Розглядаючи теплові процеси, що відбуваються при теплообміні резервуару із факелами пожежі на судніх резервуарах, можна помітити, що дана задача має складну постановку і потребує у залучення сумісних моделей термогазодинаміки, теплопровідності та моделі пристінкових шарів до поверхні стінок резервуару, підданому тепловому впливу. Задача ускладнюється тим, що окрім указаних моделей необхідно залучити для замикання комплексу моделей інтегральною моделлю променистого теплообміну. Це означає, що означена задача вирішується тільки чисельно із використанням спеціалізованих комп'ютерних комплексів, які надають можливість проведення такого аналізу сумісних задач термодинаміки. Крім цього, така постановка задачі дозволяє залучення потужної комп'ютерної

техніки. Щоб уникнути суттєвого ускладнення поставленої задачі при зберіганні відповідної точності та достовірності нами було зроблено 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 складає  $T_f$ .

2. Теплообмін між факелами пожежі над резервуарами та стінками резервуару, а також у порожнині резервуару має тільки променисту складову, оскільки вплив конвективної складової набагато менший.

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

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

5. Температура стінки резервуару із пожежею однакова, а сама стінка даного резервуару також бере участь у променистому теплообміні.

Джерелом теплового впливу при моделюванні є факел над резервуаром при пожежі, що має геометричні параметри, відповідні то схеми, яка наведена на рис. 4.3.

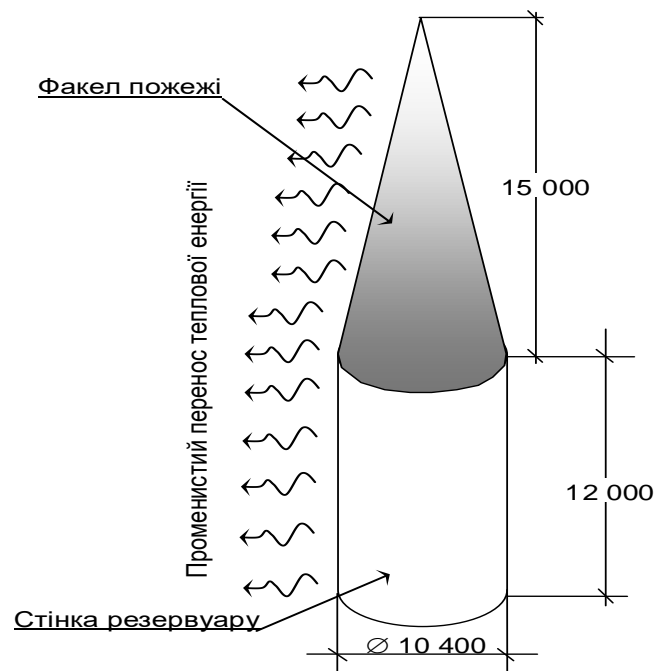


Рисунок 4.3 – Схема розташування факелу над резервуаром із пожежею

## 4.2. Можливі схеми пожеж в резервуарних парках.

Використовуючи схему теплового впливу пожежі над резервуаром були розглянуті декілька сценаріїв розвитку пожежі. Дані сценарії полягають у різних ситуаціях займання нафтопродуктів на суміжних резервуарах до резервуару, тепловий вплив пожежі на який вивчається. На рис. рис. 4.4 – 4.7 показані схеми теплового впливу пожежі на досліджуваний резервуар згідно із прийнятими сценаріями пожежі.

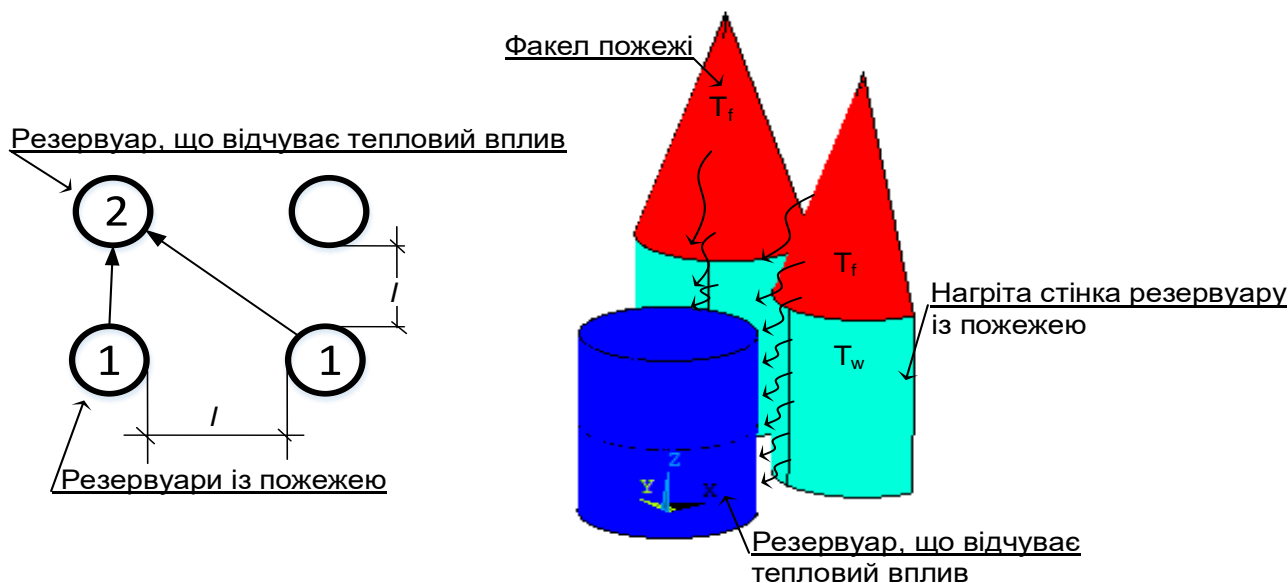


Рисунок 4.4 – Перша схема взаємного розташування резервуарів із пожежею і без неї

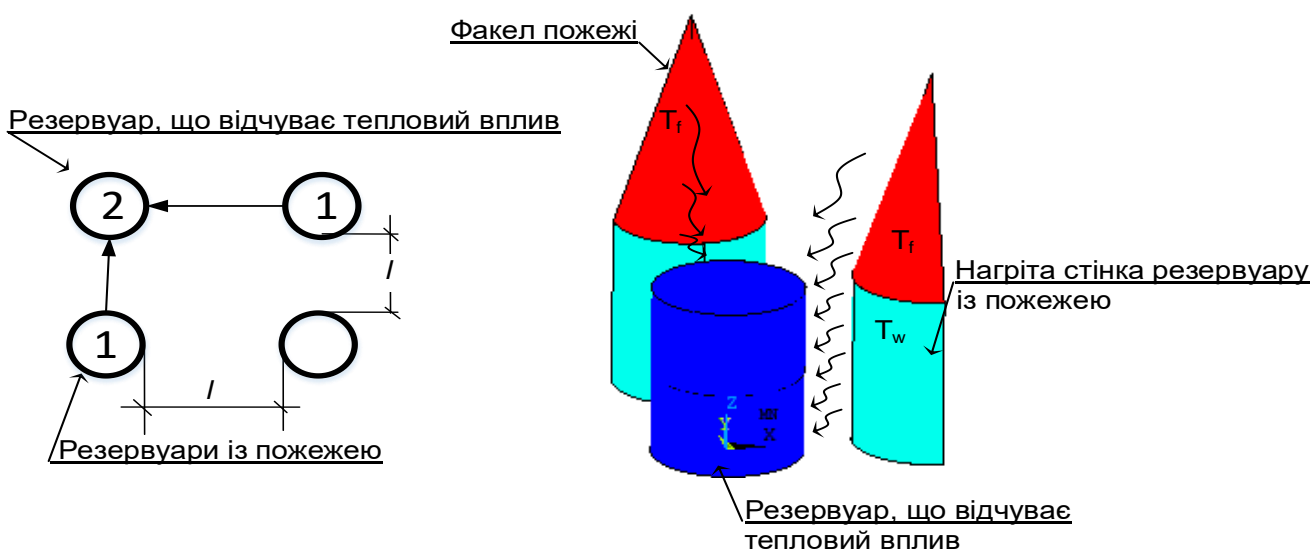


Рисунок 4.5 – Друга схема взаємного розташування резервуарів із пожежею і без неї

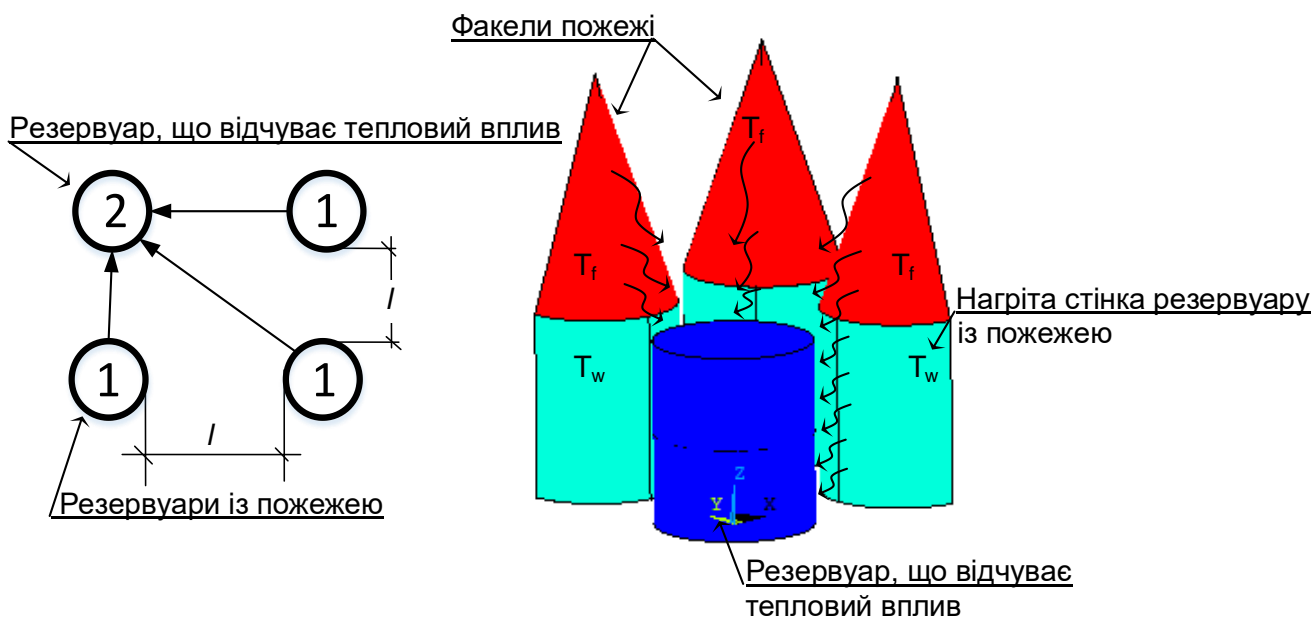


Рисунок 4.6 – Третя схема взаємного розташування резервуарів із пожежею і без неї

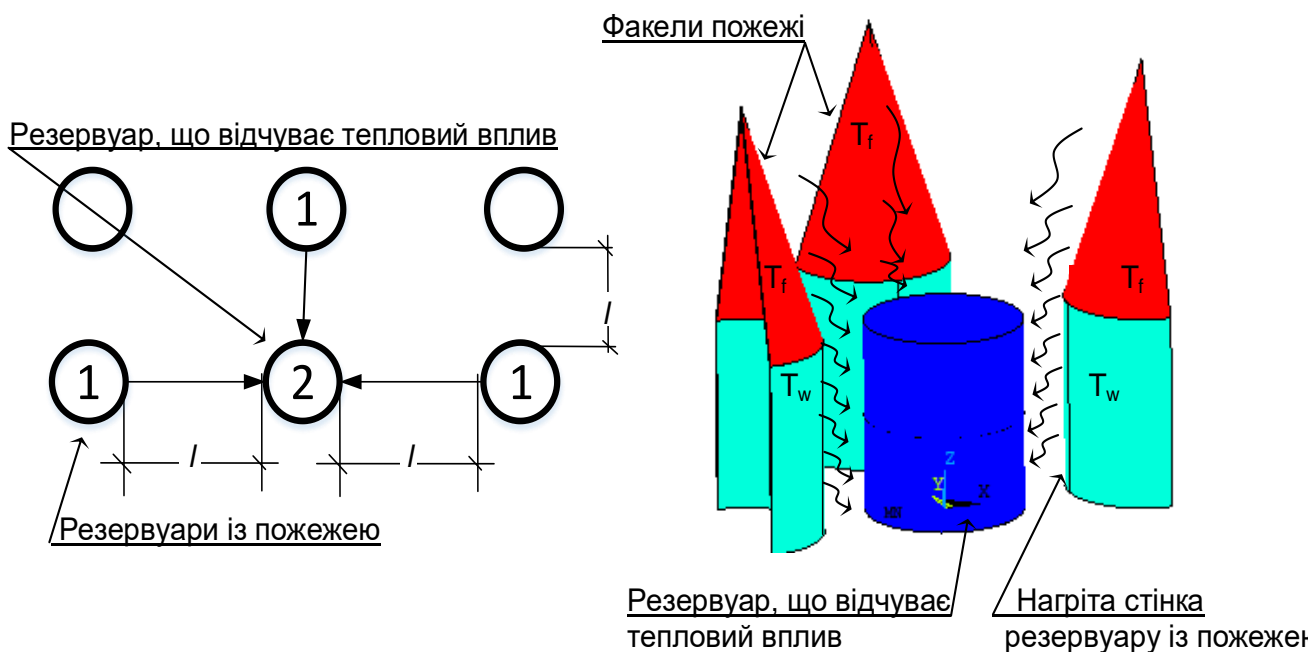


Рисунок 4.7 – Четверта схема взаємного розташування резервуарів із пожежею і без неї

Також нами була розглянута внутрішня структура резервуара із наявним у ньому паливом. Тобто окрім теплообміну випромінюванням факела пожежі із

резервуаром був розглянутий внутрішній теплообмін у порожнині між дзеркалом палива та внутрішніми стінками резервуара. На рис. 4.8 показана схема теплообміну між дзеркалом палива та внутрішніми стінками резервуара.



*Рисунок 4.8 – Внутрішня будова резервуару та схема теплообміну у порожнині між стінками та дзеркалом рідини нафтопродукту*

Сценарії пожежі передбачають два варіанти палива що горить у факелі пожежі – нафта і бензин, при цьому температура факелу буде рівна  $1500\text{ K}$  та  $1400\text{ K}$  відповідно. Окрім цього, варіанти сценарію пожежі передбачають різні рівні наповнення резервуарів паливом на  $0,5$  та  $0,9$  від об'єму резервуару. Для дослідження особливостей теплового впливу факелів пожежі відстань між резервуарами набуває трьох значень –  $6\text{ м}$ ,  $10\text{ м}$  та  $20\text{ м}$

При розгляді теплообміну між факелом пожежі та стінками резервуару застосовуються граничні умови III роду, що відповідають закону Стефана-Больцмана [60].

### 4.3 Математичні моделі та метод чисельного розв'язку задачі

Для розрахунку можна використати рівняння нестационарної теплопровідності. Рівняння теплопровідності для тривимірної розрахункової області (див. рис.4.2) можна записати у такому вигляді [60]:

$$C_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.1)$$

де  $C_v$  – об'ємна теплоємність,  $\text{Вт}/\text{м}^3 \cdot \text{К}$

Тепловий вплив на розрахункову область резервуару з боку зони підвищеної температури, яка утворюється при згорянні палива у факелі, може бути описаний граничними умовами (ГУ) III роду, що записуються у вигляді:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0,3m} = \alpha_B (T_P - T_W), \quad (4.2)$$

де  $\alpha_B$  – коефіцієнт променистого теплообміну,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{°С}$ ;

$T_P$ ,  $T_W$  – відповідно температури пожежного середовища і поверхні протипожежної перешкоди,  $\text{°С}$ ;

$x$  – поточна просторова координата.

Коефіцієнт теплообміну визначається за допомогою узагальненого рівняння, що виражає закон Стефана-Больцмана:

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - \varphi_{ij}) \sigma T_j^4 = \sum_{j=1}^N \frac{1}{A_j} \left( \frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - \varphi_{ij} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_j} \right) q_j \quad (4.3)$$

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

$q_j$  – поверхневий тепловий потік через  $i$ -ту поверхню, яка обмінюється випромінюванням з  $j$ -тою поверхнею

$\varphi_{ij}$  – променеві форм-фактори, залежні від взаємного розташування  $i$ -тої і  $j$ -тої площ поверхонь, які обмінюються випромінюванням, і визначаються за

інтегральним рівнянням променистого теплообміну між поверхнями, що випромінюють тепло:

$$\varphi_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r^2} dA_j dA_i. \quad (4.4)$$

У формулу (5.4) входять такі основні такі величини:

- $\theta$  - 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 (5.1) може бути апроксимоване за допомогою методу кінцевих елементів [63]. Для даного випадку при розв'язанні рівняння теплопровідності за методом кінцевих елементів застосовується система нелінійних рівнянь, що у матричному записі має такий вигляд:

$$[\mathbf{K}(\mathbf{T})] \{\mathbf{T}\} = \{\mathbf{Q}(\mathbf{T})\}, \quad (4.5)$$

де  $[\mathbf{K}(\mathbf{T})]$  – узагальнена матриця матеріальних коефіцієнтів;  $\{\mathbf{Q}(\mathbf{T})\}$  – вектор зовнішніх вузлових теплових потоків. При врахуванні рівності зовнішніх і внутрішніх теплових потоків дана система доповнюється і записується у більш загальному вигляді:

$$\{\mathbf{P}(\mathbf{T})\} = \{\mathbf{Q}(\mathbf{T})\}, \quad (4.6)$$

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

Дана система рівнянь розв'язується ітераційним методом Ньютона-Рафсона. При проведенні ітерацій має мінімізуватися нев'язність вигляду:



$$\{\Phi\} \equiv \{Q(T)\} - \{P(T)\} \rightarrow \{0\}. \quad (4.7)$$

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

При проведенні даних процедур досягається лінеаризація системи рівнянь (4.6) у вигляді:

$$[K_T^{(i-1)}] \{\Delta T^{(i)}\} = \{Q^{(i)}\} - \{P^{(i-1)}\}. \quad (4.8)$$

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

$$\{T^{(i)}\} = \{T^{(i-1)}\} + \{\Delta T^{(i)}\}. \quad (4.9)$$

Ітерації проводяться до досягнення прийнятної збіжності.

У рівнянні (4.9), матриця  $[K_T]$  називається дотичною матрицею або яacobіаном. Коефіцієнти даної матриці визначаються за виразом:

$$[K_T^{(i-1)}] \equiv \left( \frac{d\{\Phi\}}{d\{T\}} \right)_{i-1}. \quad (4.10)$$

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

$$\{\Phi^{(i)}\} \cong \{\Phi^{(i-1)}\} + \left( \frac{d\{\Phi\}}{d\{T\}} \right)_{i-1} \{\Delta T^{(i)}\}, \quad (4.11)$$

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

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

$$[\bar{\mathbf{K}}^{(i-1)}] \{\Delta \mathbf{T}^{(i)}\} = \{\mathbf{Q}^{(i)}\} - \{\bar{\mathbf{P}}^{(i-1)}\} \quad (4.12)$$

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

В рівнянні (4.6)  $\{\mathbf{Q}(T)\}$  - вектор вузлових теплових потоків, що визначається при перевизначенні вектора зовнішнього заданого теплового потоку  $\{\mathbf{Q}_{0n}\}$  и еквівалентної матриці теплопровідності  $[\mathbf{K}(T)]$ .  $\{\bar{\mathbf{P}}\}$  - еквівалентний вектор вузлових внутрішніх теплових потоків, який визначається при перевизначенні еквівалентної матриці теплопровідності  $[\mathbf{K}(T)]$ , визначуваною при чисельному інтегруванні за часом вектора  $\{\Delta \mathbf{T}^{(i)}\}$  методом Ейлера с використанням формули:

$$\{\mathbf{T}_{n+1}\} - \{\mathbf{T}_n\} = \Delta t_n (1 - \zeta) \{\mathbf{T}_n\} + \Delta t_n \zeta \{\mathbf{T}_{n+1}\}, \quad (4.13)$$

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

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

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

$$[\mathbf{K}_n(T)] = \frac{1}{\zeta \Delta t_n} [\mathbf{C}_n(T)] + [\mathbf{K}_n(T)], \quad (4.14)$$

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

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

$$\{\mathbf{Q}_n(T)\} = \{\mathbf{Q}_{0n}\} + \frac{1-\zeta}{\zeta} [\mathbf{C}_n(T)]\{\mathbf{T}_n\} - [\mathbf{K}_n(T)]\{\mathbf{T}_n\}. \quad (4.15)$$

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

$$\{\mathbf{Q}_{0n}\} = \{\mathbf{Q}_n^{\text{конв}}\} + \{\mathbf{Q}_n^{\text{излуч}}\}, \quad (4.16)$$

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

$$\{\mathbf{Q}_n^{\text{конв}}\} = \alpha_{\kappa} (\{\mathbf{T}_{Wn}\} - \{\mathbf{T}_{Pn}\}) \mathbf{A}_e; \quad (4.17)$$

$\{\mathbf{Q}_n^{\text{випр}}\}$  – поточний вектор променистого поверхневого вузлового теплового потоку, який визначаються за формулою:

$$\{\mathbf{Q}_n^{\text{випр}}\} = \varepsilon \sigma (\{\mathbf{T}_{Wn}^4\} - \{\mathbf{T}_{Pn}^4\}) \mathbf{A}_e; \quad (4.18)$$

$\{\mathbf{T}_{Wn}\}$  – вектор поверхневих вузлових температур;

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

**Початкові дані** Початкові дані, що використовуються згідно з [64, 67] для розрахунків зведені до табл. 6.

**Початкові дані до розрахунку температурного розподілу  
у системі резервуар – факел пожежі**

Початкова температура стінки резервуару, °С	Температура оточуючого повітря, °С	Температура стінки резервуара із пожежею, °С	Температура факелу пожежі над резервуаром, °С	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 [64, 67]. Згідно із цими рекомендаціями прийняті теплофізичні характеристики подані у табл. 7.

Таблиця 7

**Теплофізичні характеристики бензину і сталі**

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

Використовуючи прийнятий математичний апарат, нами була розроблена розрахункова методика для реалізації розрахунку за описаними вище сценаріями пожежі. Згідно із цією методикою розрахунок проводиться за такими процедурами.

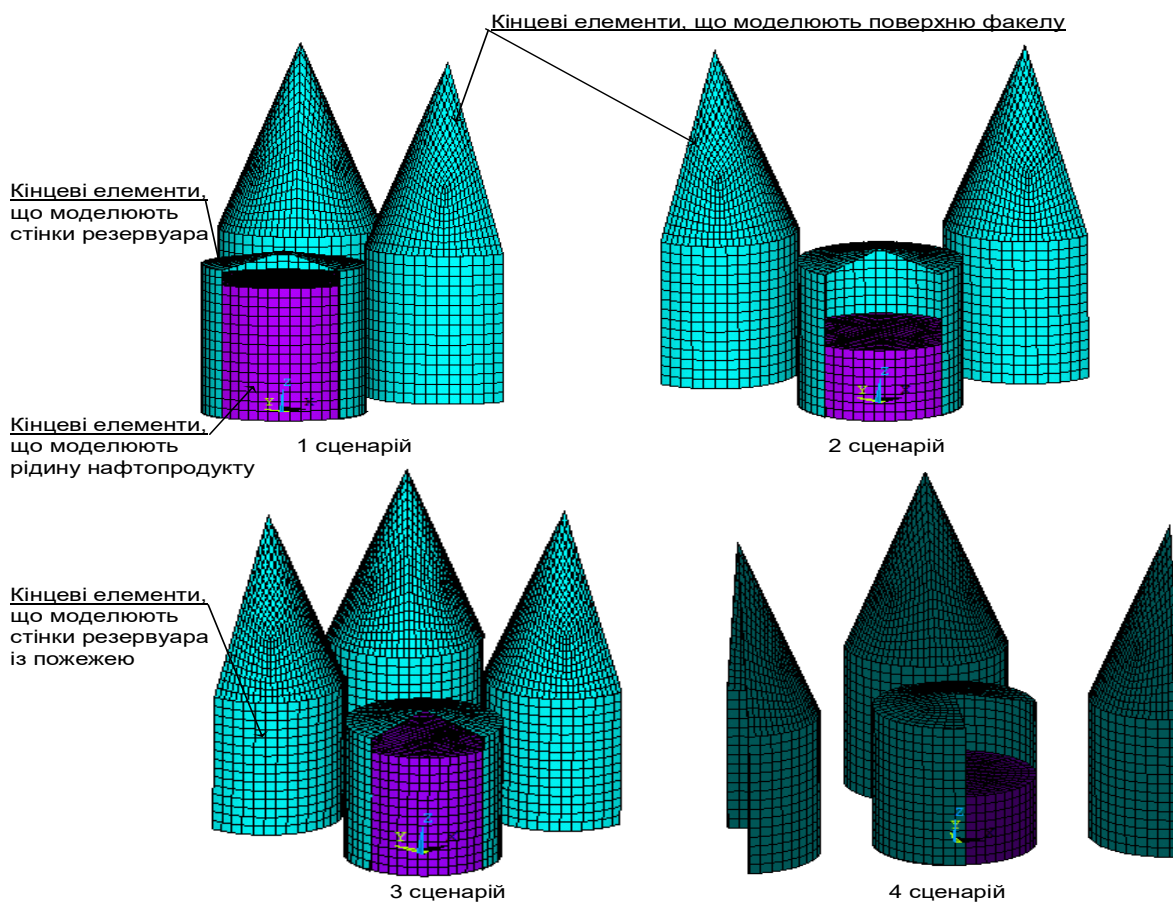
1. Будується геометрична модель з прикладанням ГУ відповідно до рис. рис. 4.2 – 4.8.

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

3. Час теплового впливу пожежі складає 60 хв, оскільки попередній розрахунок показав, що тепловий процес встановлюється.

4. Розрахунок повторюється для резервуару з іншим сценарієм теплового впливу від пожежі.

Для реалізації такого алгоритму була створені кінцево-елементні схеми, які наведені на рис. 4.9.



*Рисунок 4.9 – Кінцево-елементні схеми теплової взаємодії між факелами пожежі над резервуарами та резервуаром без пожежі*

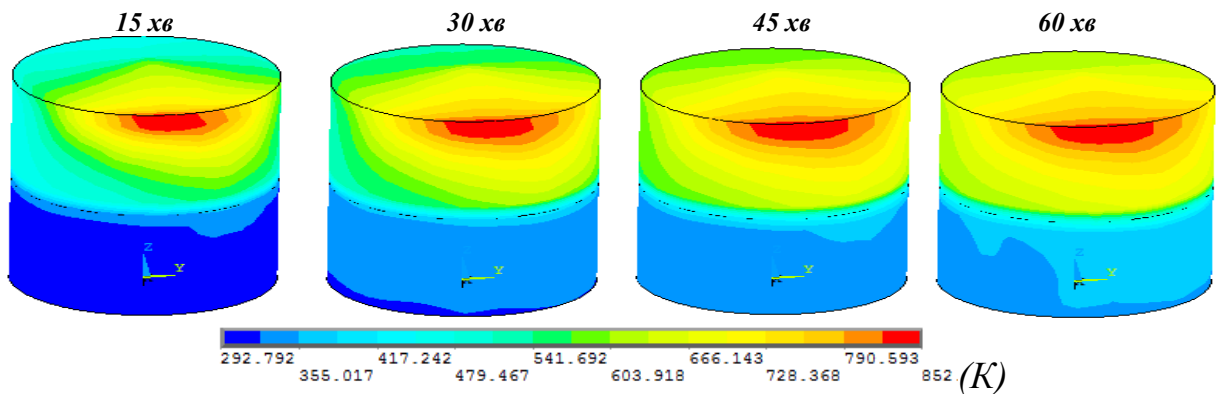
При реалізації обчислювального процесу були прийняті параметри алгоритму чисельного інтегрування, що подані у табл. 8.

Таблиця 8

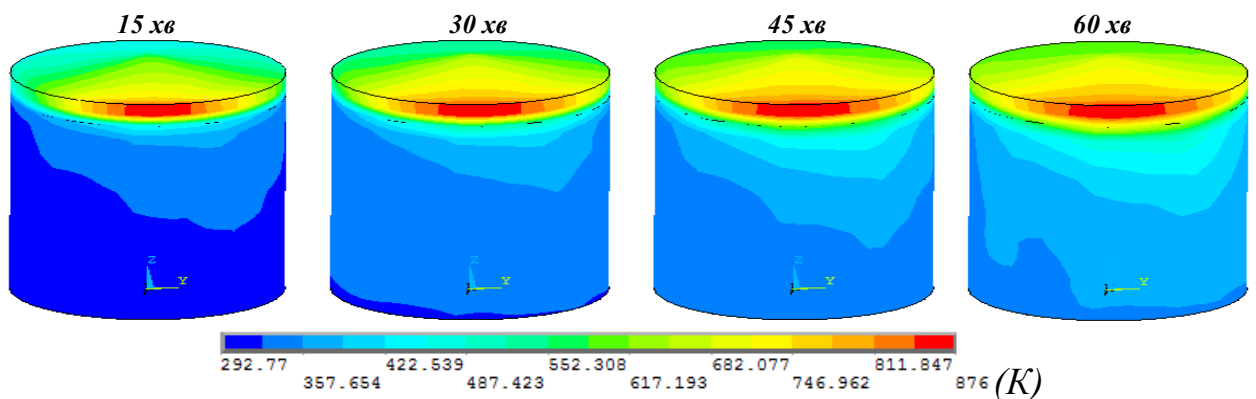
### Параметри обчислювального процесу

Параметр обчислювального процесу	Одиниці виміру	Значення
Тип аналізу		<i>Нестационарний</i>
Автоматичний вибір кроку інтегрування		<i>Включений</i>
Часовий крок інтегрування	<i>c (хв)</i>	<i>30 (0,5)</i>
Найменший часовий крок	<i>c</i>	<i>10</i>
Найбільший часовий крок	<i>c</i>	<i>30</i>
Максимальна кількість ітерацій		<i>1000</i>
Спосіб прикладання навантаження		<i>Ступінчастий</i>
Тип обчислювальної схеми		<i>Неявна</i>
Просторовий крок (середній)	<i>m</i>	<i>0,8</i>
Точність збіжності обчислень	<i>(%)</i>	<i>0.005 (0,5)</i>

**4.4. Результати математичного моделювання температури на стінках резервуару при пожежі у сусідніх резервуарах.** 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 K) наведена на рис. 4.10 – 4.33.



*Рисунок 4.10 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за першою схемою із його заповненням на 50 % та  $l = 6$  м*



*Рисунок 4.11 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за першою схемою із його заповненням на 90 % та  $l = 6$  м*

Аналіз розподілу температури по стінці резервуару (рис. 4.10 і 4.11) показує, що максимальна температура, яка досягається за 60 хв в заповненому на 90% об'єму, на 24 K більша ніж в резервуарі, який заповнений на 50% і становить 876 K.

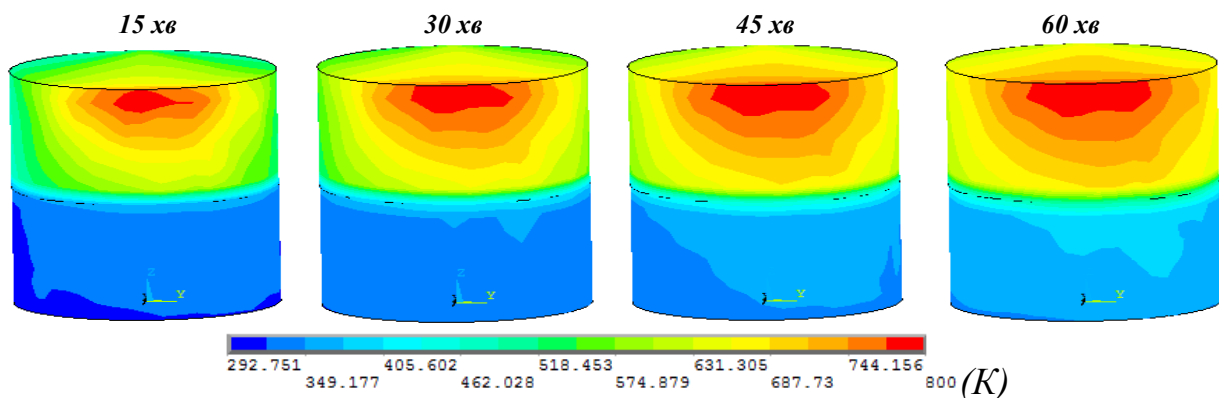


Рисунок 4.12 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за першою схемою із його заповненням на 50 % та  $l = 10$  м

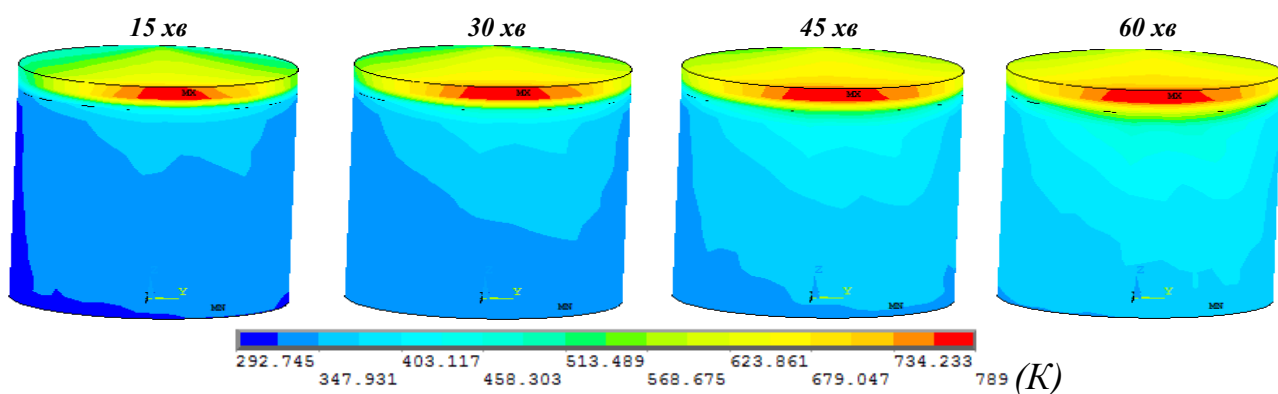


Рисунок 4.13 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за першою схемою із його заповненням на 90 % та  $l = 10$  м

Аналіз рисунку 4.12 і 4.13 показує, що при збільшенні віддалі між резервуарами з  $l=6$  м до  $l=10$  м максимальна температура нагріву зменшується на 76 K і становить 800 K.

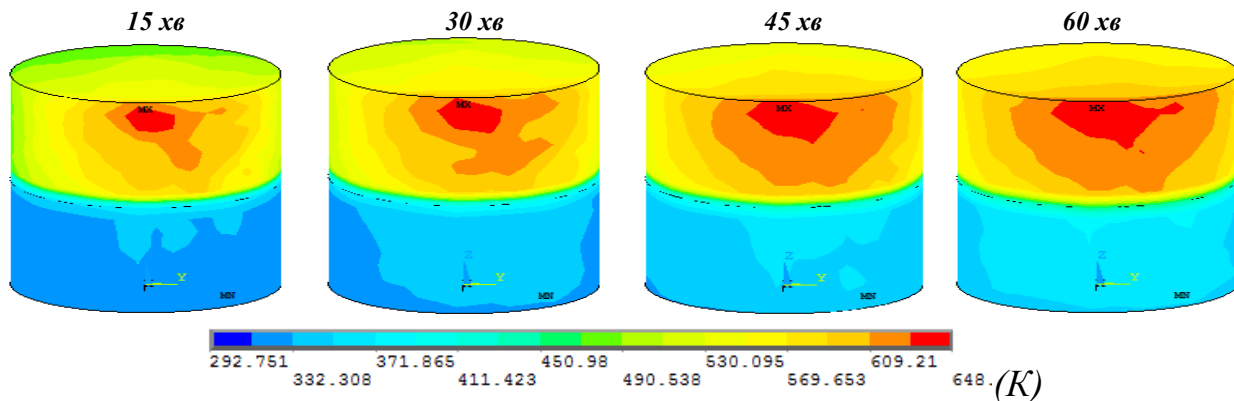


Рисунок 4.14 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за першою схемою із його заповненням на 50 % та  $l = 20$  м



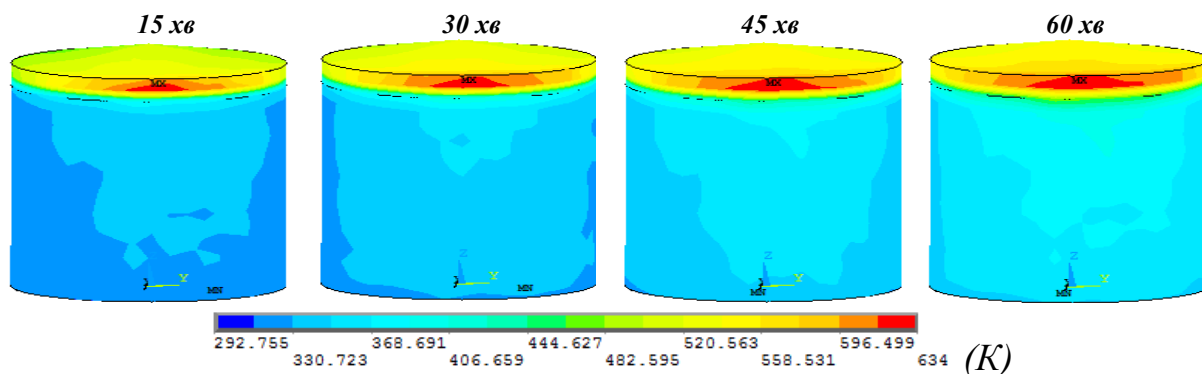


Рисунок 4.15 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за першою схемою із його заповненням на 90 % та  $l = 20$  м

Аналіз рисунку 4.14 і 4.15 показує, що при віддалі  $l$  між резервуарами рівній 20 м, максимальна температура резервуару рівна 648 К.

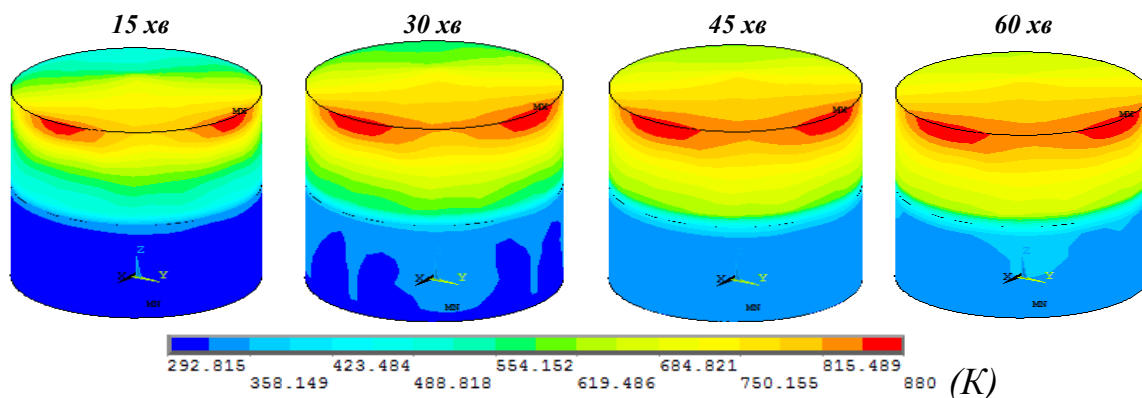


Рисунок 4.16 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за другою схемою із його заповненням на 50 % та  $l = 6$  м

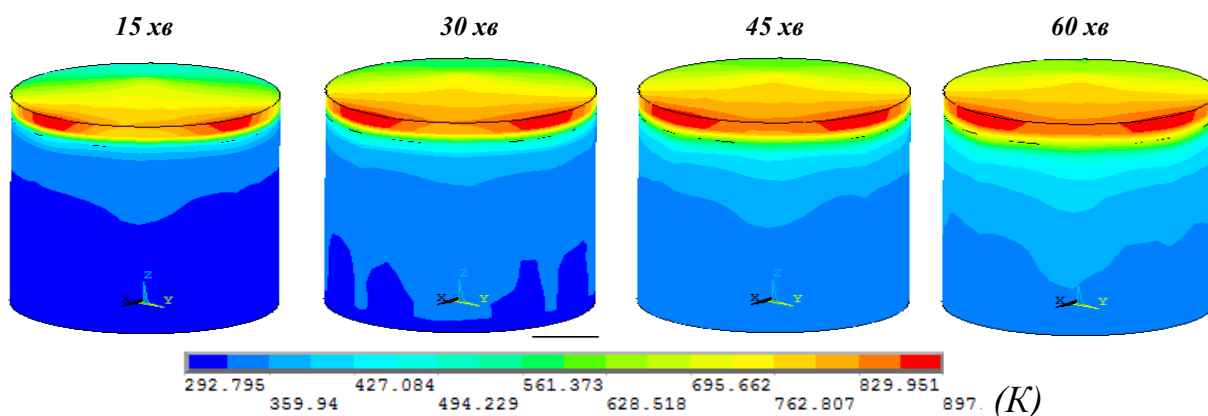


Рисунок 4.17 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за другою схемою із його заповненням на 90 % та  $l = 6$  м

Аналіз розподілу температури по стінці резервуару (рис. 4.16 і 4.17) показує, що максимальна температура, яка досягається за 60 хв в

заповненому на 90% об'єму, на 17 K більша ніж в резервуарі, який заповнений на 50% і становить 897 K.

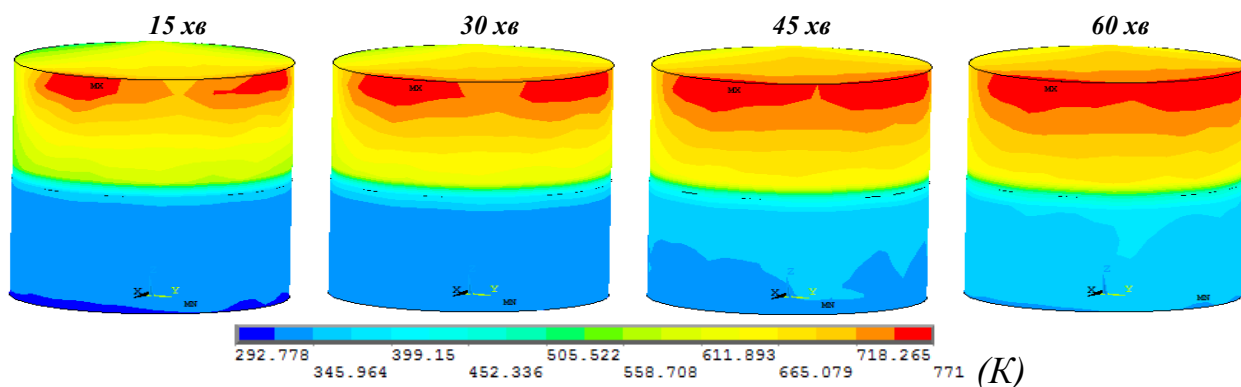


Рисунок 4.18 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за другою схемою із його заповненням на 50 % та  $l = 10$  м

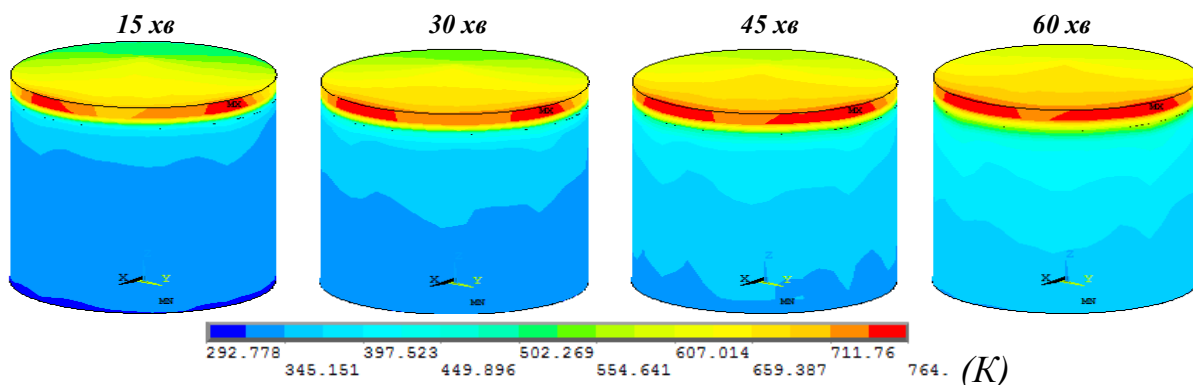


Рисунок 4.19 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за другою схемою із його заповненням на 90 % та  $l = 10$  м

Аналіз рисунку 4.18 і 4.19 показує, що при збільшенні віддалі між резервуарами з  $l=6$  м до  $l=10$  м максимальна температура нагріву зменшується на 126 K і становить 771 K.

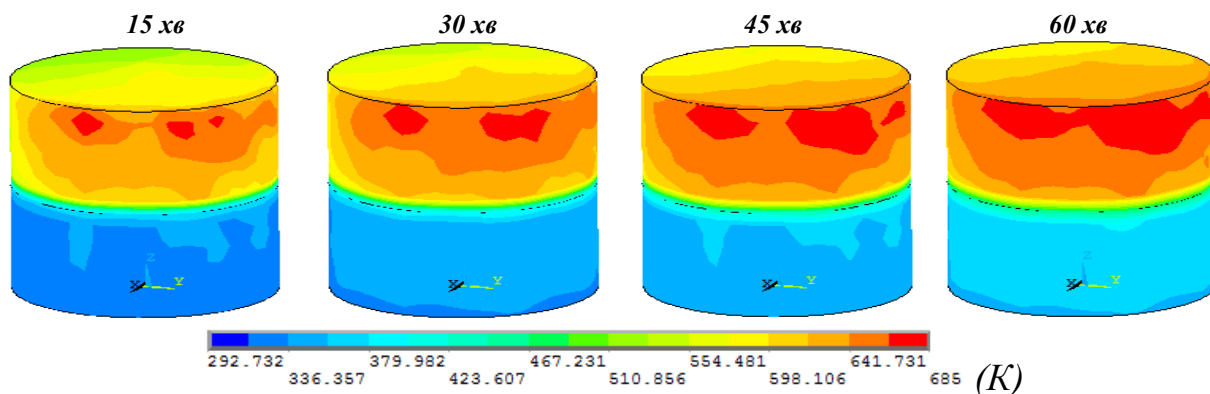


Рисунок 4.20 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за другою схемою із його заповненням на 50 % та  $l = 20$  м

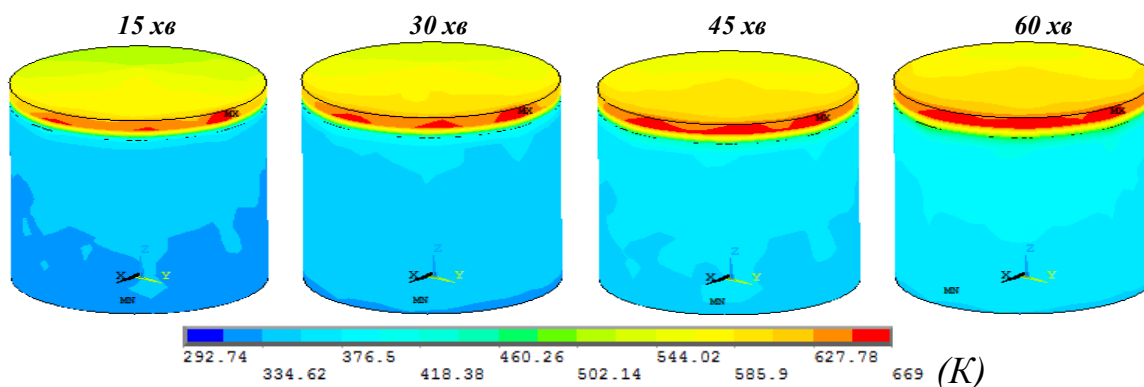


Рисунок 4.21 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за другою схемою із його заповненням на 90 % та  $l = 20$  м

Аналіз рисунку 4.20 і 4.21 показує, що при віддалі  $l$  між резервуарами рівній 20 м, максимальна температура резервуара рівна 685 К.

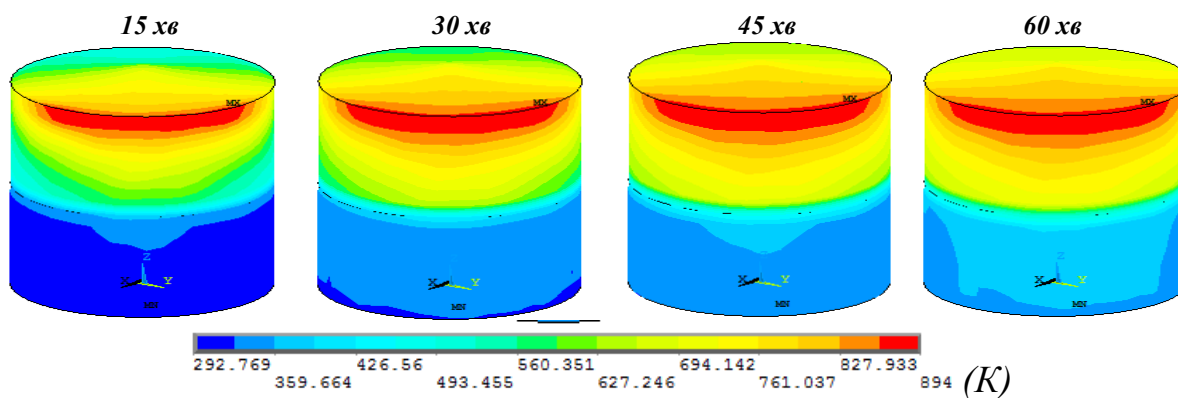


Рисунок 4.22 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за третьою схемою із його заповненням на 50 % та  $l = 6$  м

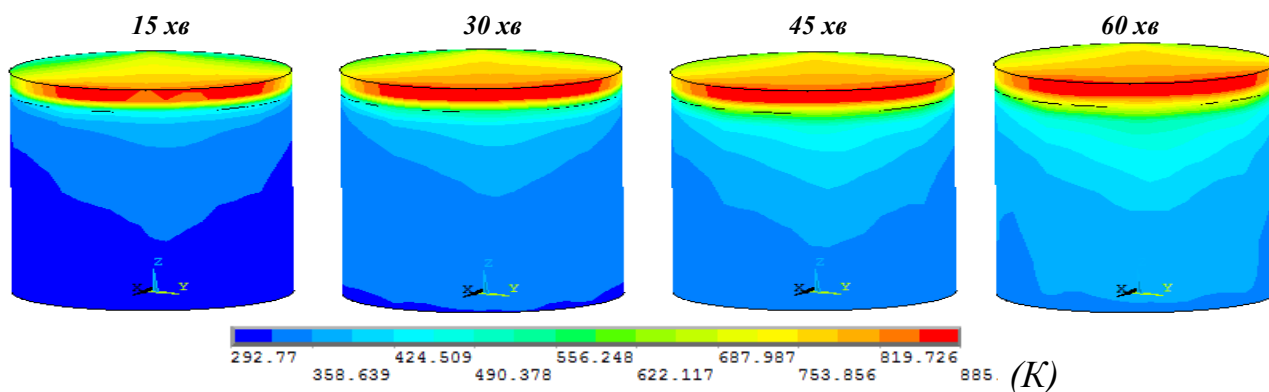


Рисунок 4.23 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за третьою схемою із його заповненням на 90 % та  $l = 6$  м

Аналіз розподілу температури по стінці резервуару (рис. 4.22 і 4.23) показує, що максимальна температура, яка досягається за 60 хв в

заповненому на 50% об'єму, на 9 K більша ніж в резервуарі, який заповнений на 90% і становить 894 K.

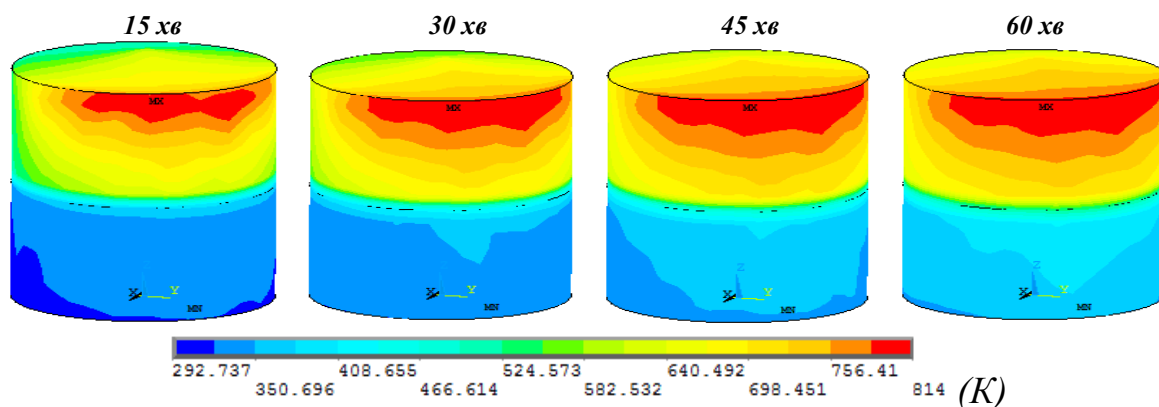


Рисунок 4.24 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за третьою схемою із його заповненням на 50 % та  $l = 10$  м

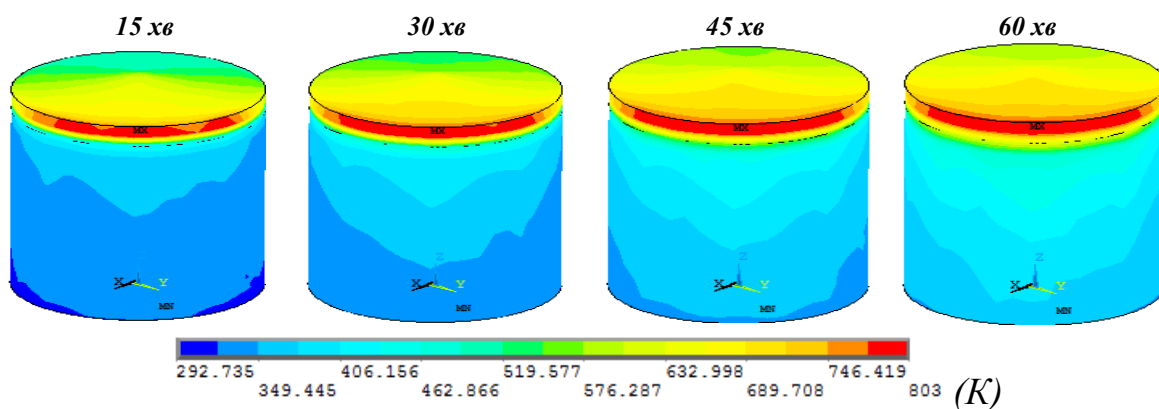


Рисунок 4.25 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за третьою схемою із його заповненням на 90 % та  $l = 10$  м

Аналіз рисунку 4.24 і 4.25 показує, що при збільшенні віддалі між резервуарами з  $l=6$  м до  $l=10$  м максимальна температура нагріву зменшується і становить 814 K.

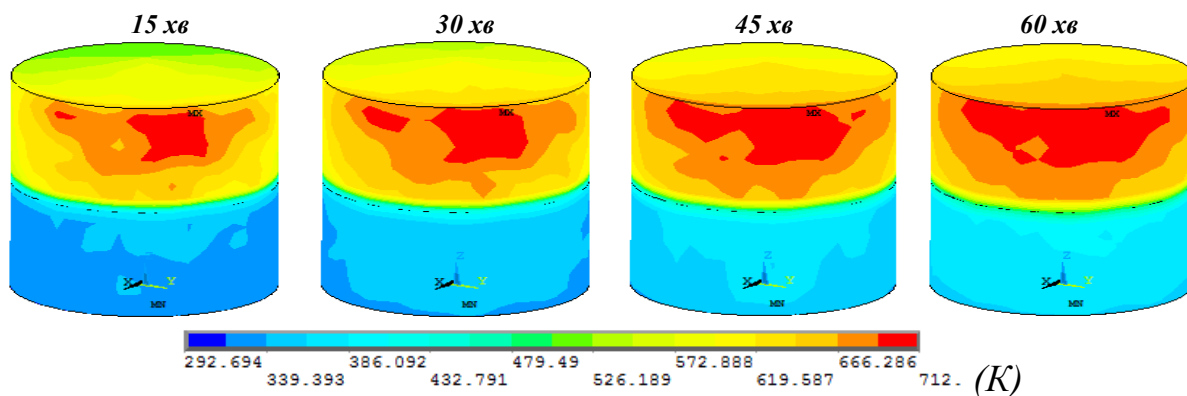


Рисунок 4.26 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за третьою схемою із його заповненням на 50 % та  $l = 20$  м

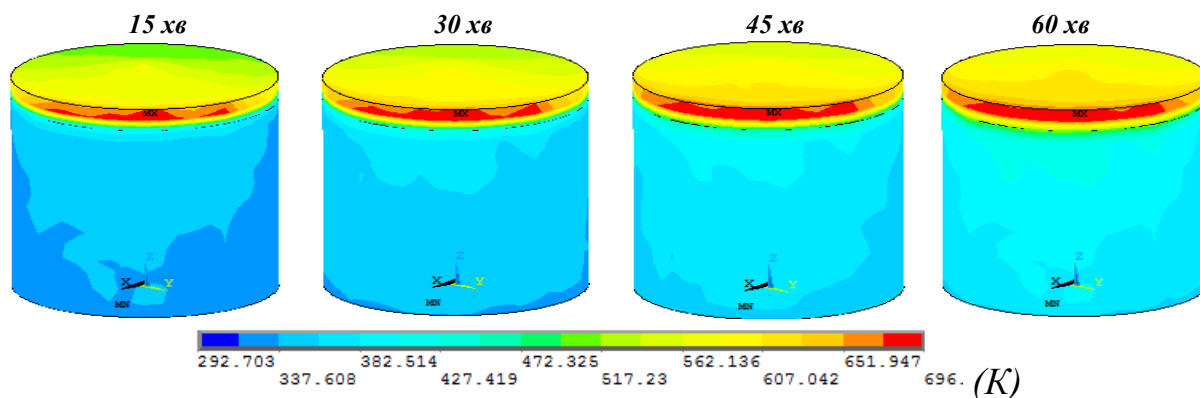


Рисунок 4.27 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за третьою схемою із його заповненням на 90 % та  $l = 20$  м

Аналіз рисунку 4.26 і 4.27 показує, що при віддалі  $l$  між резервуарами рівній 20 м, максимальна температура резервуару рівна 712 К.

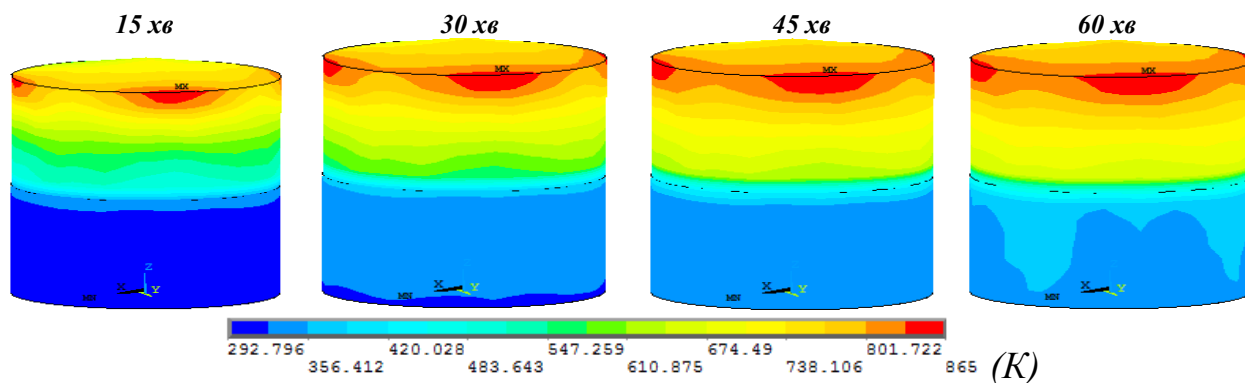


Рисунок 4.28 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за четвертою схемою із його заповненням на 50 % та  $l = 6$  м

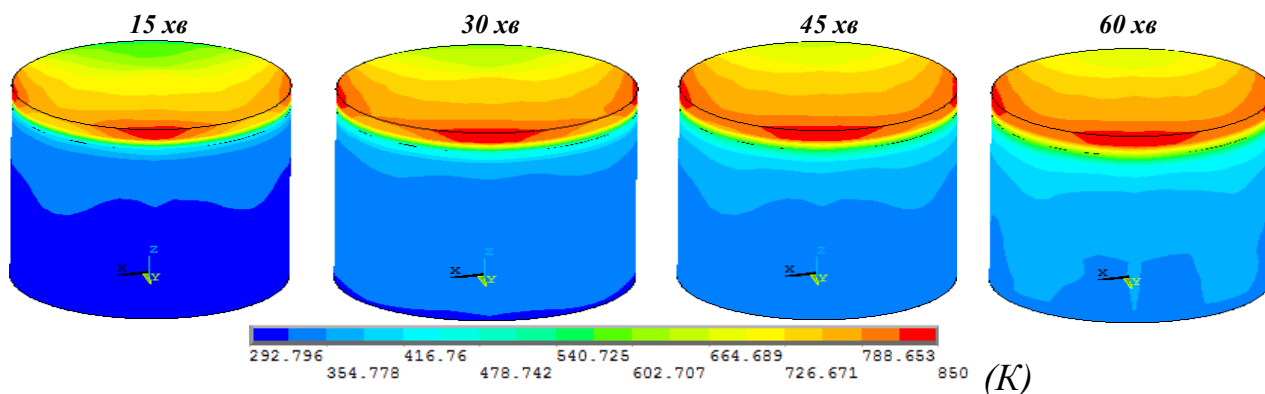


Рисунок 4.29 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за четвертою схемою із його заповненням на 90 % та  $l = 6$  м

Аналіз розподілу температури по стінці резервуару (рис. 4.28 і 4.29) показує, що максимальна температура, яка досягається за 60 хв в

заповненому на 50% об'єму, на 15 K більша ніж в резервуарі, який заповнений на 90% і становить 865 K.

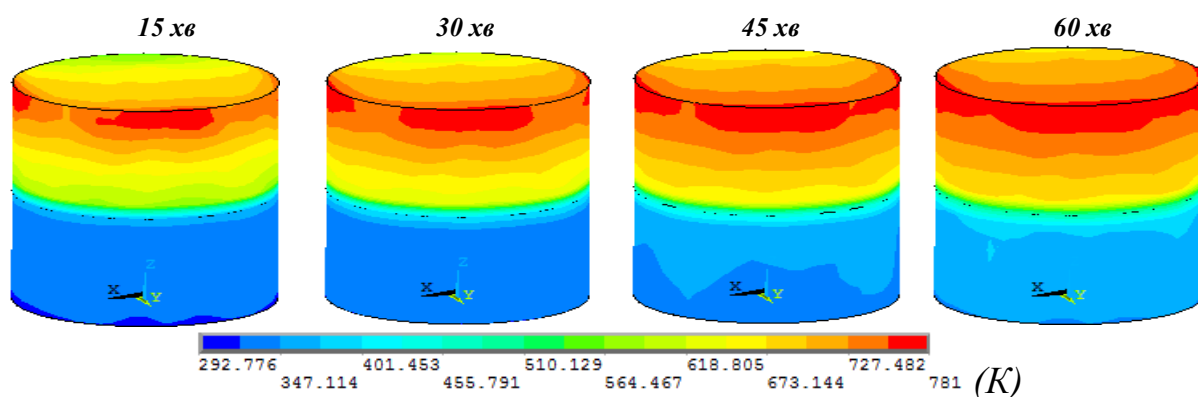


Рисунок 4.30 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за четвертою схемою із його заповненням на 50 % та  $l = 10$  м

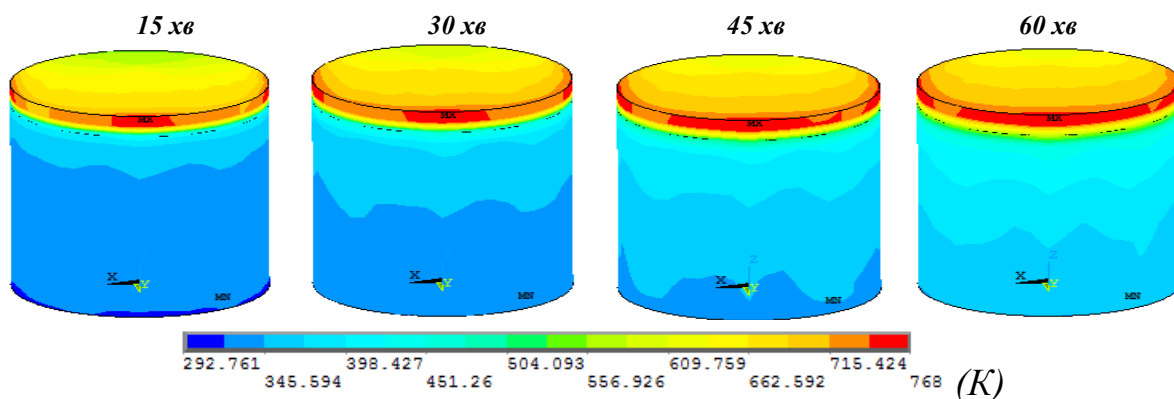


Рисунок 4.31 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за четвертою схемою із його заповненням на 90 % та  $l = 10$  м

Аналіз рисунку 4.30 і 4.31 показує, що при збільшенні віддалі між резервуарами з  $l=6$  м до  $l=10$  м максимальна температура нагріву зменшується і становить 781 K.

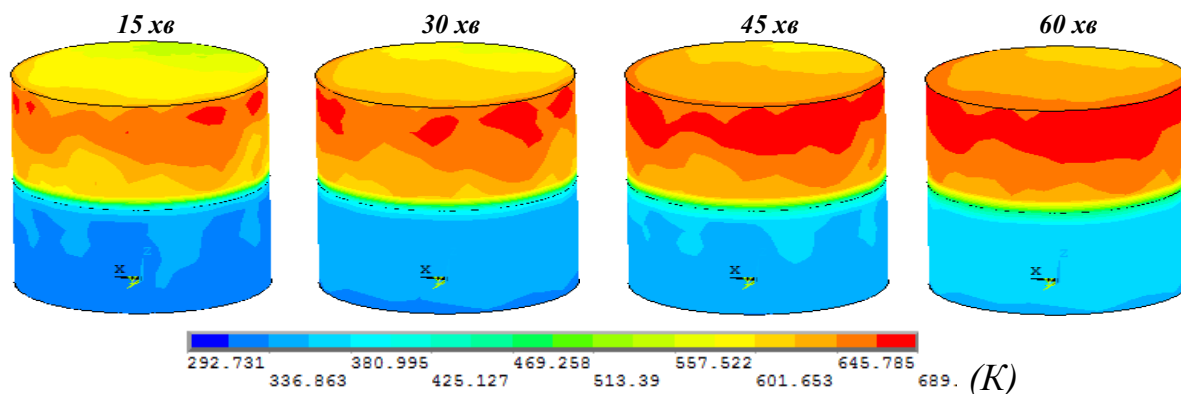


Рисунок 4.32 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за четвертою схемою із його заповненням на 50 % та  $l = 20$  м

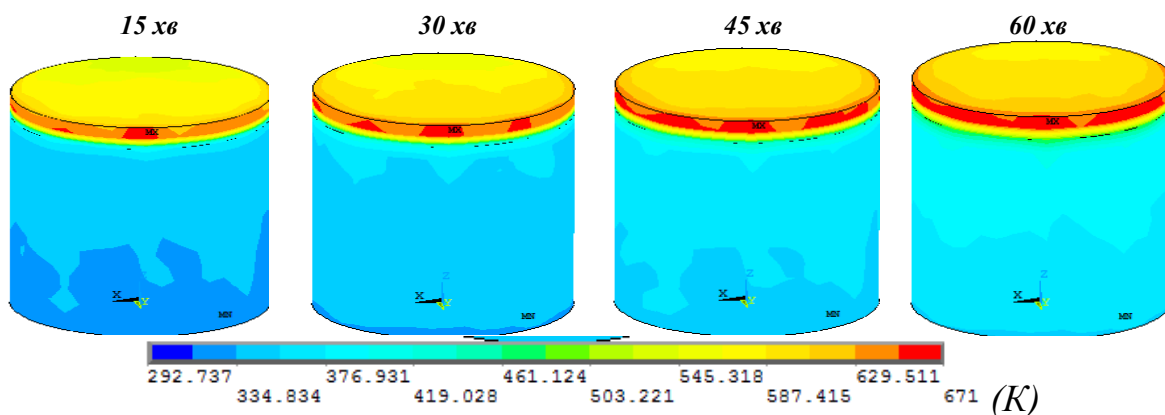


Рисунок 4.33 – Розподілення температури по зовнішній стінці резервуару із тепловим впливом пожежі за четвертою схемою із його заповненням на 90 % та  $l = 20$  м

Аналіз рисунку 4.32 і 4.33 показує, що при віддалі  $l$  між резервуарами рівній 20 м, максимальна температура резервуара рівна 689 К.

Аналіз температурних розподілень, поданих на вказаних рисунках показують, що найбільш небезпечним є сценарій, пожежа коли пожежа відбувається за третьою схемою у випадку коли горить нафтовий факел 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. 4.34, що являють криві максимальної температури нагрівання стінки резервуару у залежності від часу впливу пожежі на суміжних резервуарах.

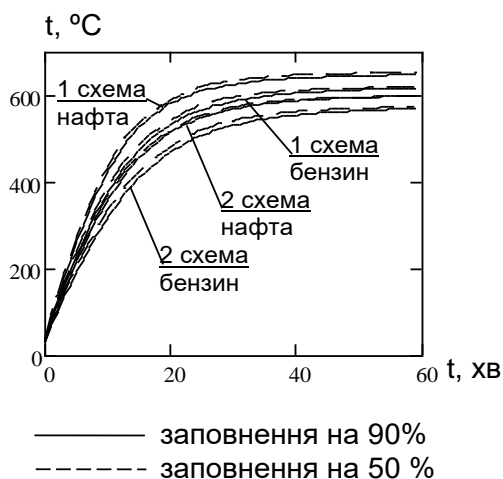


Рисунок 4.34 – Криві максимальної температури нагрівання стінки резервуару у залежності від часу впливу пожежі на суміжних резервуарах, розташованими за 1 та 2 схемами

Найбільш небезпечний сценарій для будь-якого заповнення та будь-якого палива факела відбувається при розташуванні резервуарів із пожежею за 3 схемою (див. рис. 4.6). На рис. 4.35 показані криві максимальної температури нагріву стінки резервуару при різних схемах розташування суміжних резервуарів із пожежею.

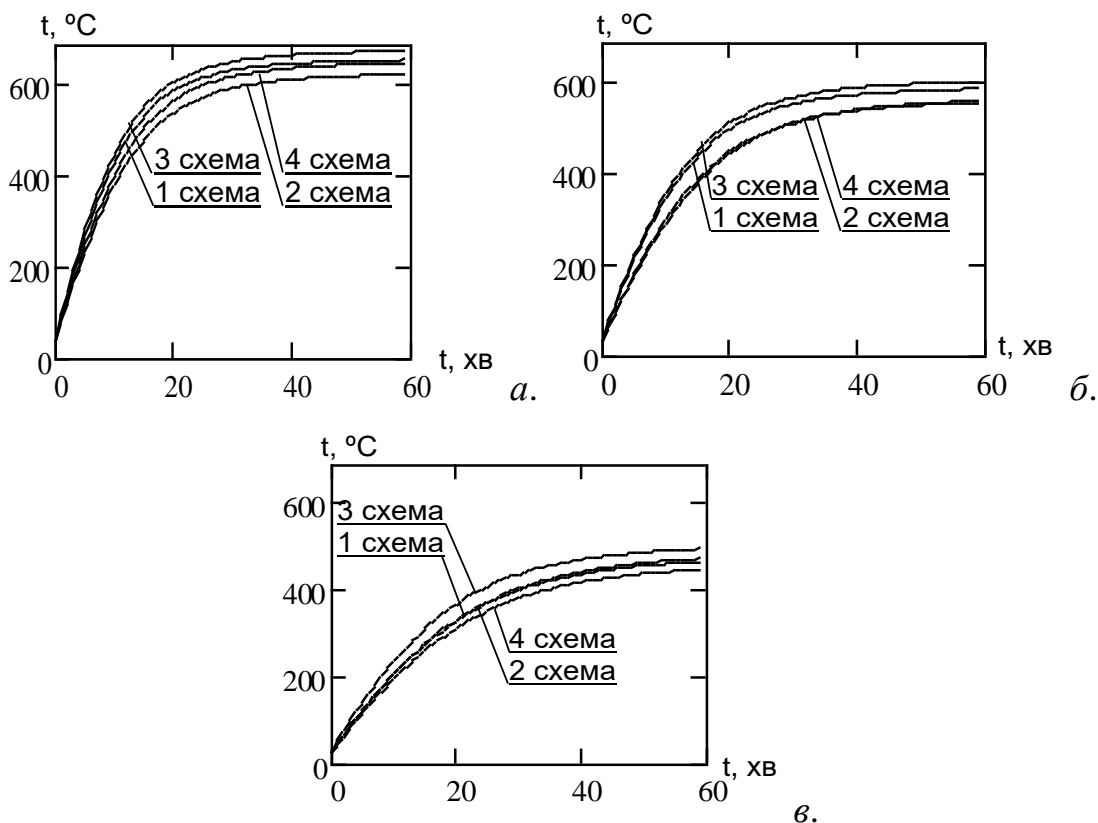


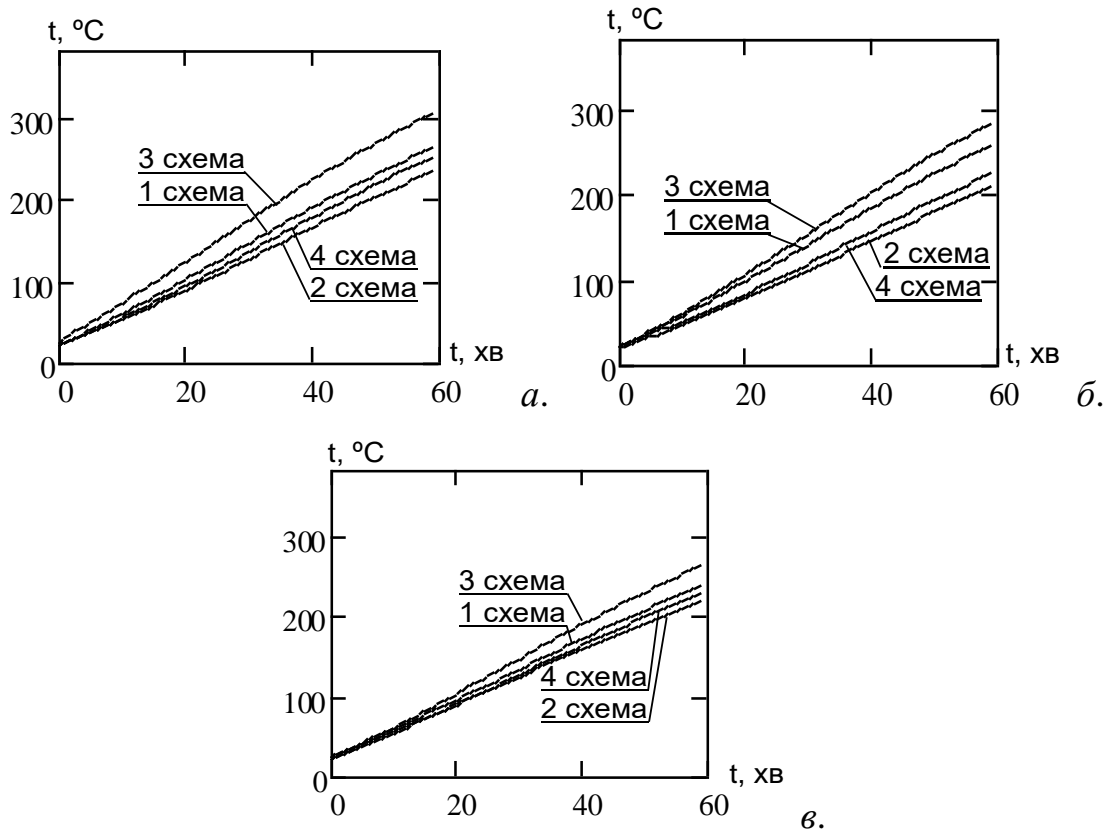
Рисунок 4.34 – Криві максимальної температури нагрівання стінки резервуару у залежності від часу впливу пожежі на суміжних резервуарах, розташованими за різними схемами на різних відстанях від даного резервуара:  
 $a$  – 6 м;  $б$  – 10 м;  $в$  – 20 м

Для аналізу небезпеки була визначена максимальна температура стінки резервуару у місці дотикання її із нафтопродуктом, що зберігається. На рис. 4.36 наведені криві максимальної температури стінки резервуару у місці її дотикання до рідкого нафтопродукту, що зберігається.

Графіки на рис. 4.36 показують, що так само як і максимальна температура стінки резервуару температура його стінки у місці дотикання до рідкого



нафтопродукту найбільша у випадку першої та четвертої схеми розташування резервуарів із пожежею.



*Рисунок 4.35 – Криві максимальної температури стінки резервуара у місці дотикання до рідкого нафтопродукту від резервуарів із пожежею, розташованими за різними схемами на різних відстанях від даного резервуара:*

*а – 6 м; б – 10 м; в – 20 м*

Аналогічні по характеру графіки можна побудувати і для інших умов для резервуару, що досліджується.

Для дослідження залежностей максимальної температури нагрівання стінки резервуара у залежності від відстані між резервуаром, що досліджується, і резервуарами із пожежею нами були побудовані графіки цих залежностей. Побудовані графіки подані на рис. 4.36.

Дані графіки показують очікувану тенденцію зниження максимальної температури нагрівання стінки у залежності до резервуарів із факелами пожежі. На відстані від 6 м до 10 м температура міняється більш інтенсивно, тоді як на відстані від 10 м до 20 м вона зменшується менш інтенсивніше. Крім цього, знову

можна помітити що максимальна температура для резервуарів, заповнених на 50 % та 90 % відрізняється несуттєво.

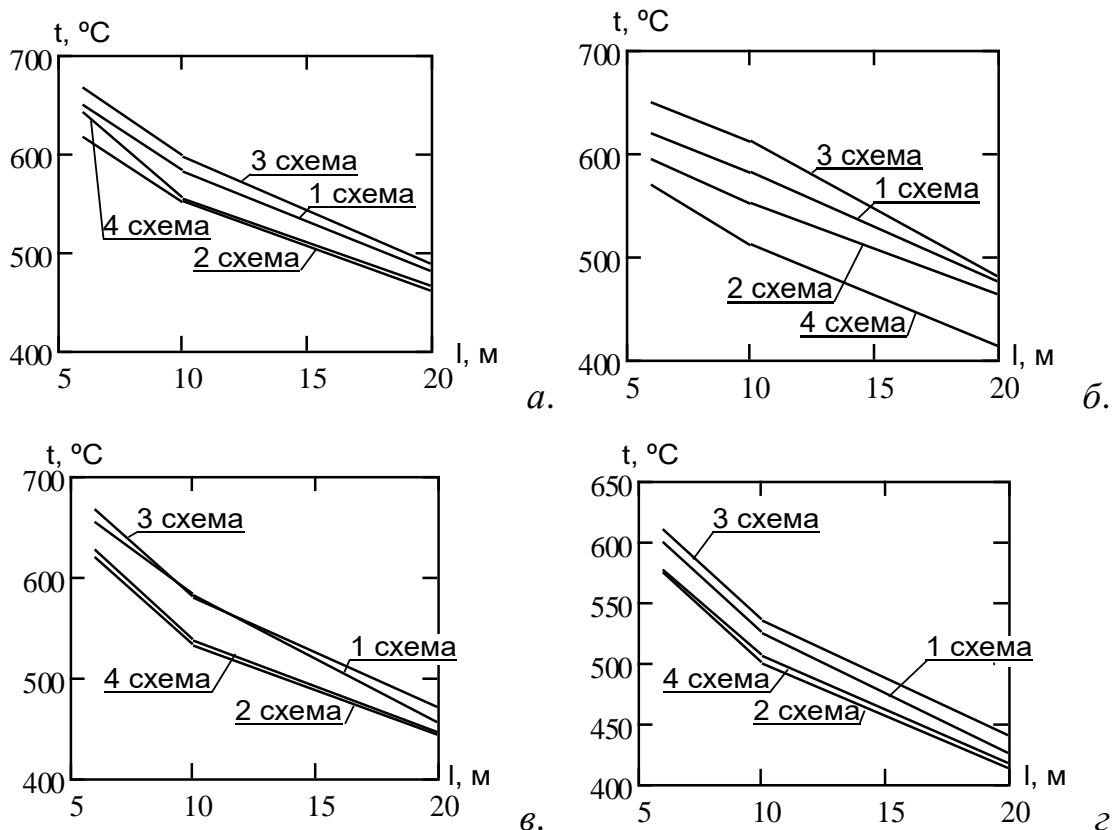


Рисунок 4.36 – Графіки залежності температури нагріву стінки резервуара для різних схем розташування резервуарів у залежності від відстані між резервуарами: а – нафтовий факел, резервуар, заповнений на 50 %; б – бензиновий факел, резервуар, заповнений на 50 %; в – нафтовий факел, резервуар, заповнений на 90 %; з – бензиновий факел, резервуар, заповнений на 90 %

Для дослідження залежностей максимальної температури нагрівання стінки резервуара, що контактує із нафтопродуктом, у залежності від відстані між резервуарами нами були побудовані графіки цих залежностей. Побудовані графіки подані на рис. 4.37.

Побудовані графіки мають цікаву особливість, що полягає у наявності максимуму графіків для резервуарів, заповнених на 50 % при відстані між резервуарами 10 м. Така картина спостерігається для всіх схем розташування резервуарів. Дане явище пояснюється тим, що пляма із найвищими

температурами, переміщується ближче до рівня палива при зміні відстані від 6 м до 10 м, при подальшому збільшенні відстані пляма іде у зворотному напрямку.

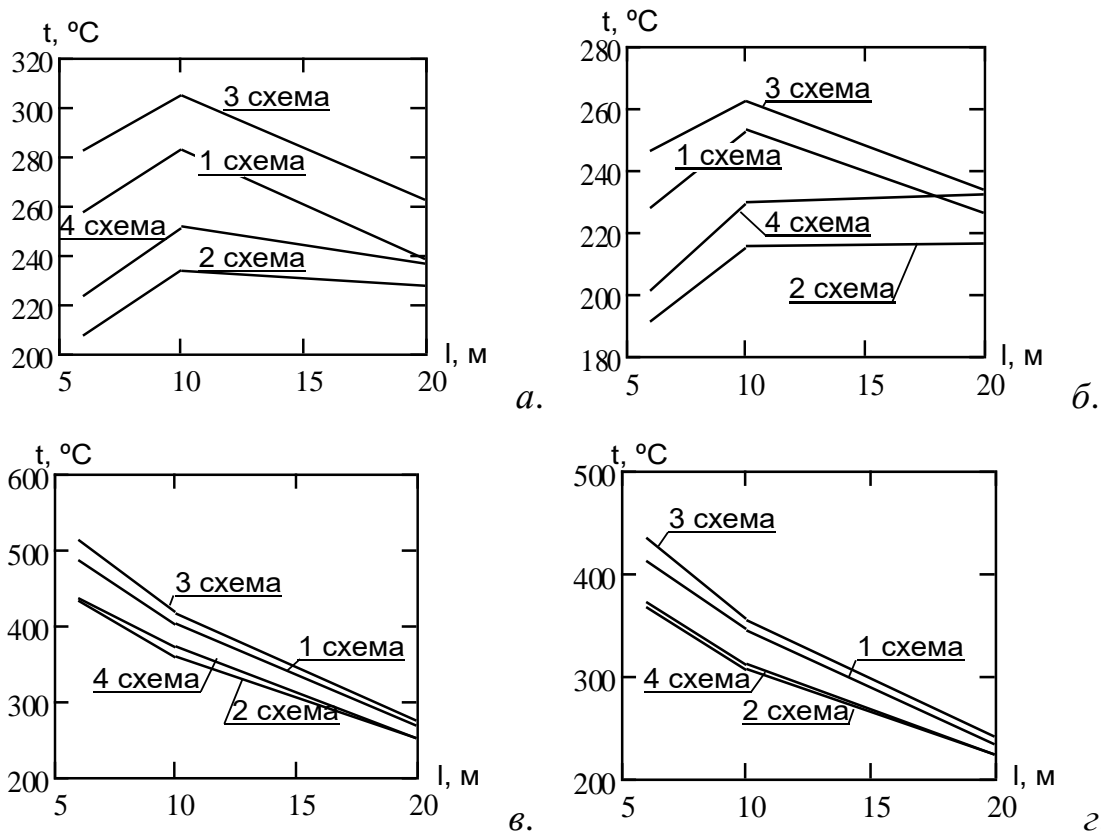


Рисунок 4.37 – Графіки максимальної температури нагрівання стінки резервуара, що контактує із нафтопродуктом у залежності від відстані між резервуарами: а – нафтовий факел, резервуар, заповнений на 50 %; б – бензиновий факел, резервуар, заповнений на 50 %; в – нафтовий факел, резервуар, заповнений на 90 %; г – бензиновий факел, резервуар, заповнений на 90 %

При заповненні резервуара на 90 % характер графіків максимальної температури нагрівання стінки резервуара, що контактує із нафтопродуктом у залежності від відстані між резервуарами повторює характер графіків, що наведені на рис. 4.36.

Оскільки характер графіків для різних схем розташування резервуарів однаковий, а температура відрізняється несуттєво можна побудувати графіки усереднених залежностей для схем розташування резервуарів. На рис. 4.38 наведені побудовані графіки даних залежностей.

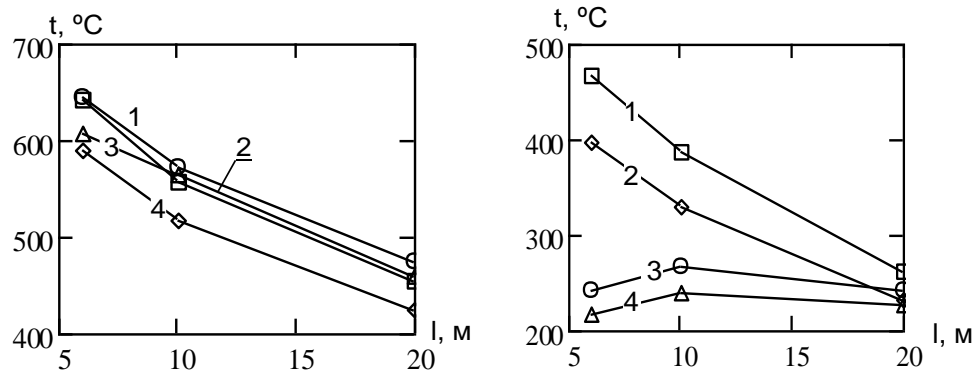


Рисунок 4.38 – Графіки середньої максимальної температури нагрівання зовнішньої стінки резервуара (а) та поверхні, що контактує із нафтопродуктом (б): 1 – нафтовий факел, резервуар, заповнений на 50 %; 2 – бензиновий факел, резервуар, заповнений на 50 %; 3 – нафтовий факел, резервуар, заповнений на 90 %; 4 – бензиновий факел, резервуар, заповнений на 90 %.

Для виконання проектних розрахунків потрібно знати закономірність зміни максимальної температури у залежності від відстані між резервуарами. Враховуючи складний характер розрахунків нами запропоновано визначити регресійні функції для залежностей, графіки яких наведені на рис. 4.38. Для побудовання регресійних залежностей нами було визначено, що вони повинні відповідати поліномам другого порядку. Застосовуючи підхід мінімізації середньоквадратичної незв'язності, були визначені коефіцієнти регресії. Визначені коефіцієнти наведені у табл. 9 та табл. 10.

Таблиця 9

**Коефіцієнти регресії залежностей середньої максимальної температури зовнішньої поверхні стінки резервуара від відстані між резервуарами**

Коефіцієнти регресії $T(l) = a_0 + a_1 l + a_2 l^2, \text{ } ^\circ\text{C}$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	Похибка, %
нафтовий факел, резервуар, заповнений на 50 %	789.608	-27.895	0.609	0.3
бензиновий факел, резервуар, заповнений на 50 %;	675.135	-11.286	0.026	0.25
нафтовий факел, резервуар, заповнений на 90 %;	817.9	-33.99	0.794	0.33
бензиновий факел, резервуар, заповнений на 90 %;	741.699	-29.184	0.669	0.31

Таблиця 10

**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, %
нафтовий факел, резервуар, заповнений на 50 %	167.137	16.527	-0.64	0.4
бензиновий факел, резервуар, заповнений на 50 %;	151.59	13.958	-0.508	0.37
нафтовий факел, резервуар, заповнений на 90 %;	619.717	-28.555	0.536	0.38
бензиновий факел, резервуар, заповнений на 90 %;	528.623	-24.855	0.5	0.35

Отримані дані можна використовувати для прогнозування температури нагрівання стінок резервуару у залежності від відстані між резервуарами.

#### **4.5. Висновки за розділом:**

1. Виконано математичне моделювання процесів теплообміну при пожежі на складі нафтопродуктів, де вони зберігаються у резервуарах із залученням енергетичного рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності, а також методу кінцевих елементів

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

3. Виявлено, що найбільш небезпечною схемою розташування резервуарів є третя схема (див рис. 5.6) при наповненості резервуара на 50 % та горінні сирові нафти у факелі над резервуарами при пожежі.

4. Побудовані регресійні залежності максимальних температур зовнішньої поверхні стінки резервуара та внутрішньої стінки, контактуючої із нафтопродуктом.

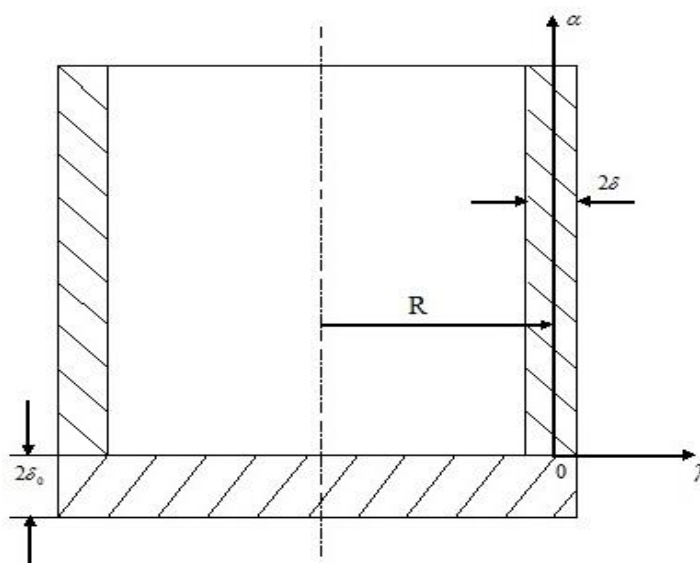
5. Отримані регресійні залежності можна використовувати для проектування нафтобаз при виборі геометричних параметрів резервуарів та відстаней між ними.

## РОЗДІЛ 5

### НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СТІНКИ ТА ДНИЩА ВЕРТИКАЛЬНИХ СТАЛЕВИХ РЕЗЕРВУАРІВ ПРИ ЇХ НАГРІВІ

Із загальної кількості зареєстрованих руйнувань РВС 46.4% аварій супроводжувались масштабними пожежами з травмою людей, із них безпосередньо на пожежах від дії високих температур і тисків руйнувалось 6.4% резервуарів. Механізм руйнування РВС, досить складний і нажалі ще мало вивчений. В той же час, необхідно зауважити, що згідно матеріалів експертиз аварій руйнування РВС відбувається, в основному, внаслідок руйнування найбільш навантаженого конструктивного елемента – вузла з'єднання стінки резервуара з днищем. На сьогоднішній день в Україні не існує методики дослідження температурних напружень в оболонці РВС [106 – 109].

**Постановка задачі:** Змоделюємо РВС циліндричною оболонкою, яка з'єднана на торці з днищем (круглою пластиною) методом електродугової зварки (рис. 5.1). Радіус середньої поверхні циліндричної оболонки рівний  $R$ , а товщина її стінки  $2\delta$ . Товщина днища  $2\delta_0$ . За умов пожежі резервуар нагрівається і інтенсивність випаровування нафтопродукту збільшується. При наявності постійної покрівлі тиск в резервуарі буде збільшуватися.



*Рисунок 5.1 – Осьовий переріз резервуара*

### 5.1 Вихідні рівняння та граничні умови для знаходження напружено-деформованого стану 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  $\gamma$  [107]

$$\frac{d^4 w}{d\alpha^4} + 4\omega^4 w = \frac{2\omega^4 R^2}{\delta \cdot E} \cdot q_n + 4\omega^4 \alpha_t R t(\alpha), \quad (5.1)$$

де  $\omega^4 = \frac{3(1-\nu^2)}{4\delta^2 R^2}$ ,  $t(\alpha)$  – зміна температури оболонки по висоті,  $^{\circ}C$ ;  $E$ ,  $\nu$  –

модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матеріалу оболонки;  $q_n$  – силове навантаження зумовлене тиском, Па.

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

$$\begin{aligned} N_2 &= 2E\delta \left( \frac{w}{R} - \alpha_t t(\alpha) \right), & M_1 &= -\frac{E\delta}{2\omega^4 R^2} \frac{d^2 w}{d\alpha^2}, \\ M_2 &= -\frac{E\delta\nu}{2\omega^4 R^2} \frac{d^2 w}{d\alpha^2}, & z &= \frac{1}{R} \int [(1+\nu)\alpha_t R t(\alpha) - \nu w] d\alpha, \end{aligned} \quad (5.2)$$

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

Осьові напруження циліндричної оболонки  $\sigma_{\alpha\alpha}$  і кільцеві  $\sigma_{\beta\beta}$  знаходимо за формулами [3]

$$\sigma_{\alpha\alpha} = \frac{3M_1}{2\delta^3} \gamma, \quad \sigma_{\beta\beta} = \frac{1}{2\delta} \left( N_2 + 3M_2 \frac{\gamma}{\delta^2} \right), \quad (5.3)$$

де координата  $\gamma$  відраховується від серединної поверхні циліндричної стінки резервуара по її зовнішній нормалі (див. рис. 2.17). У випадку, коли температура  $t(\alpha) = t_1$  постійна, рівняння (1) записується у вигляді

$$\frac{d^4 w}{d\alpha^4} + 4\omega^4 w = \frac{2\omega^4 R^2}{\delta \cdot E} \cdot Q\delta(\alpha) + 4\omega^4 w^*, \quad (5.4)$$

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

$$w^* = \alpha_t R t_1 \quad (5.5)$$

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

$$w|_{\alpha=0} = u|_{r=R}, \quad \frac{dw}{d\alpha}|_{\alpha=0} = 0, \quad \sigma_{rr}|_{r=R} = \frac{Q_1}{2\delta_0}, \quad (5.6)$$

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

## 5.2 Напружено-деформований стан днища РВС.

Для знаходження виразів для  $u$  і  $\sigma_{rr}$ , які входять в першу і третю умову (5.6), змодельємо днище круглою пластиною радіуса  $R$ . Виберемо полярну систему координат  $(r; \varphi)$  початок якої помістимо в центрі пластини (рис. 2.16). Згідно з розв'язком плоскої задачі теорії пружності [4] радіальні переміщення  $u$  круглого днища, нормальні радіальні напруження  $\sigma_{rr}$  і кільцеві напруження  $\sigma_{\varphi\varphi}$  записуються у вигляді [106, 110, 112]

$$u = A_0 r + \frac{1 + \nu_0}{2} \alpha_t^{(0)} t_0 r, \quad (5.7)$$

$$\sigma_{rr} = \frac{E_0}{1 - \nu_0^2} \left[ \frac{du}{dr} + \nu_0 \frac{u}{r} - \alpha_t^{(0)} (1 + \nu_0) \cdot t_0 \right], \quad (5.8)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{E_0}{1 - \nu_0^2} \left[ \frac{u}{r} + \nu_0 \frac{du}{dr} - \alpha_t^{(0)} (1 + \nu_0) \cdot t_0 \right],$$

де  $A_0$  – постійна інтегрування, яка знаходиться з третьої умови (5.6);  $E_0$ ,  $\nu_0$ ,  $\alpha_t^{(0)}$  – відповідно модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу днища;  $t_0$  – температура днища, °C.



З третьої умови (5.6), враховуючи вираз (5.7) і перше рівняння системи (5.8), знаходимо

$$A_0 = \frac{1-\nu_0}{2E_0\delta_0} Q_1 + \frac{(1-\nu_0)\alpha_t^{(0)}t_0}{2}.$$

тоді вираз (7) при  $r = R$  має вигляд

$$u|_{r=R} = \frac{(1-\nu_0)R}{2E_0\delta_0} Q_1 + \alpha_t^{(0)}t_0R, \quad (5.9)$$

Враховуючи всі умови (5.6) розв'язок рівняння (5.4) записується у вигляді

$$w(\alpha) = \alpha_t R t_1 - \frac{R\Delta l Q_1}{1+k_0} e^{-\omega\alpha} (\cos \omega\alpha + \sin \omega\alpha), \quad (5.10)$$

де

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

Зусилля взаємодії  $Q_1$  запишуться таким виразом

$$Q_1 = \frac{4E\delta}{\omega} \frac{\Delta l}{1+k_0}, \quad (5.11)$$

Тоді співвідношення (5.7) остаточно запишеться у вигляді [107]

$$u(r) = \frac{4rk_0\Delta l}{1+k_0} + \alpha_t^{(0)}t_0r, \quad (5.12)$$

Підставивши вираз (5.12) в (5.8), знаходимо температурні напруження в днищі

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\varphi\varphi} = \frac{4k_0E_0\Delta l}{(1-\nu_0)(1+k_0)}. \quad (5.13)$$

Аналіз виразу (5.13) показує, що напруження в днищі є постійними, тобто не залежать від радіуса.

### 5.3 Напружено-деформований стан корпусу резервуара.

Враховуючи співвідношення (5.10), а також (5.2) і (5.3), для температурних напружень в циліндричній стінці РВС запишемо такі вирази [107]:

$$\sigma_{\alpha\alpha}(\alpha, \gamma) = -\frac{3E\Delta l \gamma \psi(\omega\alpha)}{(1+k_0)\delta_0\sqrt{3(1-\nu^2)}}, \quad (5.14)$$

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

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

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

$$\sigma_{\beta\beta}^+(\alpha) = -\frac{E\Delta l}{1+k_0} \left[ \varphi(\omega\alpha) + \frac{3\nu}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \psi(\omega\alpha) \right], \quad (5.15)$$

$$\sigma_{\beta\beta}^-(\alpha) = -\frac{E\Delta l}{1+k_0} \left[ \varphi(\omega\alpha) - \frac{3\nu}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \psi(\omega\alpha) \right]. \quad (5.16)$$

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

Розрахунки проводились за формулами (5.13–5.16) для РВС–1000 при таких параметрах:

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

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

Напруження в днищі резервуара розраховані за виразом (5.13) рівні  $\sigma_{rr} = \sigma_{\phi\phi} = 147$  МПа.

Результати розрахунків за виразами (5.14–5.16) зображені графічно на рис. 5.1–5.4

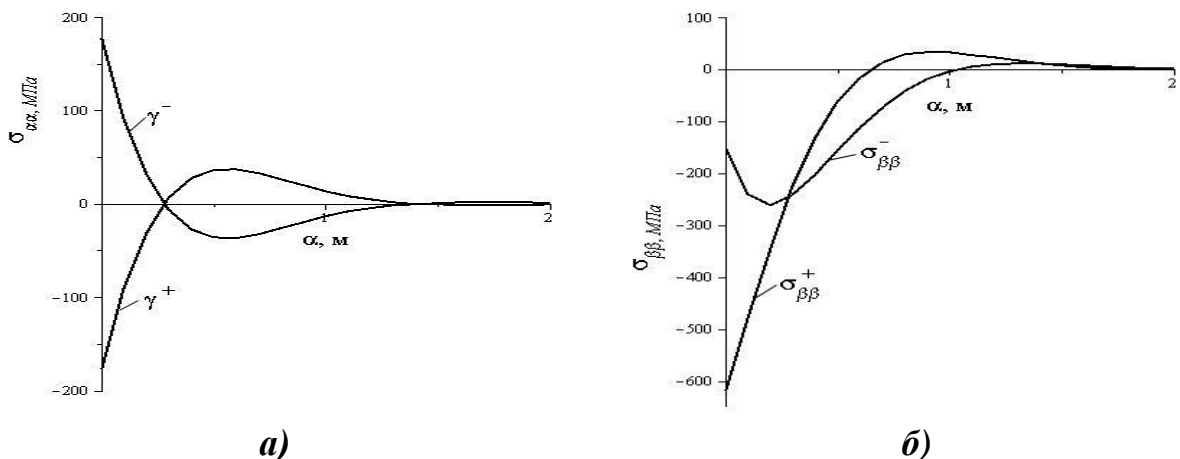


Рисунок 5.2 – зміна осьових **а)** і кільцевих **б)** напружень вздовж координати  $\alpha$

Аналіз графічних залежностей показує, що осьові напруження  $\sigma_{\alpha\alpha}$ , приймають максимальні значення на поверхні  $\alpha=0$  (рис. 5.2 а). 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  $176,86 \text{ МПа}$  [108-112].

Кільцеві напруження  $\sigma_{\beta\beta}$  на поверхні  $\alpha=0$  і точках  $\gamma=\pm\delta$  є стискуючими і по величині рівні  $619,04 \text{ МПа}$ , та  $152,11 \text{ МПа}$  відповідно (рис. 5.2 б). На зовнішній поверхні резервуара ( $\gamma=+\delta$ )  $\sigma_{\beta\beta}^+$  приймають максимальне значення. Максимальне значення напруження  $\sigma_{\beta\beta}^-$  приймають на висоті  $0,25 \text{ м}$  від днища ( $\alpha=0,25\text{м}$ ). Воно рівне  $261,34 \text{ МПа}$ .

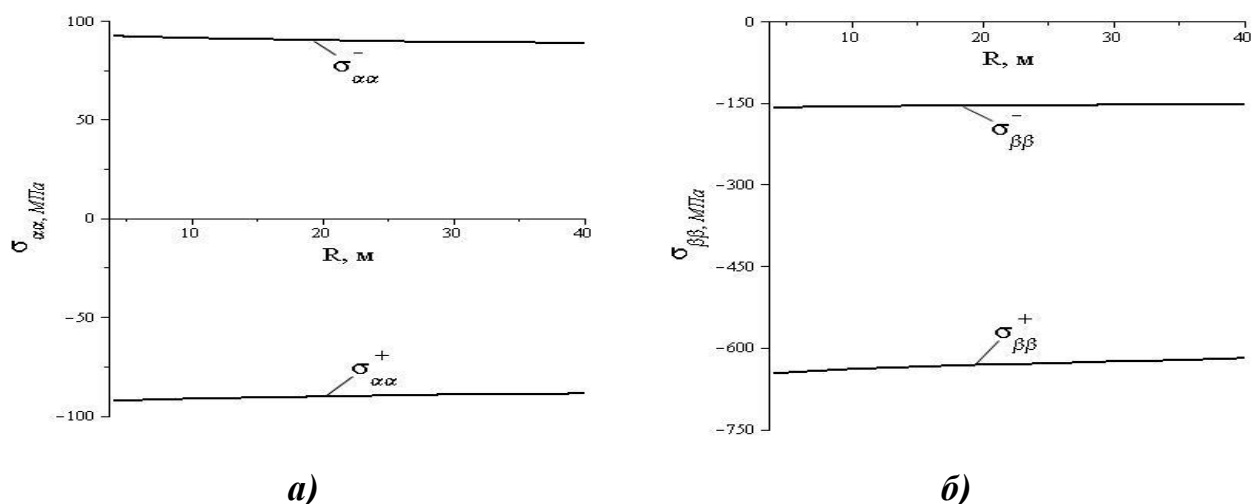


Рисунок 5.3 – Зміна осьових а) і кільцевих б) напружень в залежності від величини радіуса резервуара при  $\delta = 10 \text{ мм}$

На рис. 5.3 показана залежність величини осьових і кільцевих напружень від величини радіуса резервуара. Аналіз залежностей показує, що при збільшенні радіуса резервуара від  $4 \text{ м}$  до  $40 \text{ м}$  і більше величина напружень зменшується не більше ніж на  $5\%$ .

Аналіз рис. 5.4 показує, що при збільшенні товщини стінки резервуара від  $10 \text{ мм}$  до  $20 \text{ мм}$  величина осьових напружень збільшується на  $93\%$  (рис. 5.4а), а кільцеві напруження по величині зменшуються на  $3\%$  (рис. 5.4б).

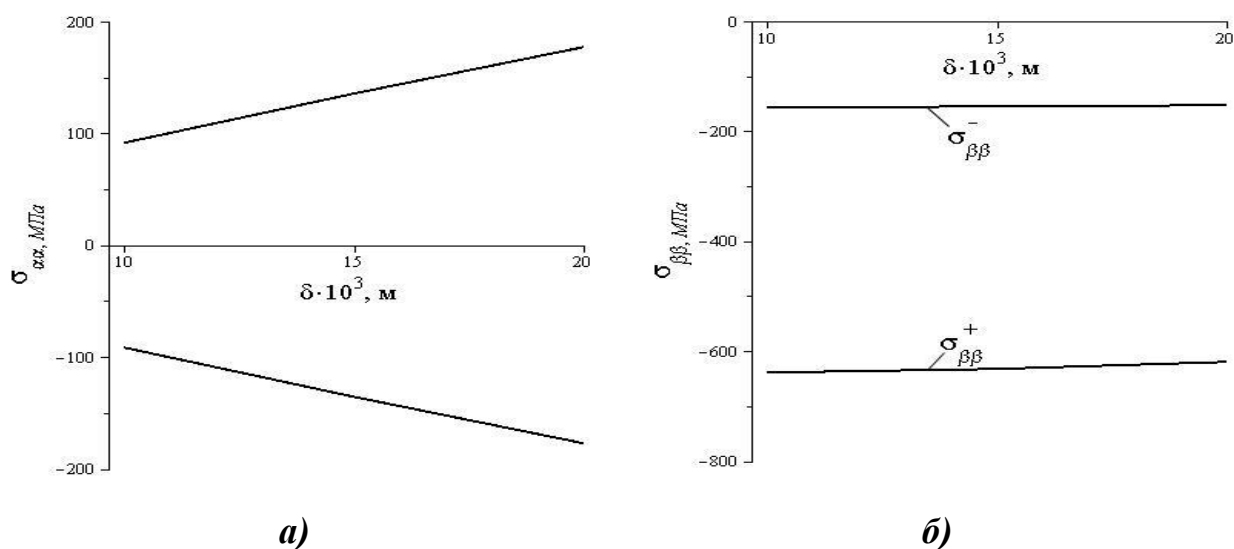


Рисунок 5.4 – Зміна осьових **а)** і кільцевих **б)** напружень в залежності від товщини стінки резервуара при  $R = 5.2$  м

#### 5.4. Висновки за розділом:

1. 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.

2. 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.

3. При зміні радіуса резервуара від 4 м до 40 м і більше величина напружень зменшується не більше ніж 5%.

4. 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 підгрунтя 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  $10\text{мм} \dots 20\text{ мм}$  максимальні осьові напруження збільшуються на 97 %, а кільцеві – на 3%. Із збільшенням радіусу резервуару від 5 м 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  $550\text{ }^\circ\text{C}$  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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ВБН В.2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа/Пожежна безпека, том 4. 137 с.
2. Гришин В.В. Состояние и проблемы противопожарной защиты резервуаров // Теоретические и экспериментальные вопросы автоматического пожаротушения: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1987. – С. 24-32.
3. Волков О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами. – М.: Недра, 1984. – 151с.
4. Розенштейн И.М. Аварии и надежность стальных резервуаров. – М.: Недра, 1995. – С.44-172.
5. Наказ МНС України №658 від 24.12.2008 р. «Про затвердження Правил пожежної безпеки для об'єктів зберігання, транспортування та реалізації нафтопродуктів».
6. Швырков С.А., Горячев С.А, Сорокоумов В.П. и др. Статистика квазимгновенных разрушений резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т.16. – №6.
7. Сафарян М.К. Металлические резервуары и газгольдеры. – М.: Недра, 1987. – с.30-32.
8. Кондрашова О.Г., Назарова М.Н. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров // Нефтегазовое дело. – 2004 (<http://www.ogbus.ru>).
9. Швырков С.А., Батманов С.В. Анализ статистических данных квазимгновенных разрушений вертикальных стальных резервуаров // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2008, №1 (9). – С.56-67.
- 10.Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Влияние пожара на резервуар с нефтепродуктом // Вестник национального автомобильно-дорожного университета; Сб.науч. тр. – Харьков: ХНАД, 2005. – Вып. 29. – С.131-133.

- 11.Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Стохастическая модель нагрева резервуара с нефтепродуктами под тепловым воздействием пожара // Пожаровзрывобезопасность. – М.: 2007. – Т. 16, №4. – С. 37-43.
12. Анализ аварийных разрушений резервуаров на складах нефти и нефтепродуктов и разработка рекомендаций по ограничению площади разлива: Отчет о НИР 1.419/96 / А.Н. Швырков, С.А. Горячев, С.А. Швырков. – М.: МИПБ МВД РФ, 1997 – 100 с.
- 13.Богач А.А., Швырков С.А. Моделирования процесса разлива нефти и площадке терминала при квазимгновенном разрушении РВСПК – 100000 // Сборник трудов Седьмой конференции пользователей программного обеспечения САД-FEMGmbH (Москва, 23-24 мая 2007 г.). Под ред. А.С. Шадского. – М.: Полигон-пресс, 2007. – С.428-442.
- 14.Ференц Н.О. Прогнозування аварійних ситуацій і аварій на дільниці риформінгу нафтопереробного підприємства / Н.О. Ференц, С.О. Ємелянєнко // Зб. наук. Праць «Пожежна безпека». – Львів: ЛДУ БЖД, 2010. №16. – С.71-77.
- 15.Басманов О.Є. Теоретичні основи попередження каскадного розповсюдження пожежі в резервуарних парках з нафтопродуктами і підвищення ефективності її ліквідації: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека» / Олексій Євгенович Басманов; Ун-т цивільного захисту України. – Х., 2006. – 35 с. – Біліогр. с. 28-31.
- 16.Басманов А.Е. Регрессионная модель нагрева стенки резервуара при пожаре в резервуарном парке / А.Е. Басманов // Интегровані технології та енергозбереження. – 2005. – №3. – С.47-52.
- 17.Цвигун А., Чучковский В.О пожаробезопасности резервуаров различных конструкций на предприятиях магистрального транспорта нефти // Бюллетень пожежної безпеки, 2000, №2(4).



18. Шароварников А.Ф. Новые средства и способы тушения нефти и нефтепродуктов // Транспорт и хранение нефтепродуктов. М.: ЦНИИТЭ Нефтехим, 1996.
19. Безродный И.Ф., Кореневский А.Н., Кореневская А.Н. Тушение пожаров в резервуарных парках за рубежом: Обзорная информ. – М.: ГИЦ МВД СССР, 1990.
20. Яковлев В.С. Хранение нефтепродуктов. Проблемы защиты окружающей среды. – М.: Химия, 1987.
21. Безбородный И.Ф., Гилетич А.Н., Меркулов В.А. Тушение нефти и нефтепродуктов. Пособие. М.: ВНИИПО, 1996. 216 с.
22. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. М.: АН СССР, 1961.
23. Блинов В.И., Худяков Г.Н., Петров И.И., Реутт В.Ч. О движении жидкости в резервуаре при перемешивании ее струей воздуха // Механизм тушения пламени нефтепродуктов в резервуарах. М.: Изд. Мин. Коммунального хозяйства РСФСР., 1958.
24. Молчанов В.П., Шароварников А.Ф., Воевода С.С., Шароварников С.А., Крымов А.М. Закономерности тушения нефтепродуктов в условиях интенсивного движения жидкости при подаче пены в слой горючего // Научно-техническое обеспечение деятельности государственной пожарной службы: Сб. науч. тр. М.: ВНИИПО, 1996. С. 129 – 137.
25. Петров И.И., Реутт В.Ч. Тушение пламени жидких топлив методом перемешивания // Новые способы и средства тушения пламени нефтепродуктов. М.: Гостоптехиздат, 1960. С. 30-83.
26. Сучков В.П., Молчанов В.П. Варианты развития пожара в хранилищах нефтепродуктов // Пожарное дело. 1994. №11. С. 40-44.
27. Сучков В.П., Грабко С.Е., Молчанов В.П. Варианты развития пожара в хранилищах нефтепродуктов // Пожарное дело. 1993. №7-8. С.17 – 19.

28. Актуальные проблемы обеспечения устойчивости к возникновению и развитию пожара технологий хранения нефти и нефтепродуктов. Тематический обзор. М.: ЦНИИТ Нэфтехим. 68 с.
29. Шароварников А.Ф. Молчанов В.П., Воевода С.С., Шароварников С.А. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. Москва, 2007. 380 с.
30. Application of foam in the petroleum industry // Fire Int. 1986. Volume 10. №98. P. 582 (148/3-1).
31. Call for a fair hearing for monitors // Fire. 1987. №983. P. 35.
32. Foam system well proven against oil tank fires // Fire. 1988. №993. P. 40.
33. Nash P., Whittle J. Fighting Fires in Oil storage Tanks. Using base injection of foam: Part 2 // Fire Technol. 1978. Volume 14. №2. PP. 147 – 158.
34. Nash P., Whittle J. Fighting Fires in Oil storage tanks. Using Base Injection of foam: Part 1 // Fire Technol. 1978. Volume 14. №1. PP. 15 – 27.
35. The reason we use light Water AFFF/AIC is because we fight // Hazardous Cargo Bulletin. 1988. Volume 4. P. 67.
36. Определение нормативного запаса пенообразователя для тушения горючих жидкостей в резервуарах: Рекомендации. – М.: ВНИИПО, 1986.
37. Молчанов В.П., Сучков В.П. Варианты развития пожара в хранилищах нефтепродуктов // Пожарное дело. – 1994. - №11.
38. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. в 4;х т. – Т.1. Кн.1. – М.: Наука, 1978. – 496 с
39. Воробьев В.В. Дополнительные защитные преграды для снижения пожарной опасности разлива нефти и нефтепродуктов при разрушениях вертикальных стальных резервуаров: Автореф. канд. техн. наук. М.: Академия ГПС МЧС России, 2008.
40. Власов А.В. Проектирование и эксплуатация резервурных парков для нефти и нефтепродуктов: обзор. Информ. Вып. 10(28)/ А.В. Власов, Л.А. Ионцев. – М.: ВНИИОЭНГ, 1982. – 60 с. – (Нефтяная промышленность. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов).

41. Розміщення резервуарів у резервуарному парку // Основи моніторингу технологічних об'єктів нафтогазової галузі: навч. посібник. Г.Н.Семенцов, М.М. Дранчук, О.В. Гутак, Я.Р. Когут. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010.
42. Матрынюк В.Ф. Барьеры безопасности в резервуарных парках нефти и нефтепродуктов / В.Ф. Мартынюк, Ю.Н. Сайгина // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2013. - №1 – с. 50-53.
43. Волков О.М. Современные технологии обеспечения пожарной безопасности резервуаров для нефти и нефтепродуктов // Тран. и хранен. Нефтепрод. – 2002. Вып 5-6. – с. 18-21.
44. Швырков С.А., Семиков В.Л., Швырков А.Н. Анализ статистических данных разрушений резервуаров // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. – 1996. Вып. 5. – с. 39-50.
45. Галлеев В.Б. Аварии резервуаров и способы их предупреждения: Научно-техническое издание / В.Б. Галлеев, Д.Ю. Гарин, О.А. Закиров и др. Под ред. проф. Налеева В.Б. и Шарафиева Р.Г. – Уфа: ГУП «Уфимский полиграфкомбинат», 2004 – с. 5-18.
46. Вотинов А.В. Оценка структурных параметров сталей и ресурсных характеристик резервуаров для хранения нефтепродуктов в условиях длительной эксплуатации: авт. дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / КубГТУ. – Краснодар, 2006. – 24 с.
47. Лебедева Л.Н. Лавинные выбросы при разрушении резервуаров с жидкостями / Л.Н. Лебедева, М.В. Лурье, А.Н. Швырков // Инженерно-физический журнал. – 1991. – Т. 61. - №5. – С. 726-731.
48. Швырков С.А. Обеспечение пожарной безопасности нефтебаз ограничением разлива нефтепродуктов при разрушениях вертикальных стальных резервуаров: дис. канд. техн. наук / Академия ГПС МВД России. – М., 2001. 180 с.
49. Кондаков Г.П. Проблемы отечественного резервуаростроения и возможные пути их решения // Промышленное и гражданское строительство. – 1998, №5. – с. 24-26.

50. Исследование резервуаров для хранения нефтепродуктов при атмосферном давлении для Комитета по техническим вопросам и безопасности в нефтяной и нефтехимической промышленности Сингапура: Пер. с англ. / Р. Питблэдо, Д. Уотерс, Х. Крун. – Лондон: Техника Лимитед, 1990. С. 10-20.
51. Greenspan H.P., Young R.E. Flow over a containment dyke // J. Fluid Mechanics/ - 1978. Vol. 87. Part. 1. app. 179-192.
52. Землянский А.А. Принципы конструирования и экспериментально-теоретические исследования крупногабаритных резервуаров нового поколения. – Саратов: Саратов. гос. техн. Ун-т, 2005. – С. 3-7.
53. Зигель Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл. – М. : Мир, 1975. – 936 с.
54. Швырков С.А. Анализ статистических данных разрушений резервуаров / С.А. Швырков., В.Л. Семиков, А.Н. Швырков // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. – 1996. – Вып. 5. – С. 39-50.
55. Боровиков В. Можливі сценарії розвитку пожеж в резервуарах для зберігання нафти і нафтопродуктів // Інтернет журнал F+S: технології безпеки і протипожежної захисту, 2014 (<http://security-info.com.ua/>)
56. ДСТУ 2272-93. Пожежна безпека. Терміни і визначення.
57. «Правила технічної експлуатації магістральних нафтопроводів» РД 39-30-114-78 (ПТЭ МН), затверджені 14.12.1978 р. Міннафтопром СРСР.
58. Мартынюк В.Ф., Сайгина Ю.Н. Барьеры безопасности в резервуарных парках нефти и нефтепродуктов // Производственная безопасность: УКАНГ 1 – 2013, С. 50-53.
59. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
60. Болонний В. Т. Розрахунок повного коефіцієнта тепловіддачі від нафти в навколишнє середовище для неізотермічного нафтопроводу // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ : всеукр. наук.-техн. журн. - Івано-Франківськ : Факел. - 2004. - №1. С. 56-60.

61. Павлюк Ю.Е. Аналіз пожежної небезпеки технологічних процесів виробництв: Навчальний посібник / Ю.Е. Павлюк, Н.О. Ференц. – Львів: ЛДУБЖД, 2008. – 170 с.
62. Клубань В.С., Петров А.П., Рябиков В.С. Пожарная безопасность предприятий промышленности и агропромышленного комплекса. – М.: Стройиздат, 1987. – 477 с.
63. ANSYS, ANSYS 9.0 Manual Set, ANSYS Inc., Southpoint, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA.
64. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. в 4-х т. – Т.1. Кн.1. – М.: Наука, 1978. – 496 с.
65. ДБН 360-92\*\* «Містобудування. Планування та забудова міських та сільських поселень».
66. Наказ МНС України №575 від 13.03.2012 року «Статут дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту».
67. Наказ МНС України від 16 лютого 2004 р. №75 «Інструкція щодо гасіння пожеж в резервуарах і резервуарних парках» НАПБ 05.035. – 2004.
68. EN 1994-1-2:2005 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules - Structural fire design
69. Heat transfer properties of engine oils / S. Wrenick, P. Sutor, H. Pangilinan, E.E. Schwarz / Proceedings of WTC2005 World Tribology Congress III, Washington, D.C., USA, September 12-16, 2005.
70. Li S.C., 2004. Oil Tank Fire Statistical Analysis, Fire Control Theory Research 04, p. 0117.
71. Yao Y.T., 2006. Oil Tank Fire Mode and Behavior of the Fire, Natural Gas and Oil 27, p. 20.
72. Zhao H.H., 2004. Oil Tank Fire Characteristics of Small Size Experimental Study, Fire Control Theory Research 04, p. 26.
73. Веревкин С.И., Ржавский Е.Л. Повышение надежности резервуаров, газгольдеров и их оборудования. М., Недра, 1980, 284 с.

74. Петров И.И., Реутт В.Ч. Тушение пламени горючих жидкостей, изд. МКХ РСФСР.: Москва – 1961, 140 с.
75. Блинов В.И. О трех режимах горения жидкостей в резервуарах. Известия АН СССР, ОТН, 4, 115, 1956.
76. Блинов В.И., Худяков Г.Н., Петров И.И. О распределении температуры в нефтепродуктах, сгорающих в резервуарах. Информационный сборник ЦНИИПО, 1957.
77. Павлов П.П., Хованова А.М. О горении нефтей и нефтепродуктов со свободной поверхности. Баку, 1955.
78. Холл А.Х. Вскипание нефти при горении в резервуарах. *Mechanical Engineering*, vol. 47, №27, 1925.
79. Мамиконянц Г.М., Пауль Н.К. Причины вскипания и выбросы горячей нефти из резервуаров и борьба с ними. «Нефтяное хозяйство», №10, 5, 1926.
80. Wei D., Zhao D.L., 2004. Experimental Study on the Burning Rate of Oil Tank Fire After, *Journal of Combustion Science and Technology* 04, p. 287.
81. Fu Z.M., 2003. Japanese Hokkaido Shan Small Animal Husbandry Oil Tank Fire After and Reflection, *Fire Fighting and Rescue Work Innovation and Fire Fighting Disciplines* 3, p. 54.
82. Wang Z.X., 1987. Mchanism of Oil Tank Fire, *Journal of Engineering Thermophysics* 11, p.185.
83. Гольбенберг И.С., Бызер Л.Я., Ашмян В.М., Фредлин М.Л. Монтаж технологического оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов, изд. «Химия», Москва. – 1967, с. 305-328.
84. Хоботько В.И., Эстрин Р.Я., Сулейманов М.М. Противопожарная безопасность и защита на предприятиях нефтяной промышленности. Справочник. М., Недра, - 1982, 284 с.
85. Волков О.М, Проскуряков Г.А. Пожарная безопасность на предприятиях транспорта и хранения нефти и нефтепродуктов. М., Недра, 1981, - 256 с.

86. Правила пожарной безопасности в нефтяной промышленности ППБО – 85 / сост.: В.И. Хоботько, А.С. Агаев, И.С. Марченко и др. – М.: Недра, 1987. – 152 с.
87. Баратов А.Н., Иванов Е.Н. Пожаротушения на предприятиях химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. М., «Химия», 1971, 416 с.
88. Иванов Е.Н. Основы пожарной защиты нефтеперерабатывающих заводов. М., «Химия», 1977, 144 с.
89. Иванец К.Я., Лейбо А.Н. «Оборудование нефтеперерабатывающих заводов и его эксплуатация» изд. Химия, Москва 1966, 399 с.
90. Губин В.Е. и др. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепродуктов, М.: изд. «Недра», 1968.
91. Эмирджанов Р.Г., Лемберанский Р.А. Основы технологических расчетов в нефтепереработке и нефтехимии: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Химия, 1989. – 192 с.
92. Бунчук В.А. Транспорт и хранение нефти, нефтепродуктов и газа. М.: «Недра», 1977. – 366 с.
93. Пожарная безопасность нефтебаз и объектов магистральных трубопроводов. Глебов В.С., Тазеев Г.С. изд. 2-е, перероб. И доп. М., изд-во «Недра», 1972 г., 192 с.
94. Г.К. Лебедев, В.Г. Колесников, Г.Е. Зиконов, О.Н. Лойков та др. Правила технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту / Государственный комитет СССР по обеспечению нефтепродуктами. – М.: Недра, 1988, - 269 с.
95. Рудил М.Г., Смиртнов Г.Ф. Проектирование нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов. – Л.: Химия, 1984. – 256 с.
96. Правила и инструкции по технической эксплуатации металлических резервуаров и очистных сооружений. М.: «Недра», 1977, 464 с.
97. 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.
- 98.А.М. Домінік, В.М. Байтала. М.М. Семерак, В.В. Чернецький  
Вогнестійкість циліндричної колони в умовах пожежі // Пожежна безпека: зб. наук. прац. – 2013 – № 23 – С. 76-80
- 99.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: предупреждение и ликвидация” Минск: НИИ ПБ и ЧС Республики Беларусь. 2013. – №2(34). – С. 101 – 107.
100. Чернецький В.В. Організація управління силами та засобами цивільного захисту при гасінні лісових пожеж в гірській місцевості Карпатського регіону/ Чернецький В.В., Кочкодан Т.Й. // Пожежна безпека: зб. наук. праць. – 2012. – №21.– С. 177 – 182.
101. Семерак М.М. 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.
102. В.В. Чернецький. 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.
103. Семерак М.М. 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.
104. Семерак М.М. 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.



105. Ентус Н.Р. Техническое обслуживание и ремонт резервуаров – М.: Химия, 1982 – 240 с.
106. Подстригач Я.С., Коляно Ю.М. Неустановившиеся температурные поля и напряжения в тонких пластинках. – Киев: Наук. думка, 1972. – 308 с.
107. Подстригач Я.С., Швец Р.Н. Термоупругость тонких оболочек. – Киев: Наук. думка, 1978 – 343 с.
108. Термомеханика. Библиографический указатель отечественной и иностранной литературы за 1965-1976 г.г. (Ю.М. Коляно, М.М. Семерак, О.А. Яворская. – Львов: Изд-во Львов.науч.библ. АН УССР, 1976. – 836с.
109. Термомеханика. Библиографический указатель отечественной и иностранной литературы за 1977-1981 г.г. в трех книгах (О.А. Яворская, Ю.М. Коляно, М.М. Семерак. – Львов: Изд-во Львов.науч.библ. АН УССР, 1986. – кн. 1 – 354 с., кн. 2 – 364 с., кн. 3 – 397 с.
110. Афанасьев В.А., Бобрицкий А.В. Сооружение резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. – М.: Недра, 1981 – 192 с.
111. Клепоносов Н.Н., Сорокин А.Н. Пожарная защита объектов нефтяной и газовой промышленности. – М.: Недра, 1983 – 192 с.
112. Голованов В.И. «Расчет огнестойкости конструкций из стали с повышенными показателями огнестойкости для объектов нефтегазовой промышленности / В.И. Павлов // Пожарная безопасность. – 2007. - №4. – С. 72-77.