

створює високу пожежну небезпеку таких об'єктів, а пожежі, що на них виникають, наносять значні матеріальні збитки і часто призводять до загибелі людей.

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

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

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

3. Зауваження.

У якості зауважень слід зазначити наступне:

До автореферату:

- у розділі «актуальність теми» (с. 1) четвертий абзац логічно було б після слів «... підвищення ефективності забезпечення пожежної безпеки резервуарних парків зберігання нафтопродуктів» додати «...і зменшення негативного впливу небезпечних чинників таких пожеж на особовий склад та протипожежну техніку пожежно-рятувальних підрозділів»;

- у розділі «мета роботи» (с. 2) у редакції першої задачі допущено помилку. Замість «... виявити шляхи їх підвищення» треба було викласти «... виявити шляхи її підвищення», тобто пожежної безпеки;

- доречно було б сформулювати 6 задач досліджень, а не 4, що більшою мірою відповідає фактичному обсягу проведених досліджень;

- у розділі «наукова новизна отриманих результатів» (с. 2-3) не зовсім вдало сформульовано друге положення, у наведеній редакції воно сприймається як звітність про виконану роботу, а не як наукова новизна;

- розділ «практичне значення роботи» (с. 3) викладено дуже стисло, доречно було б конкретизувати задекларовані передумови підвищення ефективності забезпечення пожежної безпеки резервуарних парків зберігання нафти і нафтопродуктів з наявністю вертикальних сталевих резервуарів;

- ключові слова (с. 22-23), викладені українською та російською мовами, не співпадають з їх англійською редакцією.

До дисертації вцілому:

Всі наведені зауваження до автореферату так само відносяться і до дисертації. Слід зазначити, що практичну частину впровадження результатів значного обсягу розроблених методик, одержаних результатів моделювання, виявлених особливостей впливу нестационарних теплових процесів в конструкціях вертикальних сталевих резервуарів, які відбуваються внаслідок дії теплових потоків, на їх цілісність, розкрито не повною мірою.

Зауваження не впливають на цілком позитивне сприймання роботи, яку викладено сучасною українською технічною мовою з дотриманням застандартизованої термінології. Особливо слід відзначити якісне оформлення ілюстраційних матеріалів дисертації, а також відповідність автореферату змісту і структурі дисертації, а також їх відповідність вимогам методичних рекомендацій ДАК МОН України.

4. Найбільш суттєві наукові результати, отримані особисто здобувачем і їх новизна.

Виявлено особливості впливу нестационарних теплових процесів в конструкціях вертикальних сталевих резервуарів, які відбуваються внаслідок дії на них теплових факторів пожеж, на їх цілісність. У дисертаційній роботі задекларовано, що:

Уперше 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.

- *Уперше* визначено термонапружений стан вузла з'єднання циліндричної стійки та днища резервуару за умов пожежі;
- *Уперше* розроблено математичну модель аналітичного та визначено інтенсивність теплових потоків між резервуарами при пожежі з урахуванням зміни величини теплового потоку з часом;
- *Уперше* проведено математичне моделювання та визначено динаміку теплових процесів у вертикальних сталевих резервуарах ємністю 75 000 м³ з подвійною стінкою.
- Розглянуто чотири схеми розміщення резервуарів, що горять та їх вплив на один резервуар який не горить.
- *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.

5. Обґрунтованість та достовірність отриманих наукових результатів забезпечено використанням відомих систем диференціальних рівнянь теорії нестационарної теплопровідності та теплообміну для резервуарів в умовах пожежі. Температурні напруження вузла з'єднання бокової стінки та днища резервуара досліджувалися з використанням рівнянь теорії термопружності тонких циліндричних оболонки і пластин. Числові результати аналітичних досліджень якісно та кількісно узгоджуються з результатами одержаними методом кінцевих елементів.

6. Наукове значення результатів роботи полягає в одержанні аналітичних залежностей для визначення термонапруженого стану циліндричної поверхні вертикального сталевих резервуару з нафтопродуктами за умов дії на нього температурних факторів пожежі.

7. Практичне значення результатів роботи та ступінь їх впровадження полягає у створенні науково обґрунтованих передумов підвищення ефективності забезпечення пожежної безпеки резервуарних парків зберігання нафти і нафтопродуктів з наявністю вертикальних сталевих резервуарів.

8. Рекомендації щодо подальшого використання одержаних у роботі результатів.

Одержані результати слід враховувати під час проектування вертикальних сталевих резервуарів для зберігання нафти і нафтопродуктів, розробленні планів ліквідації аварійних ситуацій у резервуарних парках зберігання нафти і нафтопродуктів, а також під час викладання навчальних дисциплін з питань пожежної, техногенної та екологічної безпеки.

9. Оцінка викладеного матеріалу, мови, логічності побудови і стилю дисертації.

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

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

Відмічено, що незважаючи на світові та національні результати досліджень процесів горіння нафтопродуктів в резервуарах, теплових потоків, зумовлених пожежею, динаміку виникнення та розвитку пожеж і тактику їх гасіння, вплив теплових факторів пожежі на напружено-деформований стан вузла спряження стінки з днищем резервуара до цього часу не досліджувався. На основі виконаного огляду наукової літератури сформульовано ідею, мету і завдання досліджень.

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

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

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

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

При нагріванні резервуару, його температура постійно збільшується. Чим більша його температура, тим менше тепла він поглинає. При досягненні температури 1500 K між резервуарами буде термодинамічна рівновага, тобто інтенсивність теплового потоку $q=0$.

Уперше проведено моделювання динаміки теплових процесів у вертикальних сталевих резервуарах ємністю $75\text{ }000\text{ м}^3$ з подвійною стінкою та плаваючою покрівлею. Знайдено вирази для дослідження кутового коефіцієнту, інтенсивності теплового потоку між стінками резервуарів залежно від радіусів та різниці температур резервуарів.

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

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

Проведено дослідження інтенсивності променевого випромінення, яке сприймає поверхня нафтопродукту. При розрахунку приймалися такі вихідні данні: температура внутрішньої стінки резервуара, що нагрівається внаслідок зовнішньої пожежі $T_2=823\text{ K}$, початкова температура нафтопродукту, що нагрівається від теплового потоку, рівна $T_1=300\text{ K}$. Ступінь чорноти стінки резервуара $\varepsilon_1=0,76$, а дзеркала нафтопродукту $-\varepsilon_2=0,95$.

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 зроблено такі висновки:

- розроблено методику визначення інтенсивності теплових потоків між двома резервуарами в залежності від віддалі між резервуарами і їхніми радіусами;

- розроблено методику визначення інтенсивності теплового потоку між зовнішньою і внутрішньою стінками двостінного резервуара в залежності від віддалі між стінками та різниці їх температур.

- одержано аналітичну 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.

У третьому розділі на основі законів теплообміну і рівнянь теплопровідності та запропонованих у другому розділі математичних моделей визначення інтенсивності променевих потоків досліджено процеси теплообміну між двома резервуарами при виникненні пожеж.

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

Визначивши температурний розподіл, проведено дослідження прогріву стінки резервуару до критичної температури 550°C при змінних параметрах. Тобто визначено за який час верхні пояси резервуарів, які не омиваються нафтопродуктом, прогріються до критичної температури.

Таким чином

- уперше 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°C є на 40...86 % більший ніж при розрахунку із постійним потоком та теплофізичними характеристиками. Нафта Бензин $t, 0^{\circ}\text{C}$ х, м 71

- встановлено, що при пожежі в резервуарному парку сухі стінки РВС – 1000 прогріються до критичної температури 550°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 15м, оскільки середній час прибуття перших підрозділів до місця пожежі 10-15 хв.

- уперше розроблено математичну модель для розрахунку температурного поля по товщині сухої стінки двостінного резервуару об'ємом 75 000 м³, 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.

- 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 0С вища ніж бетонної. Це викликано тим, що коефіцієнт теплопровідності цегли у 3,3 рази менший ніж у бетону. Розрахунки проводилися для симетричного і несиметричного розташування стінки відносно факела пожежі. 72 5.

- 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.

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

Виявлено, що найбільш небезпечною являється третя схема пожежі, коли на окремий резервуар впливають теплові потоки від трьох резервуарів, на яких відбувається горіння нафти або нафтопродуктів.

Загалом сформульовано такі висновки за розділом:

- 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

- 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.

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

- побудовані регресійні залежності максимальних температур зовнішньої поверхні стінки резервуара та внутрішньої стінки, контактуючої із нафтопродуктом.

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

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

На підставі одержаних результатів досліджень, описаних у розділі, сформульовано такі висновки:

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

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

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

- при збільшенні товщини стінки резервуара від 10 мм до 20 мм величина кільцевих напружень $\beta \sigma$ зменшується на 3%, а осьових – збільшується на $\alpha \sigma$ 93%.

10. Оцінка висновків за результатами досліджень

Зміст преамбули до висновків повністю розкриває сутність досліджень і узгоджується з назвою, ідеєю та метою роботи. Висновки сформульовано конкретно, лаконічно, обґрунтовано.

11. Відповідність дисертації вимогам МОН України.

Дисертаційна робота Чернецького В. В. є кваліфікованою науковою працею, виконаною особисто здобувачем у вигляді рукопису, містить висунуті здобувачем науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати. Наукові