

Національний університет цивільного захисту України  
Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Максименко Максим Володимирович

УДК 621.3

## ДИСЕРТАЦІЯ

### ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕАГУВАННЯ НА НАДЗВИЧАЙНІ СИТУАЦІЇ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ УНАСЛІДОК ПОЖЕЖ НА ОБ'ЄКТАХ ЗБЕРІГАННЯ НАФТОПРОДУКТІВ

Спеціальність – 263 Цивільна безпека

Галузь знань – 26 Цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ М.В. Максименко

Науковий керівник

Басманов Олексій Євгенович,

доктор технічних наук, професор

Харків – 2024

## АНОТАЦІЯ

*Максименко М.В.* Підвищення ефективності реагування на надзвичайні ситуації техногенного характеру унаслідок пожеж на об'єктах зберігання нафтопродуктів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 – Цивільна безпека – Національний університет цивільного захисту України, Державна служба України з надзвичайних ситуацій, Харків, 2024.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого науково-практичного завдання в галузі цивільної безпеки, а саме, підвищенню ефективності реагування на надзвичайні ситуації техногенного характеру унаслідок пожежі на об'єкті зберігання нафтопродуктів шляхом оптимального вибору сил та засобів для охолодження сусідніх резервуарів.

У **вступі** подано загальну характеристику дисертаційної роботи. Обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи та основні завдання дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами. Наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи та публікації.

У **першому розділі** СТАН БЕЗПЕКИ В РЕЗЕРВУАРНИХ ПАРКАХ ТА МЕТОДИ ЗАПОБІГАННЯ ПОШИРЕННЮ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ проведено аналіз літературних джерел, в результаті якого визначено, що основним місцем зберігання нафти і нафтопродуктів є резервуарні парки. Для зберігання нафти і нафтопродуктів використовуються переважно наземні резервуари, а саме, вертикальні сталеві резервуари. Економічні міркування та технологічна необхідність підштовхують до укрупнення резервуарів і компактного їх розміщення. Це, в свою чергу, негативно відбивається на безпеці резервуарних парків. Надзвичайним ситуаціям в резервуарних парках притаманний ефект доміно, коли одна аварія стає підґрунтям для інших аварій.

В умовах повномасштабної російської агресії проти України резервуарні парки стали однією з цілей при атаках по енергетичній інфраструктурі. Вони потрапляли під удар артилерії, крилатих та балістичних ракет, безпілотних літальних апаратів. В результаті ушкоджень резервуарів та іншого технологічного обладнання, як правило, виникала пожежа. Внаслідок цього пожежі стали основним видом надзвичайних ситуацій, що мали місце в резервуарних парках. Першочерговою задачею оперативно-рятувальних підрозділів є локалізація надзвичайної ситуації, що досягається шляхом охолодження резервуара, що горить, і сусідніх з ним резервуарів. При цьому важливо визначити необхідну кількість сил та засобів для подачі води на охолодження резервуарів. Недостатня кількість сил та засобів або неефективне їх використання може призвести до вибуху або займання сусідніх резервуарів.

У другому розділі **МОДЕЛЬ НАГРІВУ РЕЗЕРВУАРА ПІД ТЕПЛОВИМ ВПЛИВОМ ПОЖЕЖІ СУСІДНЬОГО РЕЗЕРВУАРА** досліджується тепловий вплив пожежі в вертикальному сталевому резервуарі з нафтопродуктом на аналогічний сусідній резервуар. Обґрунтовано припущення і побудовано модель нагріву стінки резервуара з нафтопродуктом під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі. Модель враховує променевий теплообмін зовнішньої поверхні стінки резервуара з факелом та навколишнім середовищем, внутрішньої поверхні стінки з внутрішнім простором; конвекційний теплообмін з навколишнім повітрям і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара. Модель може бути використана для прогнозування наслідків надзвичайної ситуації, обумовленої пожежею горючої рідини в вертикальному сталевому резервуарі. Проведено оцінку коефіцієнта взаємного опромінення з факелом для довільної точки на стінці резервуара. Показано, що для вертикальних сталевих резервуарів, місткістю до 20000 м<sup>3</sup> включно, в безрозмірних координатах коефіцієнт опромінення залежить лише від типу рідини, що горить. Для горючих рідин максимальне значення коефіцієнта опромінення сягає 0,0996, а для легкозаймистих рідин – 0,1095.

При цьому максимальне значення досягається на верхньому краї стінки резервуара, оберненої в бік пожежі, монотонно спадаючи при віддаленні від неї, як по висоті, так і по куту. З використанням методів теорії подібності проведено оцінку коефіцієнта конвекційного теплообміну на зовнішній і внутрішній поверхнях стінки резервуара за умови вільної конвекції. Його значення монотонно зростає із підвищенням температури стінки, досягаючи  $9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  при температурі стінки  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Розв'язання рівняння теплового балансу для стінки резервуара, проведене чисельним методом, дозволяє визначити розподіл температур по стінці резервуара. Це дозволяє визначити область, яка потребує охолодження і граничний час його початку. Показано, що на стінці резервуара, оберненої в бік пожежі, небезпечні температури досягаються вже через 15 хвилин після виникнення пожежі. При цьому розподіл температур всередині стінки резервуара носить майже лінійний характер, температура зменшується із віддаленням від зовнішньої поверхні стінки із швидкістю  $0,15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мм}$ . Нахил факела вітром в напрямку сусіднього резервуара призводить до збільшення коефіцієнта взаємного опромінення між факелом і верхнім краєм стінки сусіднього резервуара. При цьому коефіцієнт взаємного опромінення монотонно зростає із збільшенням швидкості вітру. Як і для випадку вітрового штилю, показано, що для вертикальних сталевих резервуарів, місткістю до  $20000 \text{ м}^3$  включно, в безрозмірних координатах коефіцієнт опромінення залежить лише від типу рідини, що горить. Значення коефіцієнта взаємного опромінення на верхньому краї стінки резервуара для горючих рідин досягає  $0,1642$  (при швидкості вітру  $5 \text{ м}/\text{с}$ ), збільшуючись в  $1,65$  рази порівняно з випадком вітрового штилю. Для легкозаймистих рідин досягає  $0,2109$  (при швидкості вітру  $5 \text{ м}/\text{с}$ ), збільшуючись в  $1,93$  рази. Оцінено коефіцієнт взаємного опромінення факела і точки на покрівлі резервуара за умови зміни форми факела під впливом вітру. Нахил факела вітром в напрямку сусіднього резервуара призводить до збільшення коефіцієнта взаємного опромінення між факелом і покрівлею сусіднього резервуара. При цьому

коефіцієнт взаємного опромінення зростає із збільшенням швидкості вітру. За відсутності вітру він складає 0,0901 для точки на краю покрівлі з боку пожежі. При швидкості вітру 2 м/с цей коефіцієнт становить 0,1475, а при швидкості 4 м/с досягає величини 0,1697. Показано, що для вертикальних сталевих резервуарів, місткістю до 20000 м<sup>3</sup> включно, в безрозмірних координатах коефіцієнт опромінення залежить лише від типу рідини, що горить. Із застосуванням методів теорії подібності побудовано оцінки коефіцієнта конвекційної тепловіддачі на зовнішній і внутрішній поверхнях покрівлі резервуара. За відсутності вітру на зовнішній поверхні має місце вільна конвекція, а при його наявності – вимушена. На внутрішній поверхні покрівлі резервуара має місце теплообмін з пароповітряною сумішшю в режимі вільної конвекції. Шляхом застосування метода скінчених різниць розв'язано рівняння теплового балансу і визначено розподіл температур по покрівлі резервуара. Показано, що нахил факелу в бік сусіднього резервуара істотно підвищує небезпеку розповсюдження пожежі. Якщо при відсутності вітру покрівля резервуара досягає температури 250 °С через 8 хв., то при швидкості вітру 2 м/с цей час зменшується до 4,3 хв., а при 5 м/с – до 2,5 хв.

У **третьому розділі** **МОДЕЛЬ ОХОЛОДЖЕННЯ РЕЗЕРВУАРА В УМОВАХ ПОЖЕЖІ** побудовано модель охолодження резервуара водою в умовах пожежі, а також проведено експериментальну перевірку моделі. Побудовано рівняння теплового балансу для стінки резервуара з нафтопродуктом при охолодженні її водою в умовах пожежі в сусідньому резервуарі. Рівняння враховує променевий теплообмін стінки з факелом, навколишнім середовищем і внутрішнім простором резервуара; конвекційний теплообмін з водною плівкою і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара. Показано, що стікаюча по стінці вода є основним чинником її охолодження. При інтенсивності подачі води 0,5÷2,0 л/(м·с) коефіцієнт конвекційного теплообміну між стінкою і водною плівкою складає 3,7÷5,2 кВт/(м<sup>2</sup>·К), що на 3 порядки перевищує коефіцієнт теплообміну з

пароповітряною сумішшю або навколишнім повітрям. Побудовано модель нагріву водної плівки, що стікає по стінці резервуара, що нагрівається під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі. Модель спирається на припущення про сталу швидкість стікання води по стінці резервуара, яка при інтенсивності зрошення  $0,5 \div 2,0$  л/(м·с) складає  $0,87 \div 1,5$  м/с. Модель враховує конвекційний теплообмін зі стінкою резервуара і навколишнім повітрям, а також променевий теплообмін з навколишнім середовищем. Для визначення коефіцієнтів конвекційного теплообміну використано методи теорії подібності. Показано, що в усталеному режимі у вертикальному напрямку виникає градієнт температур у стінці і водній плівці. Побудовано алгоритм визначення розподілу температур в стінці резервуара і водній плівці, що стікає по ній. Алгоритм спирається на рівняння теплового балансу стінки резервуара і модель нагріву водної плівки. Для розв'язання рівняння теплового балансу стінки використовується метод скінчених різниць. Суть алгоритму полягає в послідовному обчисленні усталеного значення температури стінки і приросту температури водної плівки в точках, розташованих вздовж вертикалі на стінці резервуара з певним кроком. Алгоритм починає роботу з точки на верхньому краї стінки резервуара і закінчує у точці на рівні нафтопродукту. Проведено експериментальну перевірку моделі нагріву і охолодження стінки резервуара в умовах пожежі за допомогою зменшеної моделі. З'ясовано, що як під час нагрівання, так і під час охолодження розраховані значення температури стінки потрапляють в довірчій інтервал на, що відповідає довірчій ймовірності 0,95.

**У четвертому розділі РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПОЖЕЖІ В РЕЗЕРВУАРІ З НАФТОПРОДУКТОМ** розглянуто варіанти впровадження розроблених в роботі моделей і алгоритмів. Побудовано алгоритм визначення оптимальної інтенсивності подачі води на охолодження стінки резервуара. В основі наведеного алгоритму лежить метод дихотомії. За кожен ітерацію алгоритму ширина діапазону, в якому міститься оптимальне значення інтенсивності

подачі води, зменшується в 2 рази. Це означає, для визначення оптимальної інтенсивності з похибкою не більше  $0,001 \text{ л}/(\text{м}\cdot\text{с})$ , достатньо виконати 11 ітерацій, якщо ширина початкового діапазону не перевищує  $2 \text{ л}/(\text{м}\cdot\text{с})$ . Побудовано залежності оптимальної інтенсивності подачі води на охолодження резервуара від напрямку і швидкості вітру. Нахил факела вітром в бік сусіднього резервуара збільшує щільність теплового потоку до нього, що потребує більшої інтенсивності охолодження. Навпаки, коли напрям вітру є протилежним напрямку на сусідній резервуар, то щільність теплового потоку зменшується. При цьому для значень швидкості вітру більше певної величини ( $5,5 \text{ м}/\text{с}$  для нафти,  $7,5 \text{ м}/\text{с}$  для бензину,  $6 \text{ м}/\text{с}$  для дизельного палива) щільність теплового потоку зменшується настільки, що зникає необхідність охолодження стінок сусіднього резервуара. При перпендикулярному напрямку вітру для значень швидкості більше  $8 \text{ м}/\text{с}$  для нафти і  $8,5 \text{ м}/\text{с}$  для дизельного палива необхідності в охолодженні стінок сусіднього резервуара також немає. Обґрунтовано використання пожежного гідромонітора для охолодження резервуарів в умовах пожежі. Особливістю гідромонітора є зняття азимутальних обмежень при використанні пожежного монітора в резервуарних парках з нафтопродуктами.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. *Вперше* поставлено і розв'язано задачу оптимального вибору сил та засобів для подачі води для охолодження стінок і покрівлі резервуара, сусіднього з тим, що горить. При цьому критерієм оптимізації є мінімум витрат води або мінімум задіяного особового складу, або автоцистерн, а обмеженням – охолодження стінки та покрівлі резервуара до безпечної температури.

2. *Удосконалено* модель охолодження стінок і покрівлі резервуара водою в умовах пожежі в сусідньому резервуарі. Модель спирається на рівняння теплового балансу для стінки або покрівлі і рівняння теплового балансу водної плівки, що стікає по ній. Модель дозволяє визначити розподіл температур по стінці або покрівлі та по водній плівці.

3. *Набула подальшого розвитку* модель теплового впливу пожежі в резервуарі з нафтопродуктами на сусідні резервуари. Побудована модель враховує теплообмін резервуара, що нагрівається, випромінюванням з факелом, навколишнім середовищем і внутрішнім простором резервуара, а також конвекційний теплообмін з навколишнім повітрям і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара. Особливістю моделі є врахування нахилу факела вітром.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в розробці моделей і алгоритмів, які є основою для системи підтримки прийняття рішення керівником гасіння пожежі. Розроблені моделі і алгоритми можуть бути використані як на етапі проектування резервуарних парків, так і для оцінки пожежної небезпеки вже існуючих об'єктів, а також в оперативному режимі під час ліквідації наслідків надзвичайної ситуації.

Моделі теплового впливу пожежі на резервуари з нафтопродуктами, методи розрахунку необхідної інтенсивності подачі води на охолодження покрівлі і стінок резервуарів впроваджені для розробки планів пожежогасіння та організаційно-технічних заходів щодо попередження, локалізації та гасіння пожеж резервуарів "РВС" в 6-му ДПРЗ ГУ ДСНС України у Луганській області.

Моделі охолодження стінки і покрівлі резервуару, алгоритми розрахунку температури сухої стінки і покрівлі резервуару у вигляді програмного комплексу були використані для розробки планів пожежогасіння в 8-му ДПРЗ ГУ ДСНС України у Луганській області.

Теоретичні положення роботи використані в навчальному процесі кафедри пожежної та рятувальної підготовки факультету оперативно-рятувальних сил Національного університету цивільного захисту України.

Функціональну схему пожежного монітора для охолодження резервуарів запатентовано (Патент України).



**Ключові слова:** надзвичайна ситуація; резервуарний парк; резервуарна група; горючі рідини; пожежа в резервуарі; тепловий вплив пожежі; локалізація пожежі; променевий теплообмін; конвекційний теплообмін; охолодження водою; розрахунок сил та засобів.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

**Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:**

1. Басманов О. Є., Максименко М. В., Олійник В. В. Моделювання теплового впливу пожежі в резервуарі з нафтопродуктом на сусідній резервуар. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. № 2 (34). С. 4–20. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat).

*Здобувачу особисто належить побудова рівняння теплового балансу для стінки резервуара і його чисельне розв'язання.*

2. Басманов О. Є., Максименко М. В. Моделювання впливу пожежі на сусідній резервуар з нафтопродуктом в умовах вітру. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. № 1 (35). С. 239–253. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat)

*Здобувачу особисто належить оцінка теплового потоку від пожежі до стінки резервуара, а також розв'язання рівняння теплопровідності у стінці резервуара.*

3. **Максименко М. В.** Модель нагріву покрівлі резервуара під впливом пожежі в сусідньому резервуарі. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. № 2 (36). С. 233-247. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat).

4. **Максименко М. В.** Модель охолодження стінки резервуара водою при пожежі в сусідньому резервуарі. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 1 (37). С. 156–170. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat).

5. Basmanov O., **Maksymenko M.** Model for choosing optimal water flow rate for tank wall cooling. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. Vol. 2 (38). P. 4–16. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat).

*Здобувачу особисто належить постановка задачі вибору оптимальної інтенсивності подачі води на охолодження резервуара та розробка алгоритму її розв'язання.*

6. Басманов О. Є., **Максименко М. В.**, Олійник В. В. Оптимальний вибір сил та засобів для охолодження резервуара при пожежі в резервуарній групі. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2024. № 1 (39). С. 55–65. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat).

*Здобувачу особисто належить розрахунок сил та засобів, необхідних для локалізації пожежі в залежності від обраного критерію оптимізації.*

### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

7. **Максименко М.В.** Локалізація надзвичайних ситуацій техногенного характеру, пов'язаних зі зберіганням нафтопродуктів. Міжнародна науково-

практична конференція молодих вчених "Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту". НУЦЗУ. 2021. С. 114. (Форма участі – очна).

8. Басманов О. Є., **Максименко М. В.** Модель нагріву стінки резервуара під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі. Проблеми пожежної безпеки. НУЦЗУ. 2022. С. 239–241. (Форма участі – очна).

*Здобувачу особисто належить побудова моделі теплового впливу пожежі горючої рідини на стінку резервуара .*

9. Басманов О. Є., **Максименко М. В.** Оцінка коефіцієнта взаємного опромінення між резервуаром і факелом над сусіднім резервуаром. Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2022. С. 9–11. (Форма участі – заочна).

*Здобувачу особисто належить розрахунок коефіцієнта взаємного опромінення між факелом у формі конуса і циліндричною стінкою.*

10. Басманов О. Є., **Максименко М. В.** Тепловий вплив пожежі на покрівлю резервуара з нафтопродуктом. Міжнародна науково-практична конференція «Problems of Emergency Situations». 2023. С. 217–218. (Форма участі – очна).

*Здобувачу особисто належить розробка моделі теплового балансу для покрівлі вертикального сталевго резервуара в умовах пожежі нафтопродукту в сусідньому резервуарі.*

11. Басманов О. Є., **Максименко М. В.** Нагрів покрівлі резервуара під тепловим впливом пожежі. Проблеми і перспективи розвитку системи життєдіяльності. XVIII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів. Львів. 2023. С. 163–166. (Форма участі – заочна).

*Здобувачу особисто належить визначення коефіцієнта взаємного опромінення між покрівлею вертикального сталевго резервуара і полум'ям пожежі горючої рідини в сусідньому резервуарі.*

12. Басманов О. Є., Максименко М. В. Моделювання теплового впливу пожежі в резервуарі на покрівлю сусіднього резервуара. III Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми та перспективи розвитку фундаментальних, прикладних, загальнотехнічних та безпекових наук». Київ. 2023. С. 8–12. (Форма участі – заочна).

*Здобувачу особисто належить розв’язання рівняння теплопровідності для покрівлі резервуара в умовах теплового впливу пожежі. Визначено динаміку зміни і розподіл температур по покрівлі вертикального сталевго резервуара.*

13. Басманов О. Є., Максименко М. В. Оптимізація сил та засобів для охолодження резервуарів при пожежі в резервуарній групі. XV Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». НУЦЗУ. 2024. С. 9-10. (Форма участі – очна).

*Здобувачем особисто проведено визначення сил та засобів для подачі води на охолодження резервуара в умовах пожежі, при якій досягається охолодження його сталевих конструкцій до безпечних значень температури.*

14. Басманов О. Є., Максименко М. В. Моделювання охолодження покрівлі вертикального сталевго резервуара. Міжнародна науково-практична конференція «Problems of Emergency Situations – 2024». НУЦЗУ. 2024. С. 170-171. (Форма участі – очна).

*Здобувачем особисто побудовано модель охолоджувальної дії водної плівки на покрівлю резервуара в умовах теплового впливу пожежі в сусідньому резервуарі.*

## **Патенти**

15. Пат. 146808 Україна, МПК А62С 3/06, А62С 35/00, А62С 31/05. Пожежний монітор / Абрамов Ю.О., Басманов О.Є., Максименко М.В.; заявник і патентовласник Національний університет цивільного захисту

України. – заявл. 18.11.2020; опубл. 17.03.2021. Державний реєстр патентів України на корисні моделі. Бюл. № 11.

*Здобувачем особисто проведено патентний пошук, визначено кут встановлення насадка в вертикальній площині і кут розпилу води в горизонтальній площині.*

## ABSTRACT

*Maksymenko M. V.* Increasing the efficiency of responding to emergency situations of a man-made nature as a result of fires at oil product storage facilities. – Qualifying research paper, manuscript copyright.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in specialty 263 – Civil safety – National University of Civil Defence of Ukraine, State Emergency Service of Ukraine, Kharkiv, 2024.

The dissertation is devoted to the solution of an important scientific and practical task in the field of civil safety, namely, increasing the efficiency of responding to emergencies of a man-made nature as a result of a fire at an oil storage facility through the optimal selection of forces and means for cooling nearby tanks.

The **introduction** provides a general description of the dissertation work. The relevance of the dissertation topic is substantiated, the purpose of the work and the main tasks of the research are formulated, the connection of the work with scientific programs is shown. The data on the personal contribution of the acquirer, approval of the work and publications are given.

**In the first chapter, SAFETY IN OIL TANK STORAGES AND METHODS OF PREVENTING THE SPREAD OF AN EMERGENCY SITUATION**, an analysis of literary sources was carried out, as a result of which it was determined that the main place of storage of oil and oil products is tank farms. Above-ground tanks, namely, vertical steel tanks, are mainly used to store oil and oil products. Economic considerations and technological necessity lead to the enlargement of tanks and their compact placement. This, in turn, has a negative impact on the safety of tank farms. Emergency situations in tank farms have a domino effect, when one accident becomes the basis for other accidents. In the conditions of full-scale Russian aggression against Ukraine, tank farms have become one of the targets of attacks on energy infrastructure. They came under the attack of artillery, cruise and ballistic missiles, unmanned aerial vehicles. Damage to tanks and other technological

equipment usually resulted in a fire. As a result, fires became the main type of emergencies that occurred in tank farms. The primary task of operational and rescue units is the localization of an emergency situation, which is achieved by cooling the burning tank and neighboring tanks. At the same time, it is important to determine the necessary amount of forces and means for supplying water to cool the tanks. An insufficient amount of forces and means or their inefficient use can lead to an explosion or ignition of nearby tanks.

**In the second chapter, MODEL OF TANK HEATING UNDER THE THERMAL INFLUENCE OF A FIRE IN AN ADJACENT TANK,** the assumption is substantiated and a model of the heating of the wall of the oil product tank under the thermal influence of a fire in the adjacent tank is built. The model takes into account the radiant heat exchange of the outer surface of the tank wall with the torch and the environment, the inner surface of the wall with the inner space; convection heat exchange with the surrounding air and steam-air mixture in the gas space of the tank. The model can be used to predict the consequences of an emergency situation caused by a fire of a flammable liquid in a vertical steel tank. The coefficient of mutual irradiation with the torch was evaluated for an arbitrary point on the tank wall. It is shown that for vertical steel tanks with a capacity of up to 20,000 m<sup>3</sup>, in dimensionless coordinates, the radiation coefficient depends only on the type of burning liquid. For flammable liquids, the maximum value of the exposure coefficient reaches 0.0996, and for flammable liquids - 0.1095. At the same time, the maximum value is reached at the upper edge of the wall of the tank facing the fire, monotonically falling away from it, both in height and angle. Using the methods of the theory of similarity, the coefficient of convection heat exchange on the outer and inner surfaces of the tank wall was evaluated under the condition of free convection. Its value increases monotonically with increasing wall temperature, reaching 9 W/(m<sup>2</sup>·K) at a wall temperature of 500 °C. Solving the heat balance equation for the tank wall using a numerical method allows you to determine the temperature distribution along the tank wall. This allows you to determine the area that needs

cooling and the maximum time for its start. It is shown that dangerous temperatures are reached on the wall of the tank facing away from the fire already 15 minutes after the fire. At the same time, the temperature distribution inside the tank wall is almost linear, the temperature decreases with distance from the outer surface of the wall at a rate of  $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ . The inclination of the torch by the wind in the direction of the adjacent tank leads to an increase in the mutual radiation coefficient between the torch and the upper edge of the wall of the adjacent tank. At the same time, the mutual radiation coefficient increases monotonically with increasing wind speed. As in the case of a calm wind, it is shown that for vertical steel tanks with a capacity of up to  $20,000\text{ m}^3$ , in dimensionless coordinates, the radiation coefficient depends only on the type of burning liquid. The value of the mutual radiation coefficient at the upper edge of the tank wall for flammable liquids reaches 0.1642 (at a wind speed of 5 m/s), increasing by 1.65 times compared to the case of a calm wind. For flammable liquids, it reaches 0.2109 (at a wind speed of 5 m/s), increasing by 1.93 times. The coefficient of mutual irradiation of the torch and the point on the roof of the tank was estimated, under the condition of changing the shape of the torch under the influence of wind. The inclination of the torch by the wind in the direction of the neighboring tank leads to an increase in the mutual radiation coefficient between the torch and the roof of the neighboring tank. At the same time, the mutual radiation coefficient increases with increasing wind speed. In the absence of wind, it is 0.0901 for a point on the edge of the roof on the fire side. At a wind speed of 2 m/s, this coefficient is 0.1475, and at a speed of 4 m/s, it reaches 0.1697. It is shown that for vertical steel tanks with a capacity of up to  $20,000\text{ m}^3$ , in dimensionless coordinates, the radiation coefficient depends only on the type of burning liquid. With the application of methods of the theory of similarity, estimates of the coefficient of convection heat transfer on the outer and inner surfaces of the roof of the tank were constructed. In the absence of wind, free convection takes place on the outer surface, and in its presence, forced convection. On the inner surface of the roof of the tank, heat exchange takes place with the steam-air mixture in the mode of free convection. By



applying the finite difference method, the heat balance equation was solved and the temperature distribution on the roof of the tank was determined. It is shown that the inclination of the torch towards the neighboring tank significantly increases the danger of fire spreading. If, in the absence of wind, the roof of the tank reaches a temperature of 250 °C after 8 minutes, then at a wind speed of 2 m/s this time is reduced to 4.3 minutes, and at 5 m/s - to 2.5 minutes.

**In the third chapter, MODEL OF TANK COOLING UNDER FIRE CONDITIONS,** a model of cooling the tank with water under fire conditions was built, and an experimental verification of the model was carried out. The heat balance equation for the wall of a tank with an oil product when it is cooled by water in the event of a fire in a nearby tank is constructed. The equation takes into account the radiant heat exchange of the wall with the torch, the environment and the internal space of the tank; convection heat exchange with a water film and steam-air mixture in the gas space of the tank. It is shown that the water flowing down the wall is the main factor in its cooling. At a water supply intensity of 0.5÷2.0 l/(m·s), the convection heat exchange coefficient between the wall and the water film is 3.7÷5.2 kW/(m<sup>2</sup>·K), which is 3 orders of magnitude higher than the heat exchange coefficient with vapor-air mixture or ambient air. A model of the heating of the water film flowing down the wall of the tank, which is heated under the thermal influence of a fire in the adjacent tank, is built. The model is based on the assumption of a constant rate of water flow along the tank wall, which at an irrigation intensity of 0.5÷2.0 l/(m·s) is 0.87÷1.5 m/s. The model takes into account convection heat exchange with the tank wall and the surrounding air, as well as radiative heat exchange with the environment. To determine the coefficients of convection heat exchange, the methods of the similarity theory were used. It is shown that in the steady state, a temperature gradient occurs in the wall and the water film in the vertical direction. An algorithm for determining the temperature distribution in the tank wall and the water film flowing over it was built. The algorithm is based on the heat balance equation of the tank wall and the water film heating model. The finite difference method is used to

solve the heat balance equation of the wall. The essence of the algorithm consists in the sequential calculation of the steady-state value of the wall temperature and the increase in the temperature of the water film at points located along the vertical line on the tank wall with a certain step. The algorithm starts working from a point on the upper edge of the tank wall and ends at a point at the level of the oil product. An experimental verification of the model of heating and cooling of the tank wall in fire conditions was carried out using a reduced model. It was found that both during heating and during cooling, the calculated values of the wall temperature fall within the confidence interval of 0.95.

**In the fourth chapter, RECOMMENDATIONS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF FIRE LOCALIZATION IN AN OIL TANK,** variants of the implementation of the models and algorithms developed in the work are considered. An algorithm for determining the optimal intensity of water supply for cooling the tank wall has been developed. The above algorithm is based on the dichotomy method. For each iteration of the algorithm, the width of the range, which contains the optimal value of the intensity of water supply, decreases by a factor of 2. This means, to determine the optimal intensity with an error of no more than  $0.001 \text{ l}/(\text{m}\cdot\text{s})$ , it is enough to perform 11 iterations, if the width of the initial range does not exceed  $2 \text{ l}/(\text{m}\cdot\text{s})$ . The dependence of the optimal intensity of water supply for tank cooling on the direction and speed of the wind is constructed. The inclination of the torch by the wind towards the adjacent tank increases the density of the heat flow to it, which requires a greater intensity of cooling. On the contrary, when the direction of the wind is opposite to the direction of the neighboring tank, the density of the heat flow decreases. At the same time, for wind speed values greater than a certain value (5.5 m/s for oil, 7.5 m/s for gasoline, 6 m/s for diesel fuel), the heat flow density decreases so much that the need to cool the walls of the adjacent tank disappears. With the perpendicular direction of the wind, for speed values of more than 8 m/s for oil and 8.5 m/s for diesel fuel, there is no need to cool the walls of the adjacent tank either. The use of a fire hydromonitor for cooling tanks in fire conditions is

substantiated. A feature of the hydromonitor is the removal of azimuth restrictions when using the fire monitor in tank farms with petroleum products.

**Scientific novelty of the obtained results.**

1. *For the first time*, the problem of optimal selection of forces and means for supplying water for cooling the walls and roof of the tank adjacent to the one that is burning was set and solved. At the same time, the optimization criterion is the minimum water consumption or the minimum personnel involved, or tank trucks, and the limitation is the cooling of the wall and roof of the tank to a safe temperature.

2. The model of cooling the walls and roof of the tank with water in conditions of fire in the neighboring tank *has been improved*. The model is based on the heat balance equation for the wall or roof and the heat balance equation of the water film flowing over it. The model allows you to determine the temperature distribution along the wall or roof and across the water film.

3. The model of the thermal effect of a fire in a tank with petroleum products on neighboring tanks *was further developed*. The built model takes into account the heat exchange of the heated tank by radiation with the torch, the environment and the internal space of the tank, as well as the convection heat exchange with the surrounding air and the vapor-air mixture in the gas space of the tank. A feature of the model is the consideration of the inclination of the torch by the wind.

**The practical significance of the results** lies in the development of models and algorithms, which are the basis for a decision support system for firefighting managers. The developed models and algorithms can be used both at the design stage of tank parks and for assessing the fire hazard of already existing facilities, as well as in operational mode during the liquidation of the consequences of an emergency situation.

Models of the thermal effect of fire on tanks with petroleum products, methods of calculating the necessary intensity of water supply for cooling the roof and walls of the tanks are implemented for the development of fire extinguishing plans and organizational and technical measures for the prevention, localization and

extinguishing fires in vertical steel tanks at the 6th state fire and rescue squad of the state emergency service of Ukraine in the Luhansk region.

Cooling models of the tank wall and roof, algorithms for calculating the temperature of the dry wall and roof of the tank in the form of a software complex were used to develop firefighting plans in the 8th state fire and rescue squad of the state emergency service of Ukraine in the Luhansk region.

The theoretical provisions of the work are used in the educational process of the department of fire and rescue training of the faculty of operational and rescue forces of the National University of Civil Defence of Ukraine.

The results of the work are embodied in the development of a Ukrainian patent for a utility model for a fire monitor for cooling tanks.

**Keywords:** emergency; oil tank storage; tank group; flammable liquids; fire in the tank; thermal effect of fire; localization of the fire; radiant heat exchange; convection heat exchange; water cooling; calculation of forces and means.

## **LIST OF PUBLICATIONS OF THE APPLICANT BY DISSERTATION TOPIC**

**Scientific papers in which the main scientific results of the dissertation are published:**

**Articles in scientific professional editions of Ukraine included in the international citation databases:**

1. Basmanov O., Maksymenko M., Oliinik V. Modeling the thermal effect of a fire in a tank with an oil product on a nearby tank. Problems of emergency situations, 2021. Vol. 2 (34). P. 4–20. (Included into international scientometric databases Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat).

*The applicant is personally responsible for constructing the heat balance equation for the tank wall and its numerical solution.*

2. Basmanov O., **Maksymenko M.** Modeling the effect of a fire on a nearby oil product tank in windy conditions. Problems of emergency situations, 2022. Vol. 1 (35). P. 239–253. (Included into international scientometric databases Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat).

*The applicant is personally responsible for estimating the heat flow from the fire to the tank wall, as well as solving the heat conduction equation in the tank wall.*

3. **Maksymenko M.** A model of tank roof heating under the influence of a fire in an adjacent tank. Problems of emergency situations, 2022. Vol. 2 (36). P. 233–247. (Included into international scientometric databases Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat).

4. **Maksymenko M.** A model of cooling the tank wall with water in the event of a fire in a nearby tank. Problems of emergency situations, 2023. Vol. 1 (37). P. 156–170. (Included into international scientometric databases Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat).

5. Basmanov O., **Maksymenko M.** Model for choosing optimal water flow rate for tank wall cooling. Problems of emergency situations, 2023. Vol. 2 (38). P. 4–16. (Included into international scientometric databases Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat).

*The applicant is personally responsible for setting the problem of choosing the optimal intensity of water supply for cooling the tank and developing an algorithm for its solution.*

6. Basmanov O., **Maksymenko M.**, Oliinyk V. The optimal choice of forces and means for cooling the tank in case of fire in the tank group. Problems of emergency situations, 2024. Vol. 1 (39). P. 55–65 (Included into international scientometric databases Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat).

*The applicant is personally responsible for the calculation of the forces and means necessary for the localization of the fire depending on the chosen optimization criterion.*

### **Scientific works certifying the practical of the dissertation materials:**

7. **Maksymenko M.** Localization of man-made emergency situations related to the storage of petroleum products. International Scientific and Practical Conference of Young Scientists "Problems and Prospects of Providing Civil Protection". NUCDU. 2021. P. 114. (Face-to-face form of participation).

8. Basmanov O., **Maksymenko M.** A model of tank wall heating under the thermal influence of a fire in a nearby tank. Problems of fire safety. NUCDU. 2022. P. 239–241. (Face-to-face form of participation).

*The applicant is personally responsible for building a model of the thermal effect of a combustible liquid fire on the tank wall.*

9. Basmanov O., **Maksymenko M.** Estimation of the mutual radiation coefficient between the tank and the flare above the adjacent tank. Emergency situations: security and protection: Materials of the XII Ukrainian scientific and practical conference with international participation. Cherkasy. ChIFS in the name of Heroes of Chernobyl NUCDU. 2022. P. 9–11. (Extramural form of participation).

*The applicant is personally responsible for calculating the mutual radiation coefficient between the cone-shaped torch and the cylindrical wall.*

10. Basmanov O., **Maksymenko M.** The thermal effect of a fire on the roof of a tank with an oil product. International scientific and practical conference «Problems of Emergency Situations». 2023. P. 217–218. (Face-to-face form of participation).

*The applicant personally owns the development of a heat balance model for the roof of a vertical steel tank in the event of an oil product fire in a nearby tank.*

11. Basmanov O., **Maksymenko M.** Heating of the roof of the tank under the thermal influence of fire. Problems and prospects of the development of the vital

activity system. XVIII International scientific and practical conference of young scientists, cadets and students. Lviv. 2023. P. 163–166. (Extramural form of participation).

*The applicant is personally responsible for determining the mutual radiation coefficient between the roof of a vertical steel tank and the flame of a combustible liquid fire in an adjacent tank.*

12. Basmanov O., **Maksymenko M.** Modeling the thermal effects of a fire in a tank on the roof of a neighboring tank. III Ukrainian scientific and practical conference "Actual problems and prospects for the development of fundamental, applied, general technical and security sciences". Kyiv. 2023. P. 8–12. (Extramural form of participation).

*The applicant is personally responsible for solving the thermal conductivity equation for the roof of the tank in the conditions of the thermal effect of the fire. The dynamics of changes and distribution of temperatures on the roof of a vertical steel tank were determined.*

13. Basmanov O., **Maksymenko M.** Optimization of forces and means for cooling tanks in the event of a fire in a tank group. XV International Scientific and Practical Conference "Theory and Practice of Fire Extinguishing and Eliminating Emergency Situations". NUCDU, 2024. P. 9-10. (Face-to-face form of participation).

*The applicant personally determined the forces and means for supplying water to cool the tank in the event of a fire, during which cooling of its steel structures to safe temperature values is achieved.*

14. Basmanov O., **Maksymenko M.** Modeling of cooling of the roof of a vertical steel tank. International scientific and practical conference "Problems of Emergency Situations – 2024". NUCDU. 2024. P. 170-171. (Face-to-face form of participation).

*The applicant personally built a model of the cooling action of the water film on the roof of the tank under the conditions of the thermal effect of a fire in a nearby tank.*

## Patents

15. Pat. 146808 Ukraine, IPC A62C 3/06, A62C 35/00, A62C 31/05. Fire-fighting monitor / Abramov Y., Basmanov O., **Maksymenko M.**; declarant and owner – National University of Civil Defence of Ukraine. – decl. 18.11.2020; publ. 17.03.2021. State register of patents of Ukraine for utility models. Bul. 11.

*The applicant personally conducted a patent search, determined the nozzle installation angle in the vertical plane and the water spray angle in the horizontal plane.*



## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	28
ВСТУП.....	29
РОЗДІЛ I СТАН БЕЗПЕКИ В РЕЗЕРВУАРНИХ ПАРКАХ ТА МЕТОДИ ЗАПОБІГАННЯ ПОШИРЕННЮ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ.....	35
1.1 Загальна характеристика резервуарів і резервуарних парків.....	35
1.2 Статистика аварій в резервуарних парках .....	38
1.3 Особливості надзвичайних ситуацій в резервуарних парках в умовах бойових дій .....	40
1.4 Реагування на надзвичайні ситуації унаслідок пожеж в резервуарних парках .....	42
1.4.1 Охолодження резервуарів .....	42
1.4.2 Проведення пінної атаки .....	45
1.5 Моделювання пожеж у вертикальних сталевих резервуарах.....	46
1.5.1 Моделювання факела над дзеркалом горючої рідини кругової форми.....	46
1.5.2 Моделі теплового впливу пожежі на резервуар з нафтопродуктом.....	49
1.5.3 Моделі охолодження резервуара водою.....	52
Висновки до розділу I.....	54
РОЗДІЛ II МОДЕЛЬ НАГРІВУ РЕЗЕРВУАРА ПІД ТЕПЛОВИМ ВПЛИВОМ ПОЖЕЖІ СУСІДНЬОГО РЕЗЕРВУАРА .....	56
2.1 Математична модель нагріву сухої стінки резервуара .....	56
2.2 Оцінка величини коефіцієнта взаємного опромінення з факелом ..	62
2.3 Оцінка величини коефіцієнта конвекційного теплообміну.....	70
2.4 Розв'язання рівняння теплопровідності в стінці резервуара.....	72

2.5 Врахування вітрового впливу на коефіцієнт взаємного опромінення.....	75
2.6 Вимушена конвекція, обумовлена вітровим впливом.....	81
2.7 Розподіл температури по стінці резервуара в умовах вітру.....	85
2.8 Модель нагріву покрівлі резервуара під тепловим впливом пожежі.....	87
2.8.1 Побудова оцінки коефіцієнта взаємного опромінення.....	87
2.8.2. Побудова оцінки коефіцієнта конвекційного теплообміну.	94
2.8.3. Розв’язання рівняння теплопровідності в покрівлі резервуара.....	96
Висновки до розділу II.....	99
<b>РОЗДІЛ III МОДЕЛЬ ОХОЛОДЖЕННЯ РЕЗЕРВУАРА В УМОВАХ ПОЖЕЖІ .....</b>	<b>102</b>
3.1 Побудова моделі охолоджувальної дії водної плівки на стінку резервуара при пожежі .....	102
3.1.1 Побудова рівняння теплового балансу для стінки резервуара.....	102
3.1.2 Побудова моделі нагріву водної плівки, що стікає по стінці резервуара.....	106
3.1.3 Розробка алгоритму визначення розподілу температур по стінці резервуара і водній плівці.....	113
3.2 Побудова моделі охолодження покрівлі резервуара в.....	115
3.2.1 Побудова рівняння теплового балансу для покрівлі резервуара.....	115
3.2.2 Оцінка коефіцієнта конвекційного теплообміну покрівлі з водною плівкою.....	117
3.2.3 Швидкість стікання води по покрівлі резервуара.....	120
3.2.4 Побудова моделі нагріву водної плівки, що стікає по покрівлі резервуара.....	121

3.3 Результати застосування моделей охолоджувальної дії водної плівки, що стікає по стінці і покрівлі резервуара .....	125
3.4 Експериментальна перевірка моделі охолодження резервуара.....	134
Висновки до розділу III.....	138
<b>РОЗДІЛ IV РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ</b>	
<b>ЕФЕКТИВНОСТІ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПОЖЕЖІ В РЕЗЕРВУАРІ З</b>	
<b>НАФТОПРОДУКТОМ .....</b>	
4.1 Вибір оптимальної інтенсивності подачі води для охолодження резервуара .....	140
4.1.1 Постановка задачі оптимального вибору інтенсивності подачі води на охолодження резервуара .....	140
4.1.2 Алгоритм розв'язання задачі оптимального вибору інтенсивності подачі води на охолодження резервуара .....	142
4.1.3. Результати розв'язання задачі оптимального вибору інтенсивності подачі води на охолодження.....	144
4.2 Порівняння розрахованої інтенсивності подачі води на охолодження резервуара з нормативною .....	151
4.3 Розрахунок сил та засобів на охолодження сусідніх резервуарів....	153
4.4 Програмний комплекс підтримки прийняття рішення керівником гасіння пожежі.....	159
4.4 Використання пожежного монітора .....	161
Висновки до розділу IV.....	165
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	168
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	170
ДОДАТОК А Список публікацій за темою дисертації.....	181
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів досліджень.....	185

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

РВС – резервуар вертикальний сталевий

ЛЗР – легкозаймиста рідина

ГР – горюча рідина

НС – надзвичайна ситуація

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Резервуарні парки є основним місцем збігання нафти і нафтопродуктів в процесі їх переробки і транспортування. Висока концентрація легкозаймистих та горючих рідин на відносно невеликій площі призводить до підвищеної небезпеки таких об'єктів. З початком війни резервуарні парки стали однією із цілей при ударах по об'єктах енергетичної інфраструктури. Лише за перші 2 місяці повномасштабної російської агресії було зареєстровано 14 пожеж в резервуарних парках як в прифронтових областях, так і в тилу. Отже, основною причиною надзвичайних ситуацій в резервуарних парках в Україні за останні 2 роки є їх обстріли. І майже всі вони супроводжуються пожежами.

Аналіз аварій в резервуарних парках показує, що багатьом з них притаманний ефект «доміно». Це така ситуація, коли одна аварія, навіть відносно незначна, створює підґрунтя для іншої. Причиною цього його скупчення легкозаймистих і горючих рідин на невеликій площі.

У зв'язку з цим важливим є визначення можливих сценаріїв розвитку пожежі і запобігання її розповсюдженню на сусідні резервуари. Основним методом локалізації пожежі є охолодження резервуара, що горить, і сусідніх з ним шляхом подачі на них води. Для цього можуть бути використані як стаціонарні установки, так і пересувна техніка. Враховуючи обмеженість сил і засобів на початку локалізації пожежі, а також той факт, що під впливом пожежі сталеві конструкції сусідніх резервуарів можуть досягти небезпечних значень температури вже через 15 хв. після початку пожежі, важливим є визначення першочергових задач для оперативно-рятувальних підрозділів, що прибувають до місця виклику.

Найбільш вагомими науковими результатами в даній галузі отримані в роботах вітчизняних та закордонних вчених: В.І. Блінова, Г.М. Худякова, В.В. Ковалишина, М.М. Семерака, О.Є. Басманова, В.В. Ніжника,

А.О. Михайлюка, М. Elhelw, S.N. Espinosa, О. Ahmadi, Т. Lackman, М. Hallberg, J. Moorhouse та ін.

Наслідки теплового впливу пожежі на резервуар з нафтопродуктом залежать від властивостей нафтопродукту (температури самоспалахування його парів), властивостей рідини, що горить (температури полум'я і ступеня його чорноти), метеорологічних умов (напрямку та швидкості вітру). В той же час існуючі рекомендації щодо початку охолодження сусідніх резервуарів базуються на експерименті з горіння пального ТС-1 у резервуарі РВС-5000. З іншого боку, має місце недостатня кількість сил та засобів для реагування на надзвичайні ситуації в резервуарних парках унаслідок пожежі або вибуху. Обмеженість сил і засобів, невизначеність щодо інтенсивності подачі води на охолодження і обумовлюють протиріччя, розв'язання якого потребує оптимізації наявних сил та засобів для реагування на надзвичайну ситуацію. Тому підвищення ефективності реагування на надзвичайні ситуації техногенного характеру унаслідок пожежі на об'єкті зберігання нафтопродуктів є актуальною науково-практичною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано в науковому відділі з проблем цивільного захисту та техногенно-екологічної безпеки науково-дослідного центру Національного університету цивільного захисту України (м. Харків) відповідно до «Плану наукової та науково-технічної діяльності ДСНС України на 2019 рік» та Указу Президента України №722/2019 від 30 вересня 2019 року «Про цілі сталого розвитку України на період до 2030 року», у рамках науково-дослідної роботи «Розробка методу запобігання каскадному розповсюдженню пожежі в резервуарному парку» (№ ДР 0122U000007), в якій здобувач був відповідальним виконавцем.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення ефективності реагування на надзвичайні ситуації техногенного характеру

унаслідок пожежі на об'єкті зберігання нафтопродуктів шляхом оптимального вибору сил та засобів для охолодження сусідніх резервуарів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні науково-технічні задачі:

1. Проаналізувати стан безпеки в резервуарних парках та методи запобігання поширенню надзвичайної ситуації.

2. Розробити моделі нагріву стінки і покрівлі резервуара під тепловим впливом пожежі.

3. Розробити модель охолодження резервуара шляхом подачі води на його стінку і покрівлю та перевірити її експериментально.

4. Розробити рекомендації щодо вибору сил та засобів та інтенсивності подачі води на охолодження резервуара, який не горить.

**Об'єкт дослідження.** Тепловий вплив пожежі в резервуарі з нафтопродуктом на сусідні резервуари.

**Предмет дослідження.** Оптимізація сил та засобів для охолодження резервуарів з нафтопродуктом, сусідніх з тим, що горить.

**Методи дослідження.** У роботі використовуються аналітичні і чисельні методи досліджень. Моделювання нагріву резервуара з нафтопродуктом під тепловим впливом пожежі проводилося на основі теорії тепломасопередачі. Для побудови оцінки коефіцієнта конвекційного теплообміну між резервуаром і газовим або рідким середовищем було використано методи теорії подібності. Для розв'язання системи диференціальних рівнянь теплообміну застосовувався метод скінчених різниць.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. *Вперше* поставлено і розв'язано задачу оптимального вибору сил та засобів для подачі води для охолодження стінок і покрівлі резервуара, сусіднього з тим, що горить. При цьому критерієм оптимізації є мінімум витрат води або мінімум задіяного особового складу, або автоцистерн, а обмеженням – охолодження стінки та покрівлі резервуара до безпечної температури.

2. *Удосконалено* модель охолодження стінок і покрівлі резервуара водою в умовах пожежі в сусідньому резервуарі. Модель спирається на рівняння теплового балансу для стінки або покрівлі і рівняння теплового балансу водної плівки, що стікає по ній. Модель дозволяє визначити розподіл температур по стінці або покрівлі та по водній плівці.

3. *Набула подальшого розвитку* модель теплового впливу пожежі в резервуарі з нафтопродуктами на сусідні резервуари. Побудована модель враховує теплообмін резервуара, що нагрівається, випромінюванням з факелом, навколишнім середовищем і внутрішнім простором резервуара, а також конвекційний теплообмін з навколишнім повітрям і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара. Особливістю моделі є врахування нахилу факела вітром.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в розробці моделей і алгоритмів, які є основою для системи підтримки прийняття рішення керівником гасіння пожежі. Розроблені моделі і алгоритми можуть бути використані як на етапі проектування резервуарних парків, так і для оцінки пожежної небезпеки вже існуючих об'єктів, а також в оперативному режимі під час ліквідації наслідків надзвичайної ситуації

Моделі теплового впливу пожежі на резервуари з нафтопродуктами, методи розрахунку необхідної інтенсивності подачі води на охолодження покрівлі і стінок резервуарів впроваджені для розробки планів пожежогасіння та організаційно-технічних заходів щодо попередження, локалізації та гасіння пожеж резервуарів "РВС" в 6-му ДПРЗ ГУ ДСНС України у Луганській області.

Моделі охолодження стінки і покрівлі резервуару, алгоритми розрахунку температури сухої стінки і покрівлі резервуару у вигляді програмного комплексу були використані для розробки планів пожежогасіння в 8-му ДПРЗ ГУ ДСНС України у Луганській області.



Теоретичні положення роботи використані в навчальному процесі кафедри пожежної та рятувальної підготовки факультету оперативно-рятувальних сил Національного університету цивільного захисту України.

Функціональна схема пожежного монітора для охолодження резервуарів запатентована (Патент України).

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційного дослідження отримані автором особисто і наведені в роботах [68–76, 81, 83, 85–87]. В наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, особисто здобувачу належать: в роботі [68] – побудова рівняння теплового балансу для стінки резервуара і його чисельне розв’язання; в роботі [69] – оцінка теплового потоку від пожежі до стінки резервуара, а також розв’язання рівняння теплопровідності у стінці резервуара; [72] – побудова моделі теплового впливу пожежі горючої рідини на стінку резервуара; [73] – розрахунок коефіцієнта взаємного опромінення між факелом у формі конуса і циліндричною стінкою; [74] – розробка моделі теплового балансу для покрівлі вертикального сталевго резервуара в умовах пожежі нафтопродукту в сусідньому резервуарі; [75] – розв’язання рівняння теплопровідності для покрівлі резервуара в умовах теплового впливу пожежі. Визначено динаміку зміни і розподіл температур по покрівлі вертикального сталевго резервуара; [76] – визначення коефіцієнта взаємного опромінення між покрівлею вертикального сталевго резервуара і полум’ям пожежі горючої рідини в сусідньому резервуарі; [83] – визначення такої мінімально можливої інтенсивності подачі води на охолодження резервуара в умовах пожежі, при якій досягається охолодження його сталевих конструкцій до безпечних значень температури; [85] – постановка задачі вибору оптимальної інтенсивності подачі води на охолодження резервуара та розробка алгоритму її розв’язання; [86] – розрахунок сил та засобів, необхідних для локалізації пожежі в залежності від обраного критерію оптимізації; [87] – патентний пошук, визначено кут

встановлення насадка в вертикальній площині і кут розпилу води в горизонтальній площині.

**Апробація результатів дисертаційного дослідження.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту», м. Харків, 2021 р. (форма участі – очна); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми пожежної безпеки 2022», м. Харків, 2022 р. (форма участі – очна); XII Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю, м. Черкаси, 2022 р. (форма участі – очна); Міжнародній науково-практичній конференції «Problems of Emergency Situations», м. Харків, 2023 р. (форма участі – очна); XVIII Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, курсантів та студентів, м. Львів, 2023 р. (форма участі – заочна); III Всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні проблеми та перспективи розвитку фундаментальних, прикладних, загальнотехнічних та безпекових наук», Київ, 2023 р. (форма участі – заочна); XV Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» м. Черкаси, 2024 р. (форма участі – очна).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць: 6 статей у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat; 8 тез доповідей на конференціях; 1 патент України на корисну модель.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота загальним об'ємом 189 сторінок складається з анотації, змісту, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 88 найменувань і 2 додатків, містить 68 рисунків та 10 таблиць.

## **РОЗДІЛ І**

### **СТАН БЕЗПЕКИ В РЕЗЕРВУАРНИХ ПАРКАХ ТА МЕТОДИ ЗАПОБІГАННЯ ПОШИРЕННЮ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ**

В даному розділі проведено аналіз літературних джерел, в результаті якого визначено, що основним місцем зберігання нафти і нафтопродуктів є резервуарні парки. Для зберігання нафти і нафтопродуктів використовуються переважно наземні резервуари, а саме, вертикальні сталеві резервуари.

Надзвичайним ситуаціям в резервуарних парках притаманний ефект доміно, коли одна аварія стає підґрунтям для інших аварій. При цьому основну небезпеку складають пожежі горючих і легкозаймистих рідин. Тому першочерговою задачею оперативно-рятувальних підрозділів є локалізація надзвичайної ситуації, що досягається шляхом охолодження резервуара, що горить, і сусідніх з ним резервуарів.

#### **1.1. Загальна характеристика резервуарів і резервуарних парків**

Резервуарні парки є основним місцем зберігання нафти і нафтопродуктів в процесі їх зберігання і транспортування. Вони входять в технологічні схеми збору і підготовки нафти, магістральних нафтопродуктопроводів, нафтопереробних заводів, перевалочних і розподільчих нафтобаз та інших підприємств.

Одними із найнебезпечніших надзвичайних ситуацій, що виникають в резервуарних парках, є ситуації, пов'язані з пожежами нафтопродуктів. Причиною пожежі може бути як технологічний збій, наприклад, переповнення резервуара під час його заповнення, так і самоспалахування відкладень сульфідів [1, 2]. Особливу небезпеку складає розповсюдження пожежі на сусідні об'єкти, зокрема на резервуари з нафтопродуктами. Такі пожежі носять затяжний характер і призводять як до значних матеріальних збитків, так і

людських жертв [3]. Причиною каскадного поширення пожежі є тепловий вплив на сталеві конструкції, що призводить не лише до втрати ними міцності [4], а й до перетворення їх у джерело запалення, якщо їх температура досягає температури самоспалахування горючої рідини. Якщо концентрація парів нафтопродукту в газовому просторі резервуара знаходиться між нижньою і верхньою концентраційними межами розповсюдження полум'я, то наявність такого джерела запалення призводить до вибуху пароповітряної суміші. Якщо ж концентрація парів перевищує верхню концентраційну межу, то виникає горіння парів на виході із дихальної отворів.

Окрім завдання збитків технологічним об'єктам і природним ландшафтам [5], це призводить до викиду забруднюючих речовин в атмосферу [6]. Розповсюджуючись на великі відстані, вони істотно впливають на стан повітря і створюють ризики для населення [7].

Вирізняють наступні види резервуарів:

- заглиблені (підземні);
- напівзаглиблені – покрівля резервуара знаходиться над рівнем землі на висоті, що не перевищує половину висоти корпусу резервуара;
- наземні.

Найбільш поширеними і в Україні, і в світі є наземні резервуари, а саме – вертикальні сталеві резервуари (РВС), які виконуються із сталевих листів. Товщина листів біля основи резервуара складає від 10 до 25 мм, а біля покрівлі – від 4 до 6 мм в залежності від об'єму резервуара.

На вертикальні сталеві резервуари припадає близько 95% загального об'єму нафти і нафтопродуктів, що зберігаються в резервуарних парках. В свою чергу вертикальні сталеві резервуари підрозділяються на

- резервуари зі стаціонарною покрівлею;
- резервуари з покрівлею, що плаває;
- резервуари з понтоном і стаціонарною покрівлею.

Як правило, використовуються лише резервуари зі стаціонарною покрівлею з понтоном або без понтона. Стінка таких резервуарів одинарна, резервуари з подвійною стінкою використовуються в окремих випадках [8]. В табл. 1.1 наведено об'єми і розміри типових вертикальних сталевих резервуарів.

Таблиця 1.1

Номінальні об'єми і розміри вертикальних сталевих резервуарів

Номінальний об'єм, м <sup>3</sup>	Зі стаціонарною покрівлею (з понтоном або без понтона)		З покрівлею, що плаває	
	Діаметр, м	Висота, м	Діаметр, м	Висота, м
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	9,0
2000	15,2	12,0	15,2	12,0
3000	19,0	12,0	19,0	12,0
5000	21,0	15,0	23,0	12,0
	23,0	12,0		
10000	28,5	18,0	28,5	18,0
	34,2	12,0		
15000	34,2	18,0	34,2	18,0
	40,0	12,0		
20000	40,0	18,0	40,0	18,0
	45,6	12,0		
30000	45,6	18,0	45,6	18,0
40000	56,9	18,0	56,9	18,0
50000	60,7	18,0	60,7	18,0
100000	-	-	85,3	18,0
120000	-	-	92,3	18,0

Основним способом зберігання нафти і нафтопродуктів є використання вертикальних сталевих резервуарів. Економічні міркування та технологічна

необхідність підштовхують до укрупнення резервуарів і компактного їх розміщення. Це, в свою чергу, негативно відбивається на пожежній безпеці резервуарних парків.

Відповідно до класифікатора надзвичайних ситуацій [9] вони поділяються за характером походження, ступенем поширення, розміром людських втрат та матеріальних збитків (рис. 1.1).

Код	Назва
10000	НС техногенного характеру
10200	НС унаслідок пожеж, вибухів
10220	НС унаслідок <u>пожежі, вибуху на об'єкті</u> розвідування, видобування, переробляння, транспортування чи <u>зберігання</u> <u>легкозаймистих, горючих</u> , а також вибухових <u>речовин</u>

а)

Державний рівень
Регіональний рівень
Місцевий рівень
Об'єктовий рівень

б)

Рис. 1.1. Класифікація надзвичайних ситуацій у резервуарних парках відповідно до класифікатора надзвичайних ситуацій: а) за характером походження; б) за ступенем поширення

Отже, в роботі будуть розглядатися надзвичайні ситуації техногенного характеру унаслідок пожеж, вибухів на об'єктах зберігання легкозаймистих і горючих рідин.

## 1.2. Статистика аварій в резервуарних парках

Скупчення великої кількості горючих і легкозаймистих рідин на відносно невеликій площі призводить до високого рівня пожежної небезпеки. Пожежа в резервуарі або в його обвалуванні часто призводить до каскадного

розповсюдження пожежі [10]. В [11] проведено статистичний аналіз 1144 аварій, що мали місце в резервуарних парках. З них 100 класифіковано як аварії, які супроводжувалися ефектом доміно. Визначено найбільш вірогідні послідовності причинних факторів для ініціювання аварій типу «доміно». В [12] проаналізовано 224 великих аварії і відзначено, що багатьом з них був притаманний «ефект доміно» тобто таких ситуацій, коли одна аварія, навіть відносно незначна, створює підґрунтя для іншої. Згідно з [13] близько 44% масштабних пожеж, в яких мав місце ефект «доміно», починалися саме з пожежі в резервуарі або з пожежі розливу. Аналогічний висновок зроблено і в [14] – пожежі спричиняють майже 43% усіх «ефектів доміно», причому найбільш поширеним сценарієм є пожежа в резервуарі або розливу горючої рідини. Статистичний аналіз аварій «доміно» [15] показує, що найчастішими причинами є зовнішні події (31%) та механічні несправності (29%) – рис 1.2.



Рис. 1.2. Розподіл причин аварій, що викликають «ефект доміно»

Аварії відбувалися на технологічних установках (38,5%), складах (33%), при транспортуванні (10,6%) – рис. 1.3. При цьому аварії з ефектом «доміно» відбувалися зі скрапленим газом і вуглеводнями [16]. Втім, в усіх зазначених

роботах питання щодо запобігання розповсюдженню аварії залишилось відкритим.

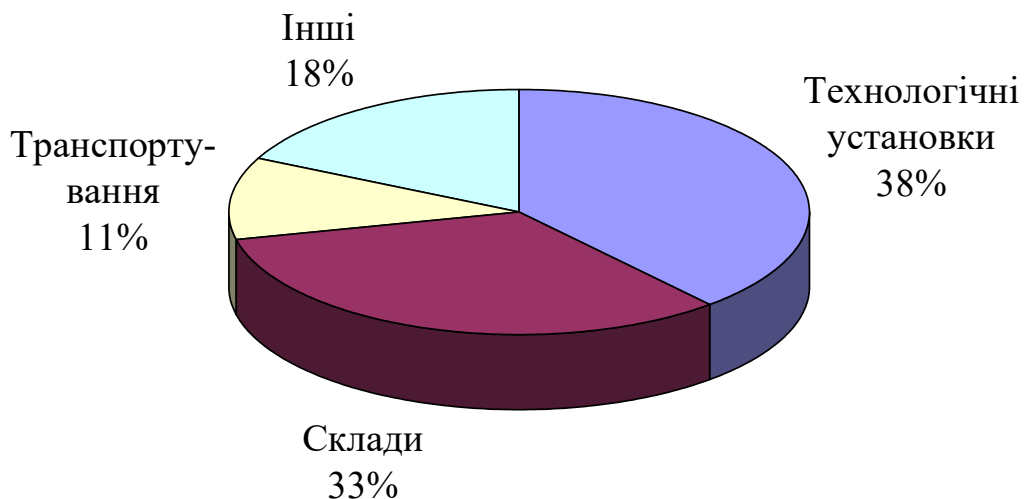


Рис. 1.3. Розподіл аварій за місцем їх виникнення

Розподіл пожеж по видах нафтопродуктів наведено на рис. 1.4, де до інших нафтопродуктів віднесені мазут, гас, дизельне паливо, мастило.

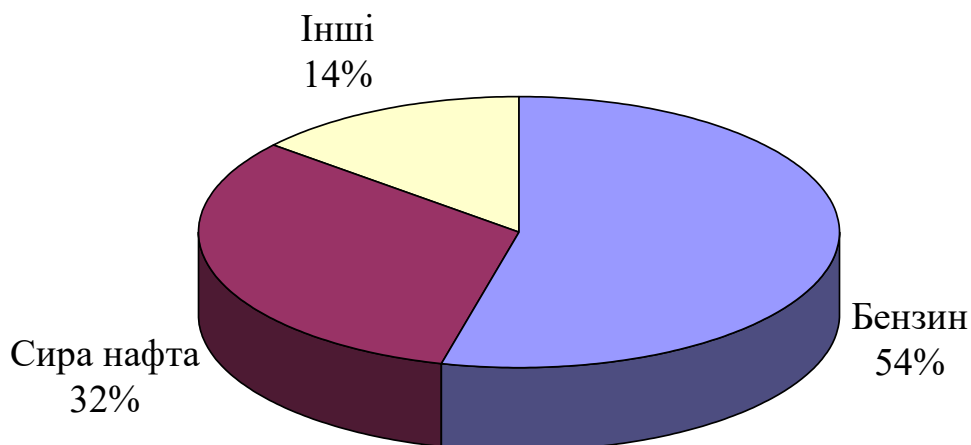


Рис. 1.4. Розподіл пожеж в резервуарах по видах нафтопродуктів

Пожежі горючих рідин є одним із домінуючих сценаріїв розвитку (42%) при аваріях на промисловості. Крім того, серед надзвичайних ситуацій,



пов'язаних з пожежами, близько 60% займають пожежі горючих рідин [17]. Горіння в резервуарі починається, як правило, з вибуху пароповітряної суміші в газовому просторі резервуара. Типовою причиною є ручний відбір проб з покрівлі резервуара.

Отже, істотну небезпеку при аваріях в резервуарних парках являє «ефект доміно», коли одна аварія створює підґрунтя для інших. Це обумовлено високою концентрацією горючих і легкозаймистих рідин на невеликій площі.

### **1.3. Особливості надзвичайних ситуацій в резервуарних парках в умовах бойових дій**

З початку повномасштабної російської військової агресії проти України резервуарні парки виявилися однією з пріоритетних цілей. Вони потрапляли під обстріли артилерії, авіації (поблизу лінії бойового зіткнення), балістичних та крилатих ракет, безпілотних літальних апаратів (в тилу). Зокрема, лише за період з 24 лютого 2022 р. по 1 квітня 2022 р. зареєстровано 14 пожеж в резервуарних парках на території Волинської, Житомирської, Київської, Луганської, Львівської, Миколаївської, Рівненської, Харківської, Хмельницької областей [18]. Ураження об'єктів резервуарного парку призводить до їх повної або часткової руйнації, або до пошкодження в залежності від типу боєприпасу. Як правило, наслідком такого ураження є пожежа.

Зокрема, масштабна за наслідками пожежа сталася на території комплексу первинної переробки вуглеводної сировини ТОВ «АЛЕКСПРОМ», розташованого у смт Губиниха Новомосковського району Дніпропетровської області (рис. 1.5). Повідомлення до Служби порятунку «101» надійшло 18 червня 2022 року о 19.30. Пожежу локалізували 19 червня 2022 року о 12.00, а ліквідували – 23 червня 2022 року о 09.25. Вогнем знищено: резервуари РВС-900 (6 шт.), резервуари РВС-600 (4 шт.), резервуари РГС-50 (16 шт.), РГС-25 (3 шт.), металеві горизонтальні резервуари (5 шт.). Ушкоджень зазнали будівлі і

техніка. Унаслідок пожежі загинуло 3 людини, травмовано 10 людей (із них 2 співробітника ДСНС). Причиною пожежі став вибух унаслідок артилерійського обстрілу [19].



Рис. 1.5. Пожежа на нафтобазі в смт Губиниха внаслідок артилерійського обстрілу

Внаслідок влучання ворожих БпЛА Shahed по нафтобазі ТОВ «ХНБ-Резерв» (м. Харків) 09 лютого 2024 р. виникла пожежа, в ході якої горіли 4 резервуари по 400 м<sup>3</sup>, 5 резервуарів по 900 м<sup>3</sup>. Внаслідок пожежі загинули 7 осіб і 3 були травмовані [20].

Отже, основною причиною надзвичайних ситуацій в резервуарних парках в Україні за останні 2 роки є їх обстріли. І майже всі вони супроводжуються пожежами.

#### **1.4. Реагування на надзвичайні ситуації унаслідок пожеж в резервуарних парках**

Відповідно до Кодексу цивільного захисту України [21] реагування на надзвичайні ситуації включає в себе дії щодо локалізації зони надзвичайної

ситуації, а також ліквідації або мінімізації її наслідків. Стосовно резервуарних парків це означає, по-перше, охолодження резервуарів, що горять, та сусідніх з ними, а по-друге, підготовку і проведення пінної атаки.

#### 1.4.1. Охолодження резервуарів

Охолодження резервуарів є першочерговою задачею при пожежі в резервуарному парку. При цьому, по-перше, необхідно забезпечити охолодження резервуара, що горить, а, по-друге, – сусідніх з пожежею резервуарів [22, 23]. У випадку пожежі в обвалуванні найбільшої уваги потребує резервуар, в обвалуванні якого відбулися розлив горючої рідини на займання.

Для охолодження резервуарів використовується вода. Для її подачі можуть бути використані:

- стаціонарні системи охолодження, якими обладнані резервуари, – кільця зрошення;
- стаціонарні гідромонітори, встановлені за межами обвалування;
- лафетні та ручні стволи, підключені до пересувної техніки.

Майже всі вертикальні сталеві резервуари обладнані кільцями зрошування для подачі води на охолодження зовнішнього боку стінки резервуара. Якщо пожежа відбувається в резервуарі, то часто внаслідок вибуху, що передуює пожежі, стаціонарні системи пожежогасіння і охолодження виходять з ладу [8]. У випадку пожежі в обвалуванні такі системи залишаються неушкодженими і можуть виконувати свою задачу.

Кільце зрошування розташовується в верхній частині резервуара і являє собою перфоровану трубу діаметром  $d = (80 \div 150)$  мм, що охоплює резервуар по периметру (рис. 1.6).

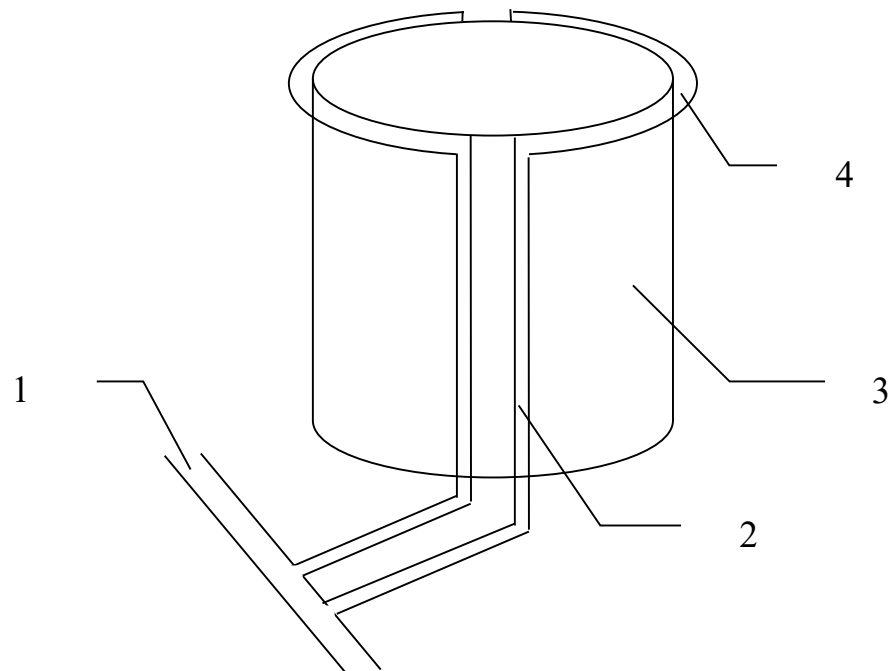


Рис. 1.6. Схема кільця зрошення на резервуарі: 1 – протипожежний водопровід; 2 – сухотруб; 3 – резервуар; 4 – кільця зрошення

Діаметр отворів в кільці зрошення  $d_1 \sim 5$  мм, відстань між отворами (200÷350) мм. Додатково кільце зрошення може бути розділено на дві, чотири або більше рівних частини, кожна з яких має свій сухий стояк, з'єднаний за допомогою горизонтального водопроводу, прокладеним під землею, з зовнішнім протипожежним водопроводом резервуарного парку через засув з ручним та автоматичним приводом для подачі води при пожежі.

Недоліком зрошувальних кілець є можливість їх пошкодження у випадку, якщо пожежа починається з вибуху пароповітряної суміші, або розповсюджується з резервуара на обвалування.

Гідромонітори розташовують за межами обвалування резервуара. Це дозволяє захистити їх від впливу вибуху або пожежі в резервуарі та обвалуванні. Згідно [24, 25] відстань від стінки резервуара до внутрішнього боку обвалування має бути

- не менше 6 м для резервуарів, об'ємом 10000 м<sup>3</sup> і більше;
- не менше 3 м для резервуарів, об'ємом менше 10000 м<sup>3</sup>.

З врахуванням товщини обвалування, відстань по горизонталі від гідромонітора до стінки резервуара може складати  $6\div 10$  м. Крім того, вода має бути подана на висоту резервуара –  $12\div 18$  м (табл. 1.1). Все це потребує компактного і потужного струменя, що призводить до значно більших витрат води порівняно з стаціонарними зрошувальними кільцями. Додатково, слід врахувати, що частина води після удару струменя об стінку резервуара буде відбиватися від неї, не приймаючи участі в охолоджувальній дії [26].

Згідно з [22, 23] спочатку стволи подаються на охолодження резервуара, що горить, а потім – на охолодження сусідніх. Охолодження триває, доки пожежу не буде ліквідовано. У випадку пожежі в обвалуванні резервуара для його охолодження мають використовуватися лафетні стволи [22].

Головним недоліком такого методу охолодження є затримка близько 15 хв. між надходження сигналу про пожежу і подачею перших стволів на охолодження. Цього часу може бути достатньо для розгерметизації технологічних трубопроводів і витоку нафтопродуктів з них до осередку горіння або для нагріву сталевих конструкцій резервуара до температури самоспалахування парів нафтопродукту.

Отже, для основним методом локалізації пожежі в резервуарі є охолодження резервуара, що горить і сусідніх з ним. Для цього можуть бути використані кільця охолодження на резервуарах, стаціонарні гідромонітори або пересувна техніка. Кожен з наведених способів має свої переваги та недоліки.

#### **1.4.2. Проведення пінної атаки**

Згідно з Інструкцією щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами [23] основними оперативно-тактичними діями пожежних підрозділів, спрямованих на гасіння пожежі в резервуарному парку, є

- розвідка пожежі;
- охолодження резервуара, що горить, та сусідніх резервуарів;

- підготовка та проведення пінної атаки.

Гасіння пожежі нафтопродукту відбувається шляхом подачі піни середньої або низької кратності на дзеркало нафтопродукту. Необхідний запас піноутворювача накопичується етапі підготовки до пінної атаки. Протягом цього часу має відбуватися охолодження резервуарів. Інтенсивність подачі піноутворювача визначається типом нафтопродукту, що горить, і складає [23]

- 0,08 л/(м<sup>2</sup>·с) для нафти і нафтопродуктів з температурою спалаху 28 °С і нижче і рідин, які нагріті до температури, вищої за температуру спалаху;
- 0,05 л/(м<sup>2</sup>·с) для нафти і нафтопродуктів з температурою спалаху вище 28 °С.

Розрахунковий час пінної атаки складає [23]

- 50 хв. – для нафти і нафтопродуктів з температурою спалаху 28 °С і нижче і рідин, які нагріті до температури, вищої за температуру спалаху;
- 30 хв. – для нафти і нафтопродуктів з температурою спалаху (28÷95) °С;
- 25 хв. – для нафти і нафтопродуктів з температурою спалаху вище 95 °С.

Крім того, якщо тривалість вільного розвитку пожежі перевищує 3 години, рекомендовано інтенсивність подачі піноутворювача збільшувати в 1,5 рази.

Недостатнє охолодження або невчасний його початок, може призводити до деформації стінок резервуара з утворенням „кишень” (ізольованих зон горіння, подачу піни в які ускладнено). Аналіз пожеж показав, що в цих випадках необхідно збільшення інтенсивності подачі піноутворювача в кілька разів порівняно з нормативною.

Отже, вчасний початок і достатня інтенсивність охолодження дозволяють запобігти поширенню пожежі внаслідок «ефекту доміно» і тим самим скоротити час гасіння пожежі і зменшити збитки від неї.

## 1.5. Моделювання пожеж у вертикальних сталевих резервуарах

### 1.5.1. Моделювання факела над дзеркалом горючої рідини кругової форми

Інформація про розміри і форму факела над дзеркалом горючої рідини є вихідною для оцінки теплового впливу пожежі на навколишні об'єкти. Спостереження свідчать про те що, факел не має певної форми, крім того, вона змінюється з часом внаслідок турбулентного характеру горіння. В [27] досліджено особливості турбулентного полум'я на прикладі горіння гептану в резервуарі діаметром 7,1 см. Але для практичних розрахунків форму факела над круговим розливом приймають, як правило, у вигляді простої геометричної фігури: конуса [28], циліндра [29], сфери [30], еліпсоїда [31, 32].

В загальному випадку довжина полум'я є функцією діаметра і швидкості вигорання. Однією з найбільш поширених апроксимацій є [33, 34, 35]

$$\frac{L}{D} = 42 \left[ \frac{m}{\rho \sqrt{gD}} \right]^{0,61}, \quad (1.1)$$

де  $D$  – діаметр дзеркала рідини;  $L$  – середня довжина полум'я;  $\rho$  – густина повітря;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $m$  – масова швидкість вигорання.

Окрім (1.1) існують інші наближення для виразу довжини полум'я від масової швидкості вигорання і діаметра розливу. Вони мають форму подібну до (1.1), але містять інші коефіцієнти [36, 37, 38, 39, 40, 41]:

$$\frac{L}{D} = a \left( \frac{m}{\rho \sqrt{gD}} \right)^b u^{*c},$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – емпіричні константи, що визначаються в залежності від умов експерименту і осередку горіння;  $u^*$  – безрозмірна швидкість вітру:

$$u^* = w \left( \frac{gmD}{\rho} \right)^{-1/3}, \quad (1.2)$$

$w$  – швидкість вітру. При цьому, якщо  $u^* < 1$ , то приймається  $u^* = 1$ .

Поруч з (1.1) і (1.2) існує більш проста оцінка довжини факела над дзеркалом горючих рідин і легкозаймистих рідин відповідно [22]:

$$L = 1,2D \text{ (ГР)}; \quad (1.3)$$

$$L = 1,4D \text{ (ЛЗР)}. \quad (1.4)$$

Наявність вітру призводить до того, що факел відхиляється від вертикальної вісі, зберігаючи довжину  $L$  (рис. 1.7)

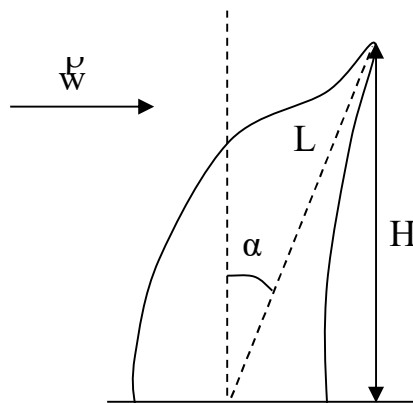


Рис. 1.7. Відхилення полум'я від вертикальної вісі під впливом вітру



Кут нахилу визначається швидкістю вітру. Спостереження показують, що при швидкості вітру  $w = 2$  м/с кут нахилу складає близько  $45^\circ$  [42], при швидкості  $w = 4$  м/с –  $60^\circ$ - $70^\circ$  [23], при швидкості  $w = 10$  м/с –  $75^\circ$ - $80^\circ$  [43].

В [44] наведено результати теоретичного і експериментального дослідження структури факела над резервуаром з нафтою, що горить. Зокрема, визначено висоту полум'я і умови, при яких факели над двома резервуарами можуть з'єднуватися в один. Але тепловий вплив пожежі на інші об'єкти резервуарного парку в роботі не розглядається.

В [45] на основі експериментальних досліджень з горіння n-гептану, дизеля, гасу і бензину побудовано модель швидкості вигорання рідини в нестационарних умовах. Але тепловий вплив пожежі на навколишні об'єкти в роботі не розглядається. В [46] за допомогою середовища моделювання динаміки пожежі (FDS) розглянуто горіння розливу і його вплив на сусідній резервуар. Визначено зони безпечного розташування сил та засобів, що задіяні у ліквідації пожежі. До недоліків слід віднести неможливість узагальнення отриманих результатів.

### **1.5.2. Моделі теплового впливу пожежі на резервуар з нафтопродуктом**

Найбільш дослідженим є варіант горіння нафтопродукту в резервуарі. Цій ситуації присвячено низку теоретичних і експериментальних досліджень. В Інструкції щодо гасіння пожеж в резервуарах з нафтою і нафтопродуктами [23] наведено номограми:

- для визначення максимально припустимого часу введення сил і засобів для охолодження резервуарів, які розташовані поряд з резервуаром, що горить;
- для визначення вибухонебезпеки середовища в резервуарі, що горить.

Недоліком цих номограм є те, що вони побудовані для конкретних умов, а саме

- небезпечна температура нагріву – 176 °С – відповідає 0,8 температури самоспалахування пального ТС-1;
- густина випромінювання прийнята 73 кВт/м<sup>2</sup> (дизельне пальне);
- вітер відсутній.

Отже, у випадку, коли умови пожежі відрізняються від перерахованих вище, керівник гасіння пожежі має скорегувати результати, отримані із номограм, керуючись власним досвідом чи інтуїцією.

В [47] експериментально досліджується вплив швидкості поперечного повітряного потоку і атмосферного тиску на частку теплового потоку випромінюванням від рідини, що горить. Але результати досліджень, отримані на резервуарах діаметром (10÷70) см, складно перенести на реальні резервуари діаметром десятки метрів (табл. 1.1). В [48] на основі експериментальних даних запропоновано корегування стандартних формул для обчислення теплового випромінювання від пожежі рідини. Але такий підхід неможливо використовувати у випадку, коли умови відрізняються від умов, створених в експерименті.

В [49] з використанням методу пробіт-функцій визначено критичну теплову дозу для відмови обладнання. Це дозволяє враховувати вплив первинного та кількох вторинних сценаріїв пожежі на подальше спричинення ефекту доміно, і отримати час до подальших відмов. Але такий підхід не враховує метеорологічних умов і, зокрема, напрямку і швидкості вітру, що істотно впливають на тепловий потік від пожежі до певного технологічного об'єкта. В [50] проведено ймовірнісний аналіз відмов, які здатні призвести до каскадного розповсюдження аварії. Такий підхід дозволяє виявити слабкі місця в системі пожежної безпеки, але не дає відповіді про шляхи її покращення. В [51] за допомогою нейронної мережі визначається критичний час перебування резервуара з горючої рідиною під тепловим впливом пожежі. Недоліком такого

підходу є те, що він спирається на статистику, а не на фізичні процеси. Як наслідок, побудована модель є вірною лише в діапазоні тих статистичних даних, на які вона спирається. Ймовірнісна модель розповсюдження ланцюга доміно розглянута в [52], але і тут без відповіді залишається питання щодо вибору сил і засобів для локалізації аварії.

Прогнозуванню і попередженню каскадних аварій присвячено [53], але запобігання розглянуто лише з точки зору профілактики, а не ліквідації аварії. В [26] побудовано модель теплового впливу пожежі в резервуарі на сусідній резервуар з нафтопродуктом, особливістю якої є розбиття стінки резервуара, що нагрівається, на окремі області, побудові рівнянь теплового балансу для кожної з областей. Запропоновані рівняння теплового балансу враховують променистий теплообмін з факелом, навколишнім середовищем і іншими частинами резервуара, а також конвекційний теплообмін з навколишнім повітрям і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара. При розрахунку променистого теплового потоку враховано нахил факела під впливом вітру. Показано, що небезпеку являє нагрів сухої стінки резервуара – частини стінки, що знаходиться вище рівня нафтопродукту. Змочена стінка (нижче рівня нафтопродукту) є у відносній небезпеці внаслідок охолоджувальної дії нафтопродукту в резервуарі.

В [54] побудовано модель теплового впливу пожежі на резервуар зі скрапленим природним газом. Але питання захисту резервуара залишається не розглянутим. В [55] методами обчислювальної гідродинаміки досліджується пожежа скрапленого нафтового газу і визначається безпечна відстань. Але на практиці технологічні і економічні причини обумовлюють розташування обладнання на значно менших відстанях, ніж безпечна. В [56] побудовано модель нагріву резервуара з горючою рідиною під тепловим впливом від кількох осередків горіння.

В [57] досліджено напружено-деформований стан вертикального сталевого резервуара, що нагрівається. В [58] досліджується тепловий вплив

пожежі в резервуарі з нафтопродуктом на сусідній резервуар. Розглянуто рівняння теплопровідності всередині стінки резервуара, з крайовими умовами третього роду, що описують променевий теплообмін з факелом пожежі і розігрітими стінками резервуара, що горить. Але конвекційна складова теплообміну в роботі не розглянута. В [59] розглянуто двозонну модель полум'я: нижня високотемпературна частина полум'я і низькотемпературна верхня частина. Побудовано модель теплового впливу на сусідній резервуар з нафтопродуктом, але не враховано різні температури на зовнішній і внутрішній поверхнях стінки резервуара. В [60] досліджено вплив пульсацій полум'я на тепловий потік і міцність сталевих конструкцій резервуара, що нагрівається.

В [61] проведено порівняння теплового впливу пожежі в резервуарі і пожежі в обвалуванні на сусідній резервуар і зроблено висновок про більше небезпеку горіння в обвалуванні. Але вплив вітру в роботі не розглянуто. В [62] побудовано модель теплового впливу пожежі розливу горючої рідини в обвалуванні на резервуар з нафтопродуктом, але випадок горіння рідини в резервуарі залишено поза увагою.

В [63] побудовано модель нагріву резервуара від пожежі розливу, яка враховує нагрів стінки резервуара під впливом випромінювання пожежі, охолодження зовнішньої і внутрішньої поверхонь стінки за рахунок конвекції, охолодження внаслідок теплового випромінювання в навколишнє середовище. Але вплив вітру на зміну форми факела і збільшення інтенсивності охолодження внаслідок вимушеної конвекції в роботі не розглянуто.

Отже, вплив вітру на тепловий потік від резервуара, що горить, до сусідніх резервуарів враховано недостатньо. Це, в свою чергу, може призводити до похибки в оцінці наслідків теплового впливу пожежі на сусідні резервуари.

### 1.5.3. Моделі охолодження резервуара водою

В Інструкції щодо гасіння пожеж в резервуарах з нафтою і нафтопродуктами [23] наведено нормативні інтенсивності подачі води на охолодження резервуарів – табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Нормативна інтенсивність подачі води на охолодження вертикальних сталевих резервуарів

Установки охолодження резервуарів	Інтенсивність подавання води на охолодження, л/с на 1 метр довжини		
	окружності резервуара, що горить	половини окружності сусіднього резервуара	окружності резервуара при пожежі в обвалуванні
Стаціонарна установка для резервуарів зі стінками, висотою більше 12 м (крім резервуарів з плаваючою покрівлею)	0,75	0,3	1,2
для резервуарів зі стінками висотою 12 м і менше і резервуарів з плаваючою покрівлею	0,5	0,2	
Пересувна	0,8	0,3	

Нормативні інтенсивності не враховують вид нафтопродукту, що горить, хоча це суттєво впливає на тепловий потік від пожежі (табл. 1.3).

Враховуючи, що щільність теплового потоку пропорційна четвертій степені температури полум'я і ступеню його чорноти, щільність теплового потоку від пожежі бензину буде в 1,5 рази перевищувати щільність теплового потоку від пожежі сирої нафти.

Таблиця 1.3

## Характеристики нафтопродуктів

Продукт	Тип рідини	Температура полум'я, °С	Ступінь чорноти полум'я	Температура самоспалахування парів, °С
Сира нафта	ГР	1100	0,85	280-350
Бензин	ЛЗР	1200	0,97	300
Гас	ЛЗР	800	0,85	220
Мазут	ГР	1000	0,85	350
Дизельне пальне	ЛЗР	1100	0,85	300-330

В [64] на прикладі резервуара РВС-5000 показано, що інтенсивність подачі води за допомогою пересувної техніки на охолодження резервуара, що горить, має складати  $(0,22 \div 1,1)$  л/(м·с) і залежить від виду нафтопродукту і висоти сухої стінки. При цьому горючі рідини з меншою питомою теплотою пожежі потребують меншої інтенсивності подачі води на охолодження. Зменшення висоти сухої стінки призводить до збільшення її температури і, відповідно, збільшення інтенсивності подачі води. В той же час нормативна інтенсивність подачі води складає 0,8 л/(м·с). Таким чином, врахування особливостей пожежі в резервуарі дозволяє в низці випадків зменшити витрати води на його охолодження.

В [65] визначено коефіцієнти конвекційної тепловіддачі від стінки резервуара до водної плівки, що стікає по ній, але розподіл температури по стінці резервуара і воді залишено без уваги. В [66] розглянуто динаміку зміни температури води і стінки при пожежі в обвалуванні резервуара, але неврахованим залишається променевий теплообмін водної плівки з навколишнім середовищем. В [67] розглядається охолодження резервуара за допомогою пожежних моніторів, побудовано рівняння теплового балансу для стінки резервуара і водної плівки, що утворюється при стіканні води. Але поза увагою залишено усталений розподіл температур, по якому доцільно визначати достатність інтенсивності подачі води на охолодження.

Отже, аналіз моделей теплового впливу пожежі нафтопродукту в резервуарі на сусідні резервуари засвідчив, що охолодження резервуарів водою при пожежі залишається недостатньо вивченим. Це, в свою чергу, може призводити до похибки в оцінці необхідної інтенсивності подачі води на охолодження стінок резервуарів.

## **Висновки до розділу I**

1. Резервуарні парки є основним місцем для зберігання нафти і нафтопродуктів в процесі їх переробки і транспортування. В Україні і світі для зберігання нафти і нафтопродуктів використовуються, головним чином, наземні резервуари, а саме, вертикальні сталеві резервуари (РВС). На їх долю припадає понад 90% всіх резервуарів.

2. Аваріям в резервуарних парках притаманний «ефект доміно», коли одна аварія, навіть відносно незначна, створює підґрунтя для іншої. Це обумовлено високою концентрацією легкозаймистих і горючих рідин на відносно невеликій площі резервуарного парку. У разі виникнення горіння тепловий вплив пожежі на сусідні технологічні об'єкти здатен нагріти їх до температури самоспалахування парів рідини, що в них знаходяться. Це може призвести до їх вибуху або займання. Аналіз літературних джерел засвідчив, що близько 43% масштабних аварій в резервуарних парках, яким був притаманний «ефект доміно», починалися з пожежі.

3. В умовах повномасштабної російської агресії проти України резервуарні парки стали однією з цілей при атаках по енергетичній інфраструктурі. Вони потрапляли під удар артилерії, крилатих та балістичних ракет, безпілотних літальних апаратів. В результаті ушкоджень резервуарів та іншого технологічного обладнання виникала пожежа. Внаслідок цього пожежі стали основним видом надзвичайних ситуацій, що виникали в резервуарних парках.

4. Комплексний характер ударів по критичній інфраструктурі призводить до блекаутів, порушень водопостачання, великої кількості одночасних викликів пожежно-рятувальних підрозділів. Все це означає дефіцит сил та засобів для реагування на надзвичайні ситуації техногенного характеру в резервуарних парках унаслідок пожежі або вибуху. Недостатня кількість сил та засобів або їх неефективне використання призводять до «ефекту доміно», призводячи не лише до матеріальних збитків, а й ставлять під загрозу життя рятувальників

5. Існуючі нормативні документи щодо критичного часу початку охолодження резервуарів спираються на експеримент із горіння палива ТС-1 в резервуарі РВС-5000. Нормативна інтенсивність подачі води на охолодження стінок резервуара також не залежить від типу рідини, що горить. В той же час щільність теплового потоку від пожежі істотно залежить від типу рідини, що горить, і відрізняється, наприклад, у 1,5 рази для сирої нафти і бензину. Крім того на щільність теплового потоку від пожежі впливає нахил факела вітром.



## РОЗДІЛ II

### МОДЕЛЬ НАГРІВУ РЕЗЕРВУАРА ПІД ТЕПЛОВИМ ВПЛИВОМ ПОЖЕЖІ СУСІДНЬОГО РЕЗЕРВУАРА

Одними із найнебезпечніших надзвичайних ситуацій, що виникають в резервуарних парках, є надзвичайні ситуації пов'язані з пожежами нафтопродуктів. Типовим сценарієм розвитку надзвичайної ситуації є зрив покрівлі і вільне горіння над поверхнею рідини. Такі пожежі складають близько 40% від загальної кількості пожеж, що виникають в резервуарних парках. Тепловий вплив пожежі здатний призвести до її каскадного розповсюдження на сусідні резервуари.

Даний розділ присвячено побудові математичної моделі нагріву стінки і покрівлі резервуара під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі.

Матеріали розділу викладено в роботах автора [68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76].

#### **2.1. Математична модель нагріву сухої стінки резервуара**

При побудові моделі теплового впливу пожежі в резервуарі на сусідній резервуар будемо виходити з наступних припущень.

1. Передача тепла від факела до стінки сусіднього резервуара відбувається виключно випромінюванням.
2. Зовнішня поверхня стінки резервуара приймає участь в теплообміні випромінюванням і конвекцією із навколишнім середовищем
3. Внутрішня поверхня стінки резервуара приймає участь в теплообміні випромінюванням і конвекцією з середовищем всередині резервуара.
4. Градієнт температури вздовж поверхні стінки резервуара значно менший, ніж градієнт температури по глибині стінки, внаслідок чого прогрів

стінки описується одномірним рівнянням теплопровідності вздовж осі, направленої по нормалі до поверхні стінки резервуара.

Обґрунтуємо зроблені припущення.

Передача тепла при горінні відбувається шляхом випромінювання, конвекції і теплопровідності. При горінні резервуара конвекційний потік, утворений продуктами горіння і розігрітим повітрям, спрямований вгору і не впливає на сусідні резервуари (рис. 2.1). Теплопровідність повітря занадто мала (тепловий потік на чотири порядки менше порівняно з тепловим потоком через випромінювання), щоб мати істотний вплив на сусідні об'єкти. Саме на це і спирається припущення 1.

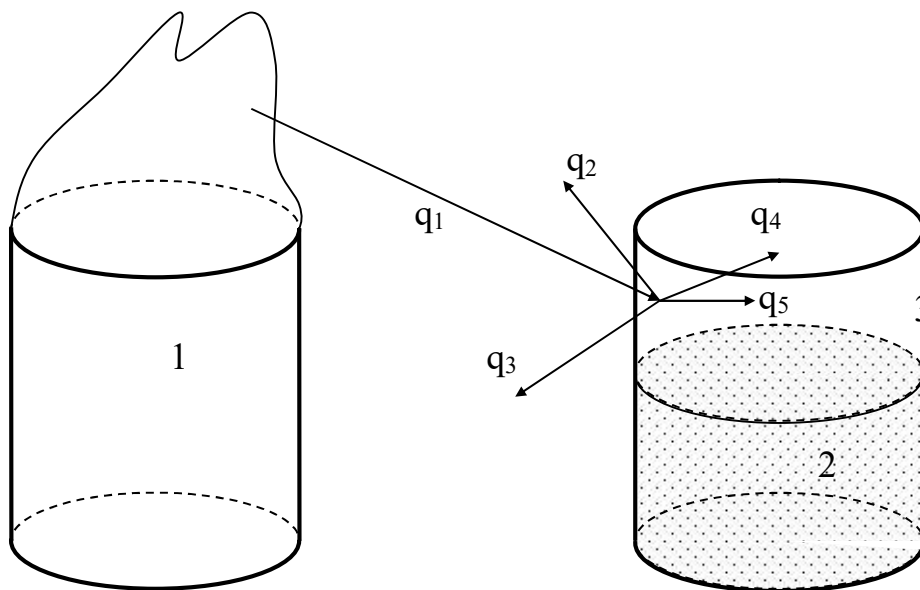


Рис. 2.1. Нагрів стінки сталевго резервуара під впливом пожежі в сусідньому резервуарі: 1 – резервуар, що горить; 2 – нафтопродукт; 3 – пароповітряна суміш в газовому просторі резервуара

Припущення 2 і 3 ґрунтуються на тому, що, нагріваючись, стінка резервуара випромінює тепло у навколишнє середовище і в середину газового простору резервуара. Також має місце конвекційний теплообмін с навколишнім повітрям і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара.

Сталевий резервуар має товщину стінки до 10 мм. У випадку пожежі в сусідньому резервуарі внутрішня і зовнішня поверхня знаходяться в різних умовах, оскільки зовнішня поверхня піддається тепловому впливу випромінюванням від факелу пожежі, а внутрішня – ні. Наявність теплового потоку на зовнішню поверхню й обумовлює градієнт температур між зовнішньою і внутрішньою поверхнями стінки. В той же час тепловий потік від пожежі до точок зовнішньої поверхні стінки резервуара, розташованих на відстані 10 мм, є практично однаковим. Отже градієнтом температур вздовж стінки резервуара є значно меншим порівняно з градієнтом температур по її глибині (припущення 4).

Нехай  $\delta$  – товщина стінки резервуара. Розглянемо довільну точку на зовнішній поверхні стінки резервуара і відповідну до неї точку на внутрішній поверхні. На точку на зовнішній поверхні припадає тепловий потік щільністю

$$q_{\text{out}} = q_1 - q_2 - q_3,$$

де  $q_1$  – щільність теплового потоку випромінюванням від пожежі;  $q_2$  – щільність теплового потоку випромінюванням від нагрітої стінки до навколишнього середовища;  $q_3$  – щільність теплового потоку внаслідок конвекційного теплообміну з повітрям (рис. 2.1, 2.2). Внаслідок нагріву внутрішня поверхня стінки віддає тепло в газовий простір резервуара з щільністю

$$q_{\text{in}} = q_4 + q_5,$$

де  $q_4$  – щільність теплового потоку випромінюванням від точки на внутрішній поверхні стінки;  $q_5$  – щільність теплового потоку внаслідок конвекційного

теплообміну стінки з пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара.

Різниця температур між точками на зовнішній і внутрішній поверхнях стінки резервуара обумовлює тепловий потік крізь стінку.

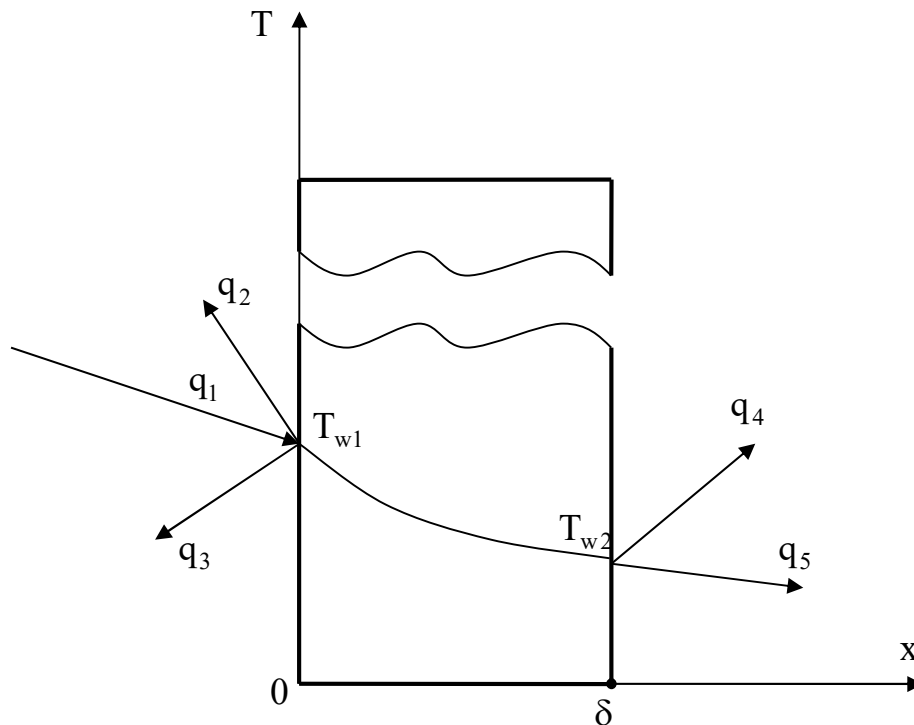


Рис. 2.2. Нагрів сухої стінки резервуара під тепловим впливом пожежі

Розповсюдження тепла вглибину стінки описується одномірним рівнянням теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \delta, \quad t > 0, \quad (2.1)$$

де  $T(x,t)$  – температура у точці  $x$  в момент часу  $t$ ;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності;  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  – коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність і густина сталі відповідно;  $x = 0$  – відповідає точці на зовнішній поверхні стінки;  $x = \delta$  – точці на внутрішній поверхні стінки.

В початковий момент часу (до початку пожежі) температура всередині стінки дорівнює температурі навколишнього середовища  $T_0$ :

$$T(x,0) = T_0, \quad 0 \leq x \leq \delta, \quad (2.2)$$

Наявність теплового потоку на зовнішню стінку обумовлює крайову умову другого роду:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = -\frac{1}{\lambda}(q_1 - q_2 - q_3). \quad (2.3)$$

На внутрішній стінці крайова умова буде мати вигляд

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta} = -\frac{1}{\lambda}(q_4 + q_5). \quad (2.4)$$

Визначимо складові теплових потоків, що припадають на зовнішню і внутрішню поверхні стінки резервуара. Щільність теплового потоку від факелу пожежі визначається законом Стефана-Больцмана:

$$q_1 = c_0 \varepsilon_f \varepsilon_w \left[ \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{out}}{100} \right)^4 \right] \varphi, \quad (2.5)$$

де  $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – стала;  $\varepsilon_f$ ,  $\varepsilon_w$  – ступені чорноти випромінюючої поверхні факела і стінки резервуара відповідно;  $T_f$  – температура поверхні факела;  $T_{out}$  – температура зовнішньої поверхні стінки резервуара;  $\varphi$  – коефіцієнт взаємного опромінення між факелом і точкою на поверхні резервуара.

Нагріваючись стінка віддає тепло в навколишнє середовище випромінюванням. Щільність цього теплового потоку, відповідно до закону Стефана-Больцмана, складає

$$q_2 = c_0 \varepsilon_w \left[ \left( \frac{T_{\text{out}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] (1 - \varphi), \quad (2.6)$$

Також стінка приймає участь в конвекційному теплообміні з навколишнім повітрям. Щільність утвореного цим теплового потоку складає

$$q_3 = \alpha_{\text{out}} (T_{\text{out}} - T_0), \quad (2.7)$$

де  $\alpha_{\text{out}}$  – коефіцієнт конвекційного теплообміну з навколишнім повітрям. Підставляючи (2.5), (2.6), (2.7) в (2.3) отримаємо вираз для крайової умови на зовнішній поверхні стінки резервуара

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = & -\frac{c_0 \varepsilon_f \varepsilon_w}{\lambda} \left[ \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{out}}}{100} \right)^4 \right] \varphi + \frac{c_0 \varepsilon_w}{\lambda} \left[ \left( \frac{T_{\text{out}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] (1 - \varphi) + \\ & + \frac{\alpha_{\text{out}}}{\lambda} (T_{\text{out}} - T_0). \end{aligned} \quad (2.8)$$

Розглянемо теплові потоки від внутрішньої поверхні стінки резервуара. Щільність теплового потоку випромінюванням складає

$$q_4 = c_0 \varepsilon_w \left[ \left( \frac{T_{\text{in}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right], \quad (2.9)$$

де  $T_{in}$  – температура внутрішньої поверхні стінки резервуара. Щільність теплового потоку внаслідок конвекційного теплообміну з пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара:

$$q_5 = \alpha_{in}(T_{in} - T_0), \quad (2.10)$$

де  $\alpha_{in}$  – коефіцієнт конвекційного теплообміну з пароповітряною сумішшю. Підставляючи (2.9) і (2.10) в (2.4), отримаємо крайову умову на внутрішній поверхні стінки резервуара

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta} = -\frac{c_0 \varepsilon_w}{\lambda} \left[ \left( \frac{T_{in}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] - \frac{\alpha_{in}}{\lambda} (T_{in} - T_0). \quad (2.11)$$

Модель динаміки зміни температури в стінці вертикального сталевого резервуара являє собою диференціальне рівняння параболічного типу (2.1), що описує процес передачі тепла всередині стінки резервуара, з крайовими умовами на зовнішній (2.8) і внутрішній (2.11) поверхнях стінки і початковою умовою (2.2), що описує розподіл температур до початку пожежі. Ці крайові умови описують теплообмін поверхонь стінок з факелом, навколишнім середовищем і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара.

## 2.2. Оцінка величини коефіцієнта взаємного опромінення з факелом

Вирази (2.5) і (2.6) для теплових потоків  $q_1$  і  $q_2$  містять коефіцієнт взаємного опромінення  $\varphi$  між факелом та точкою на поверхні резервуара. Його величина дається формулою

$$\varphi = \frac{1}{\pi_s} \iint \frac{\cos \psi_1 \cos \psi_2}{r^2} dS, \quad (2.12)$$

де  $\psi_1$  – кут між нормальним вектором до поверхні факела  $\vec{h}_1$  і радіус-вектором  $\vec{r}$ , що з'єднує точку на поверхні факела і точку на стінці резервуара;  $\psi_2$  – кут між нормальним вектором до поверхні резервуара  $\vec{h}_2$  і радіус-вектором  $\vec{r}$  (рис. 2.3). При цьому інтеграл обчислюється лише по тій частині поверхні факела, яка видна із даної точки на стінці резервуара ( $\cos \psi_1 > 0$ ,  $\cos \psi_2 > 0$ ).

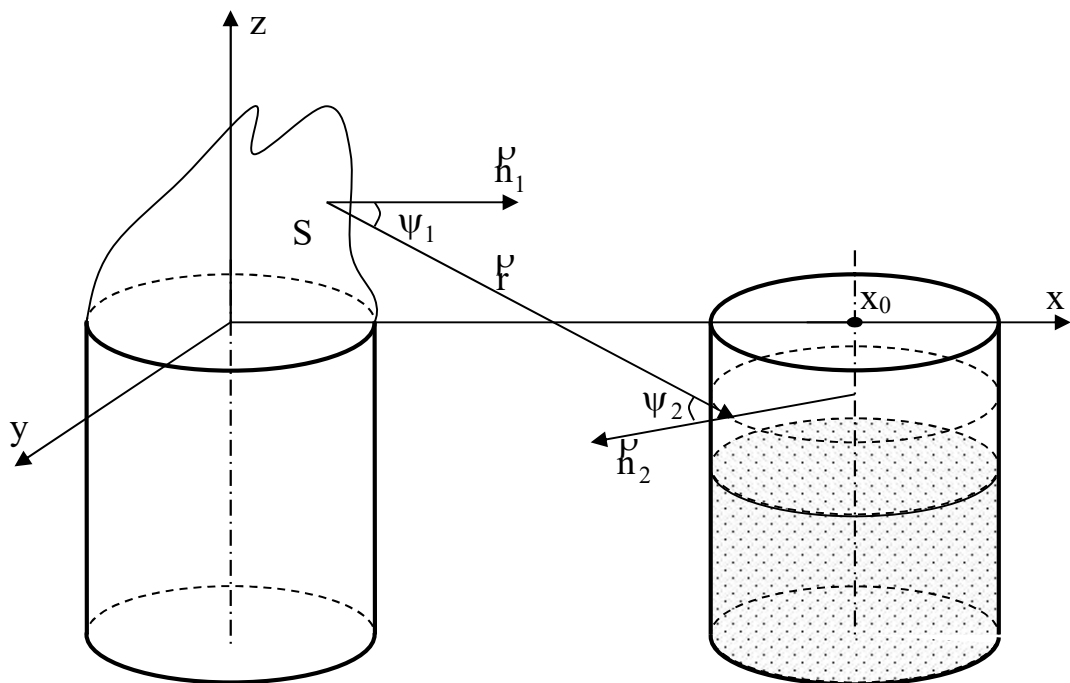


Рис.2.3. Обчислення площі взаємного опромінення між факелом і точкою на стінці резервуара

Якщо  $\vec{h}_1$  і  $\vec{h}_2$  – одиничні вектори, то вираз (2.12) набуде вигляду

$$\varphi = \frac{1}{\pi} \iint_S \frac{(\vec{h}_1, \vec{r})(\vec{h}_2, \vec{r})}{r^4} dS, \quad (2.13)$$

де  $(\vec{h}_1, \vec{r})$ ,  $(\vec{h}_2, \vec{r})$  – скалярні добутки векторів.



Оберемо систему координат так, щоб вісь  $Z$  співпадала з віссю резервуара, що горить, а початок координат знаходився на висоті резервуара, що горить. Вісь  $X$  спрямуємо таким чином, щоб вона перетинала вертикальну вісь резервуара, що не горить (рис. 2.3). Таким чином, вісь резервуара, що не горить, буде перетинати вісь  $X$  у точці  $x_0$ .

Рівняння поверхні факела запишемо в параметричній формі:

$$\begin{cases} x_1 = x_1(u, v); \\ y_1 = y_1(u, v); \\ z_1 = z_1(u, v); \\ u_1 \leq u \leq u_2, v_1 \leq v \leq v_2; \end{cases} \quad (2.14)$$

Тоді одиничний нормальний вектор до поверхні факела у точці  $(x_1, y_1, z_1) \in S$  буде мати вигляд

$$\vec{h}_1 = \left( \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \right), \quad (2.15)$$

де

$$A = \frac{\partial y_1}{\partial u} \frac{\partial z_1}{\partial v} - \frac{\partial z_1}{\partial u} \frac{\partial y_1}{\partial v}; \quad B = \frac{\partial z_1}{\partial u} \frac{\partial x_1}{\partial v} - \frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial z_1}{\partial v}; \quad C = \frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial y_1}{\partial v} - \frac{\partial y_1}{\partial u} \frac{\partial x_1}{\partial v}. \quad (2.16)$$

Елемент поверхні факела  $dS$  також може бути представлений у параметричному вигляді:

$$dS = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} du dv. \quad (2.17)$$

Вектор  $\vec{r}$ , що з'єднує точку  $(x_1, y_1, z_1)$  на поверхні факела і точку  $(x_2, y_2, z_2)$  на стінці резервуара, набуде вигляду

$$\vec{r} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1). \quad (2.18)$$

Враховуючи, що вісь резервуара, який не горить, перетинає вісь  $X$  у точці  $x_0$ , координати точки на стінці резервуара можуть бути подані у вигляді

$$\begin{cases} x_2 = x_0 + R \cos \alpha; \\ y_2 = R \sin \alpha; \\ z_2 = z, \end{cases} \quad (2.19)$$

де  $R$  – радіус резервуара, що нагрівається під тепловим впливом пожежі;  $\alpha$  – полярний кут, який відповідає точці  $(x_2, y_2, z_2)$  на стінці резервуара. Тоді одиничний нормальний вектор до стінки резервуара у точці  $(x_2, y_2, z_2)$  буде мати вигляд

$$\vec{h}_2 = (\cos \alpha, \sin \alpha, 0). \quad (2.20)$$

Підстановка виразів (2.14)-(2.20) у (2.13) дає

$$\varphi = \frac{1}{\pi} \int_{u_1}^{u_2} \int_{v_1}^{v_2} \frac{A(x_0 + R \cos \alpha - x_1) + B(R \sin \alpha - y_1) + C(z - z_1)}{\left[ (x_1 - x_0 - R \cos \alpha)^2 + (y_1 - R \sin \alpha)^2 + (z_1 - z)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \times \\ \left[ (x_1 - x_0 - R \cos \alpha) \cos \alpha + (y_1 - R \sin \alpha) \sin \alpha \right] du dv,$$

Спрощуючи останній вираз, отримаємо

$$\varphi = \frac{1}{\pi} \int_{u_1}^{u_2} \int_{v_1}^{v_2} \frac{A(x_0 + R \cos \alpha - x_1) + B(R \sin \alpha - y_1) + C(z - z_1)}{\left[ (x_1 - x_0 - R \cos \alpha)^2 + (y_1 - R \sin \alpha)^2 + (z_1 - z)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \times \\ \left[ (x_1 - x_0) \cos \alpha + y_1 \sin \alpha - R \right] du dv. \quad (2.21)$$

Таким чином, коефіцієнт взаємного опромінення суттєво залежить від форми факела над резервуаром.

Візуальні спостереження за горінням нафтопродуктів у резервуарах дозволяють вважати, що факел має форму конуса. При цьому висота конуса  $L$  пов'язана із радіусом його основи  $R_f$  співвідношенням

$$L = cR_f, \quad (2.22)$$

де  $c$  – стала, яка залежить від типу нафтопродукту. Для горючих рідин приймається  $c = 2,4$ , а для легкозаймистих –  $c = 2,8$ .

Це дозволяє описати поверхню факела у вигляді

$$\begin{cases} x_1 = u \cos v; \\ y_1 = u \sin v; \\ z_1 = c(R_f - u); \\ 0 \leq u \leq R_f, 0 \leq v \leq 2\pi, \end{cases} \quad (2.23)$$

де враховано співвідношення (2.22). Обчислимо частинні похідні:

$$\frac{\partial x_1}{\partial u} = \cos v; \quad \frac{\partial y_1}{\partial u} = \sin v; \quad \frac{\partial z_1}{\partial u} = -c;$$

$$\frac{\partial x_1}{\partial v} = -u \sin v; \quad \frac{\partial y_1}{\partial v} = u \cos v; \quad \frac{\partial z_1}{\partial v} = 0.$$

Тоді,

$$A = \frac{\partial y_1}{\partial u} \frac{\partial z_1}{\partial v} - \frac{\partial z_1}{\partial u} \frac{\partial y_1}{\partial v} = cu \cos v; \quad (2.24)$$

$$B = \frac{\partial z_1}{\partial u} \frac{\partial x_1}{\partial v} - \frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial z_1}{\partial v} = c u \sin v; \quad (2.25)$$

$$C = \frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial y_1}{\partial v} - \frac{\partial y_1}{\partial u} \frac{\partial x_1}{\partial v} = u \cos^2 v + u \sin^2 v = u. \quad (2.26)$$

З урахуванням (2.23)-(2.26) вираз (2.21) набуде вигляду

$$\begin{aligned} \varphi = & \frac{1}{\pi} \int_0^{R_f} du \int_0^{2\pi} dv \times \\ & \times \frac{u [c \cos v (x_0 + R \cos \alpha) + c R \sin v \sin \alpha + z - c R_f]}{\left[ (u \cos v - x_0 - R \cos \alpha)^2 + (u \sin v - R \sin \alpha)^2 + (c(R_f - u) - z)^2 \right]^2} \times \\ & \times [(u \cos v - x_0) \cos \alpha + u \sin v \sin \alpha - R]. \end{aligned} \quad (2.27)$$

У випадку пожежі в резервуарній групі, до якої входять однакові резервуари,  $R_f = R$ . Це дозволяє спростити вираз (2.27):

$$\begin{aligned} \varphi = & \frac{1}{\pi} \int_0^1 du \int_0^{2\pi} dv \times \\ & \times \frac{u [c \cos v (x_0/R + \cos \alpha) + c \sin v \sin \alpha + z/R - c]}{\left[ (u \cos v - x_0/R - \cos \alpha)^2 + (u \sin v - \sin \alpha)^2 + (c(1 - u) - z/R)^2 \right]^2} \times \\ & \times [(u \cos v - x_0/R) \cos \alpha + u \sin v \sin \alpha - 1]. \end{aligned} \quad (2.28)$$

де інтегрування проводиться лише по тим точкам  $(u, v)$ , в яких обидва множники в квадратних дужках в чисельнику є додатними:

$$c \cos v (x_0/R + \cos \alpha) + c \sin v \sin \alpha + z/R - c > 0;$$

$$(u \cos v - x_0/R) \cos \alpha + u \sin v \sin \alpha - 1 > 0.$$

В якості прикладу на рис. 2.4 наведено розподіл коефіцієнта опромінення по стінці резервуара у випадку пожежі горючої рідини в одному з резервуарів у резервуарній групі РВС-10000 (діаметр  $D=28,5$  м, висота  $H=18$  м). Відстань між резервуарами прийнято  $0,75D$ .

У випадку легкозаймистої рідини (рис. 2.5) коефіцієнт опромінення буде більшим внаслідок більшої довжини факела.

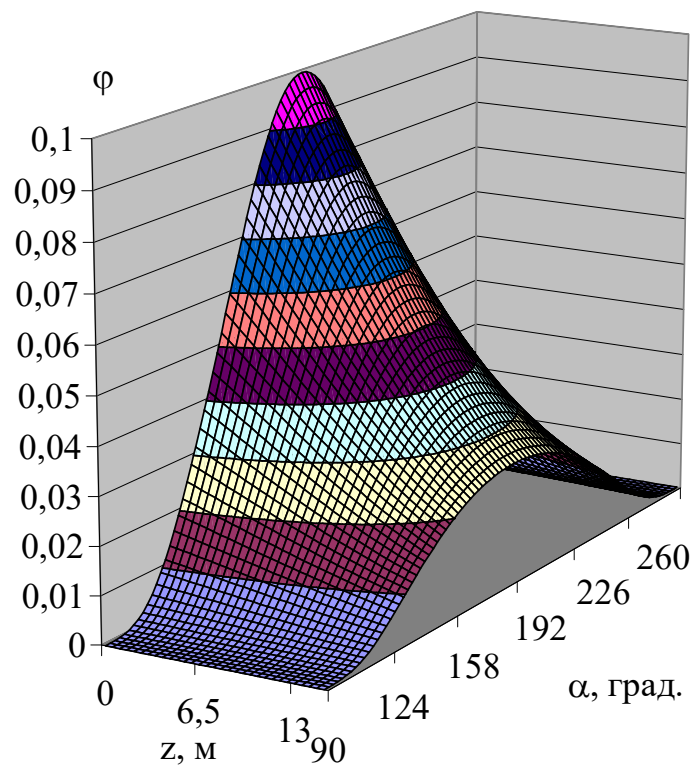


Рис. 2.4. Розподіл коефіцієнта опромінення стінки резервуара при пожежі горючої рідини в одному з резервуарів резервуарної групи РВС-10000

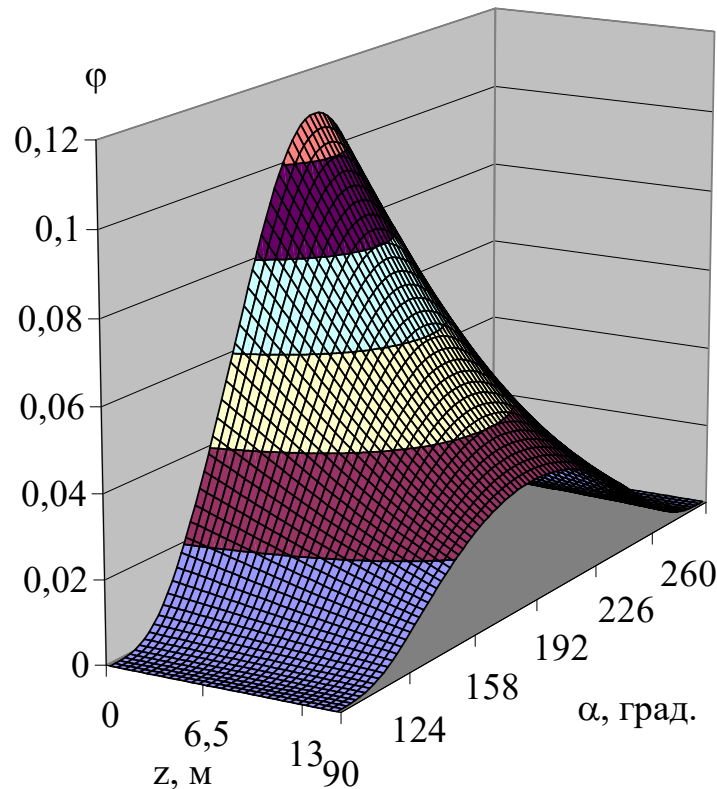


Рис. 2.5. Розподіл коефіцієнта опромінення стінки резервуара при пожежі легкозаймистої рідини в одному з резервуарів резервуарної групи РВС-10000

Відповідно до нормативних вимог, резервуари у групах розміщують на відстані  $0,75D$  один від одного, але не більше 30 м. Це означає, що для всіх резервуарів з діаметром  $D \leq 30/0,75 = 40$  (м), можуть бути використані графічні залежності на рис. 2.4, 2.5 за умови перерахунку:

$$z = z_{10} \frac{D}{D_{10}},$$

де  $z_{10}$  – координата  $z$  на рис. 2.4, 2.5;  $D_{10}$  – діаметр резервуара РВС-10000;  $D$  – діаметр резервуара, для якого обчислюється коефіцієнт опромінення факелом.

Такий підхід є можливим внаслідок того, що залежність (2.28) містить безрозмірні параметри  $x_0/R$ ,  $z/R$  у підінтегральній функції.

Відзначимо, що умові  $D \leq 40$  м відповідають всі резервуари не більше РВС-20000. Для зазначених типів резервуарів перехід до безрозмірних

координат на стінці резервуара, що нагрівається, зводить залежність коефіцієнта взаємного опромінення до залежності лише від типу рідини – горючої або легкозаймистої. В першому випадку максимальне значення коефіцієнта взаємного опромінення сягає 0,0996 (рис. 2.4), а в другому – 0,1095 (рис. 2.5). Аналіз залежностей на рис. 2.4, 2.5 свідчить, що в обох випадках максимальне значення коефіцієнта взаємного опромінення досягається на верхньому краї стінки, оберненої в бік пожежі. Значення коефіцієнта монотонно спадає з віддаленням від цієї точки як за висотою резервуара, так і за кутом.

### 2.3. Оцінка величини коефіцієнта конвекційного теплообміну

Вирази (2.7), (2.10) для щільності теплових потоків  $q_3$ ,  $q_5$  містять коефіцієнт конвекційного теплообміну  $\alpha$ . Його значення суттєво залежить від режиму конвекції – вільної або вимушеної. За умов відсутності вітру конвекція носить вільний характер і вираз для коефіцієнта теплообміну має вигляд

$$\alpha = 0,135\lambda_f \left( \frac{2gPr}{\nu^2} \right)^{1/3} \left( \frac{T_w - T_0}{T_w + T_0} \right)^{1/3},$$

де  $\lambda_f$ ,  $\nu$ ,  $Pr$  – коефіцієнт теплопровідності, кінематична в'язкість і число Прандтля повітряного середовища;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $T_w$  – температура поверхні стінки резервуара. При цьому значення параметрів  $\lambda_f$ ,  $\nu$ ,  $Pr$  беруться у відповідності до визначаючої температури  $T_m$ :

$$T_m = \frac{T_w + T_0}{2}.$$

В [77] показано, що залежність

$$f(T_m) = 0,135\lambda_f \left( \frac{2gPr}{v^2} \right)^{1/3}$$

може бути апроксимована виразом

$$\tilde{f}(T_m) = -0,0082T_m + 15,904$$

із похибкою, що не перевищує 4,5% у діапазоні температур  $T_m = (273 \div 773)$  К. Таким чином, за умови відсутності вітру коефіцієнт конвекційного теплообміну буде мати вигляд

$$\alpha_{in} = \alpha_{out} = \left( 15,904 - 0,0082 \frac{T_w + T_0}{2} \right) \left( \frac{T_w - T_0}{T_w + T_0} \right)^{1/3}. \quad (2.29)$$

В якості приклада на рис. 2.6 наведено залежність коефіцієнта конвекційного теплообміну від температури стінки резервуара за умови вільної конвекції і температури повітряного середовища  $T_0 = 20$  °С.



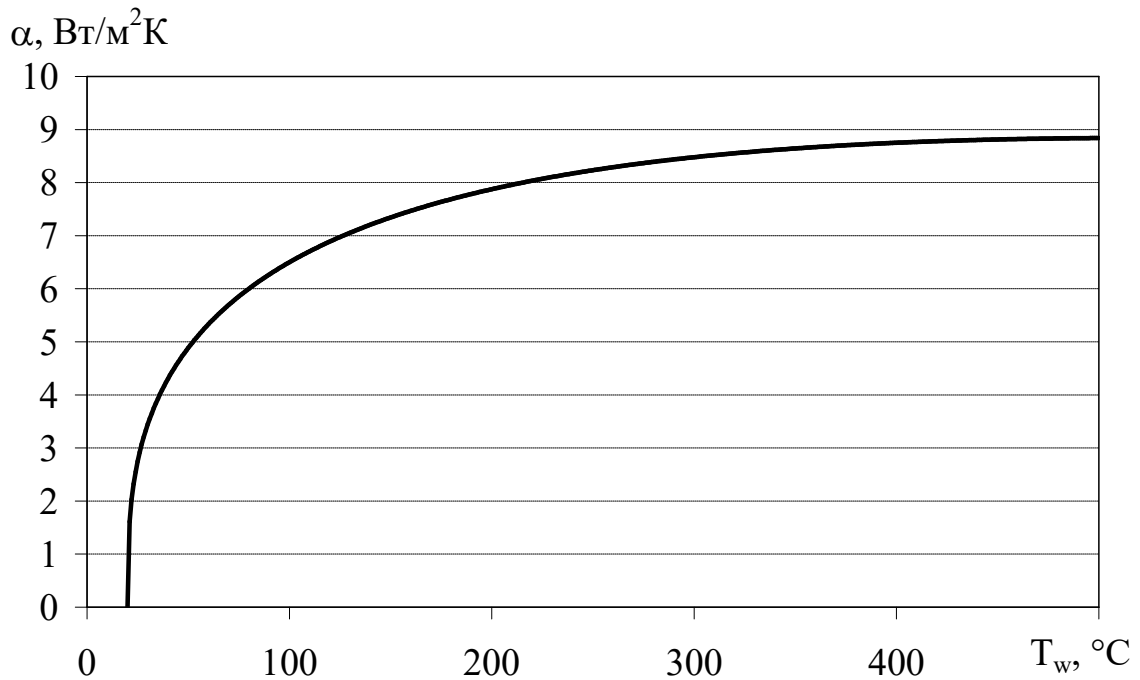


Рис. 2.6. Значення коефіцієнту конвекційного теплообміну в залежності від температури стінки резервуара у випадку вільної конвекції

Аналіз графічної залежності на рис. 2.6 показує, що спочатку коефіцієнт конвекційного теплообміну стрімко зростає з ростом температури стінки, досягаючи  $6 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ . Потім зростання сповільнюється, і величина коефіцієнта конвекційного теплообміну не перевищує  $9 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$  при температурі стінки до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### 2.4. Розв'язання рівняння теплопровідності в стінці резервуара

Знайдені вище оцінки коефіцієнтів взаємного опромінення і конвекційного теплообміну дозволяють розв'язати диференціальне рівняння теплопровідності (2.1) з крайовими умовами (2.8) і (2.11), початковою умовою (2.2) шляхом переходу від частинних похідних до їх апроксимацій за допомогою скінчених різниць. Для цього розіб'ємо відрізок  $[0, \delta]$  на  $n$  рівних відрізків довжиною  $\Delta x$  точками  $x_0, x_2, \dots, x_n$ , де  $x_0=0, x_n= \delta$ . Використання критерію Куранта для вибору кроку за віссю часу і віссю координат дозволяє

забезпечити збіжність розв'язку рівняння в скінчених різницях.

В якості прикладу на рис. 2.7 наведено динаміку зміни температури зовнішньої поверхні стінки резервуара РВС-10000, оберненої в бік пожежі в аналогічному резервуарі з нафтою, для різних відстаней від верхнього краю резервуара. При цьому були прийняті наступні значення параметрів:  $T_f = 1100$  °С;  $\varepsilon_f = 0,85$ ;  $\varepsilon_f = 0,8$ ;  $\delta = 8$  мм.

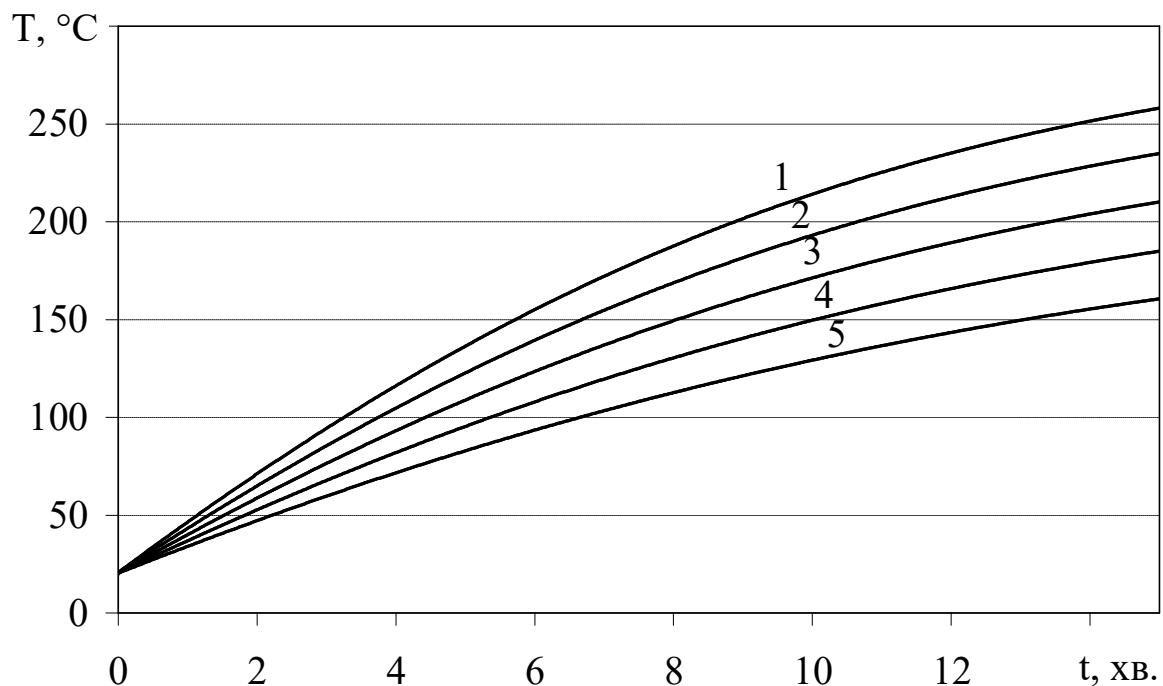


Рис. 2.7. Динаміка зміни температури зовнішньої поверхні стінки резервуара РВС-10000, оберненої в бік пожежі в такому ж резервуарі, в залежності від відстані  $z$  від верхнього краю резервуара: 1 –  $z = 0$ ; 2 –  $z = 2$  м; 3 –  $z = 4$  м; 4 –  $z = 6$  м; 5 –  $z = 8$  м

Аналіз графічних залежностей на рис. 2.7 показує, що стінка, обернена в бік пожежі вже через 15 хв. досягає температури самоспалахування парів нафтопродукту, що може призвести до факельного горіння парів на виході з дихальної арматури або до вибуху пароповітряної суміші у газовому просторі резервуара.

Аналіз розподілу температур всередині стінки резервуара (рис. 2.8) свідчить, що різниця температур між зовнішньою і внутрішньою поверхнею стінки не перевищує  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

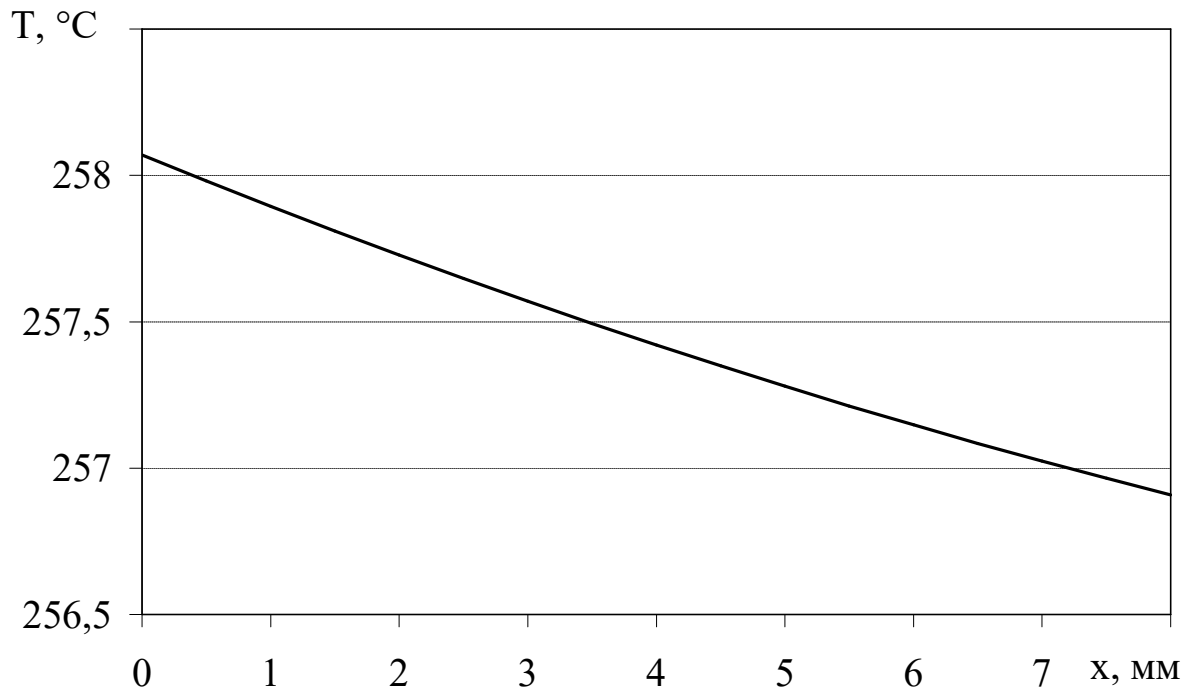


Рис. 2.8. Розподіл температур всередині стінки резервуара на його верхньому краї з боку, оберненого в бік пожежі, через 15 хв. після її початку

Із отриманого розв'язку випливає, що

- стінка резервуара, обернена в бік пожежі, нагрівається до небезпечних температур, що може призвести до виникнення факельного горіння на дихальній арматурі резервуара або до вибуху пароповітряної суміші в його газовому просторі;

- для захисту резервуара, що нагрівається під впливом пожежі в сусідньому резервуарі, необхідно розпочати охолодження не пізніше 15 хвилин після виникнення пожежі (рис. 2.7);

- розподіл температур всередині стінки резервуара носить майже лінійний характер (рис. 2.8), спадаючи із віддаленням від зовнішньої поверхні стінки із швидкістю  $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мм}$  (рис. 2.8).

Обмеженням побудованої моделі є те, що вона припускає відсутність вітру. Наявність вітрового впливу призводить до зміни геометричної форми

факела, а саме його нахилу за напрямком вітру. Це призводить до того, що форма факела наближено буде являти собою похилий конус. Крім того, конвекційний обмін на зовнішній поверхні стінки резервуара буде відбуватися в режимі вимушеної конвекції, що дещо підвищить його інтенсивність.

## 2.5. Врахування вітрового впливу на коефіцієнт взаємного опромінення

Численні експериментальні дані свідчать, що наявність вітру призводить до нахилу факела, зберігаючи його довжину:  $L = OD = OD_1$  (рис. 2.9).

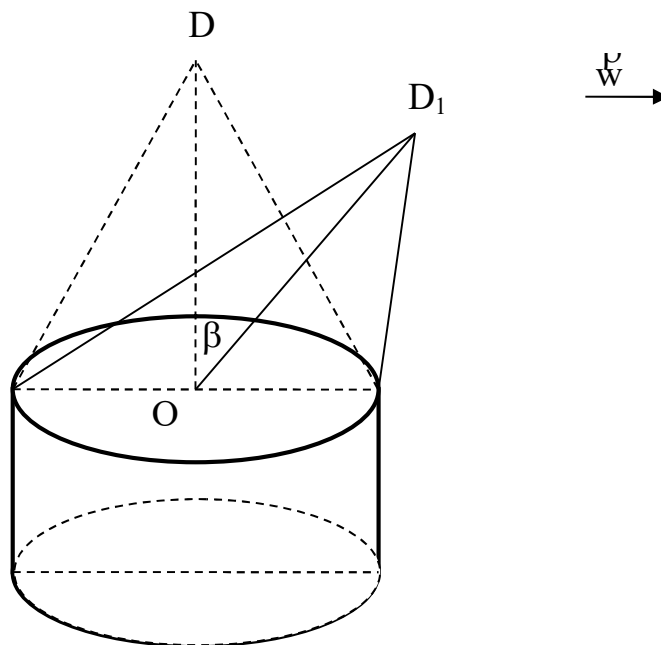


Рис. 2.9. Нахил факела вітром

В цьому випадку випромінююча поверхня факела набуває вигляду

$$\begin{cases} x_1 = u \cos v + c(R_f - u) \sin \beta \cos \gamma; \\ y_1 = u \sin v + c(R_f - u) \sin \beta \sin \gamma; \\ z_1 = c(R_f - u) \cos \beta; \\ 0 \leq u \leq R_f, 0 \leq v \leq 2\pi, \end{cases}$$

де  $\beta$  – кут нахилу полум'я відносно вертикальної вісі, а напрямок вектора  $(\cos \gamma, \sin \gamma)$  співпадає з напрямком вітру.

При цьому кут нахилу полум'я може бути апроксимований залежністю

$$\beta = \arctg \frac{w}{2}, \quad (2.30)$$

де  $w$  – швидкість вітру.

Обчислимо частинні похідні до функцій, що описують поверхню факела у параметричному вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_1}{\partial u} &= \cos v - c \sin \beta \cos \gamma; & \frac{\partial x_1}{\partial v} &= -u \sin v; \\ \frac{\partial y_1}{\partial u} &= \sin v - c \sin \beta \sin \gamma; & \frac{\partial y_1}{\partial v} &= u \cos v; \\ \frac{\partial z_1}{\partial u} &= -c \cos \beta; & \frac{\partial z_1}{\partial v} &= 0. \end{aligned}$$

де враховано припущення про тотожність резервуара, що горить, і резервуара, що нагрівається:  $R_f = R$ .

Тоді коефіцієнти А, В, С набудуть вигляду

$$A = \frac{\partial y_1}{\partial u} \frac{\partial z_1}{\partial v} - \frac{\partial z_1}{\partial u} \frac{\partial y_1}{\partial v} = cu \cos v \cos \beta;$$

$$B = \frac{\partial z_1}{\partial u} \frac{\partial x_1}{\partial v} - \frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial z_1}{\partial v} = cu \sin v \cos \beta;$$

$$C = \frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial y_1}{\partial v} - \frac{\partial y_1}{\partial u} \frac{\partial x_1}{\partial v} = u - uc \sin \beta \cos(v - \gamma).$$

Позначимо

$$\tilde{x}_1 = \frac{x_1}{R} = s \cos v + c(1-s) \sin \beta \cos \gamma;$$

$$\tilde{y}_1 = \frac{y_1}{R} = s \sin v + c(1-s) \sin \beta \sin \gamma;$$

$$\tilde{z}_1 = \frac{z}{R} = c(1-s) \cos \beta;$$

$$\tilde{A} = \frac{A}{R} = cs \cos v \cos \beta;$$

$$\tilde{B} = \frac{B}{R} = cs \sin v \cos \beta;$$

$$\tilde{C} = \frac{C}{R} = s - sc \sin \beta \cos(v - \gamma),$$

де  $s = \frac{u}{R}$ .

Тоді

$$\begin{aligned} \varphi &= \int_0^R \int_0^{2\pi} \frac{R^2 \tilde{A}(x_0/R + \cos \alpha - \tilde{x}_1) + R^2 \tilde{B}(\sin \alpha - \tilde{y}_1) + R^2 \tilde{C}(z/R - \tilde{z}_1)}{R^4 [(\tilde{x}_1 - x_0/R - \cos \alpha)^2 + (\tilde{y}_1 - \sin \alpha)^2 + (\tilde{z}_1 - z/R)^2]^2} \times \\ &\quad \times [(\tilde{x}_1 - x_0/R) \cos \alpha + \tilde{y}_1 \sin \alpha - 1] R^2 d(u/R) dv = \\ &= \int_0^1 ds \int_0^{2\pi} dv \frac{\tilde{A}(x_0/R + \cos \alpha - \tilde{x}_1) + \tilde{B}(\sin \alpha - \tilde{y}_1) + \tilde{C}(z/R - \tilde{z}_1)}{[(\tilde{x}_1 - x_0/R - \cos \alpha)^2 + (\tilde{y}_1 - \sin \alpha)^2 + (\tilde{z}_1 - z/R)^2]^2} \times \\ &\quad \times [(\tilde{x}_1 - x_0/R) \cos \alpha + \tilde{y}_1 \sin \alpha - 1], \end{aligned} \quad (2.31)$$

де інтегрування проводиться лише по тим точкам  $(s, v)$ , в яких обидва множники в чисельнику є додатними:

$$\begin{aligned} \tilde{A}(x_0/R + \cos \alpha - \tilde{x}_1) + \tilde{B}(\sin \alpha - \tilde{y}_1) + \tilde{C}(z/R - \tilde{z}_1) > 0; \\ (\tilde{x}_1 - x_0/R)\cos \alpha + \tilde{y}_1 \sin \alpha - 1 > 0. \end{aligned}$$

Аналіз виразу (2.31) показує, що максимальна температура досягається на верхньому краї стінки резервуара ( $z = 0$ ). На рис. 2.10 показано залежність розподілу коефіцієнту взаємного опромінення по верхньому краю стінки резервуара від швидкості вітру за умови пожежі горючої рідини і вітру, який нахилив факел в бік резервуара, що розглядається ( $\gamma = 0$ ).

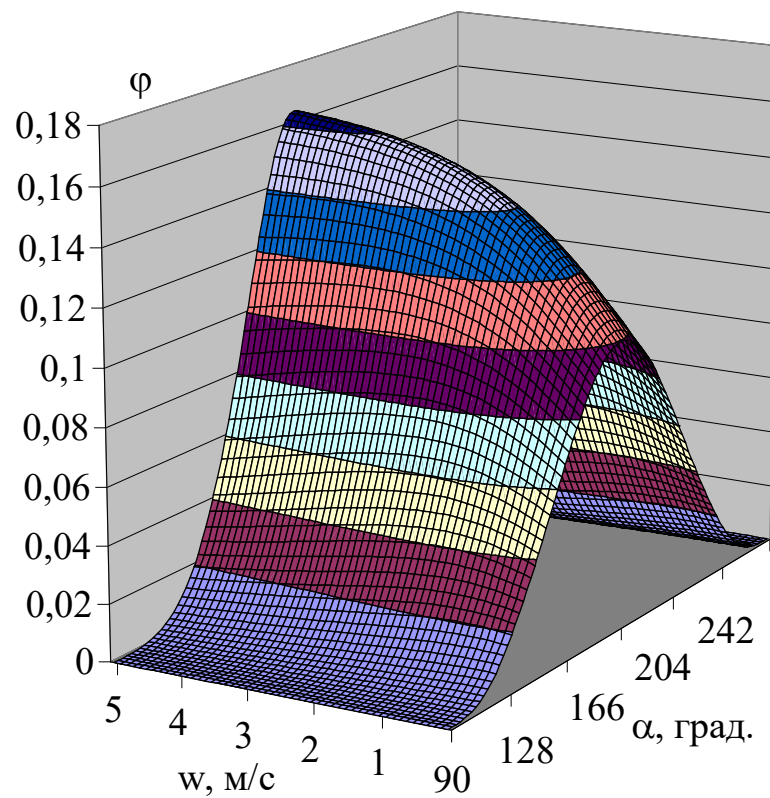


Рис. 2.10. Розподіл коефіцієнту взаємного опромінення по верхньому краю стінки підвітряного резервуара в залежності від швидкості вітру при горінні сусіднього резервуара с горючою рідиною

З аналізу графічної залежності на рис. 2.10 випливає, що нахил факела вітром в бік сусіднього резервуара призводить до збільшення коефіцієнта взаємного опромінення. У випадку горючої рідини коефіцієнт взаємного опромінення монотонно зростає від 0,0996 (при  $w = 0$ ) до 0,1642 (при  $w = 5$  м/с), збільшуючись в 1,65 рази. Слід відзначити, що подальше зростання швидкості вітру і ще більший нахил факела практично не змінюють коефіцієнт взаємного опромінення.

На рис. 2.11 проілюстровано залежність коефіцієнта взаємного опромінення для точки на верхньому краї стінки резервуара у випадку горіння легкозаймистої рідини.

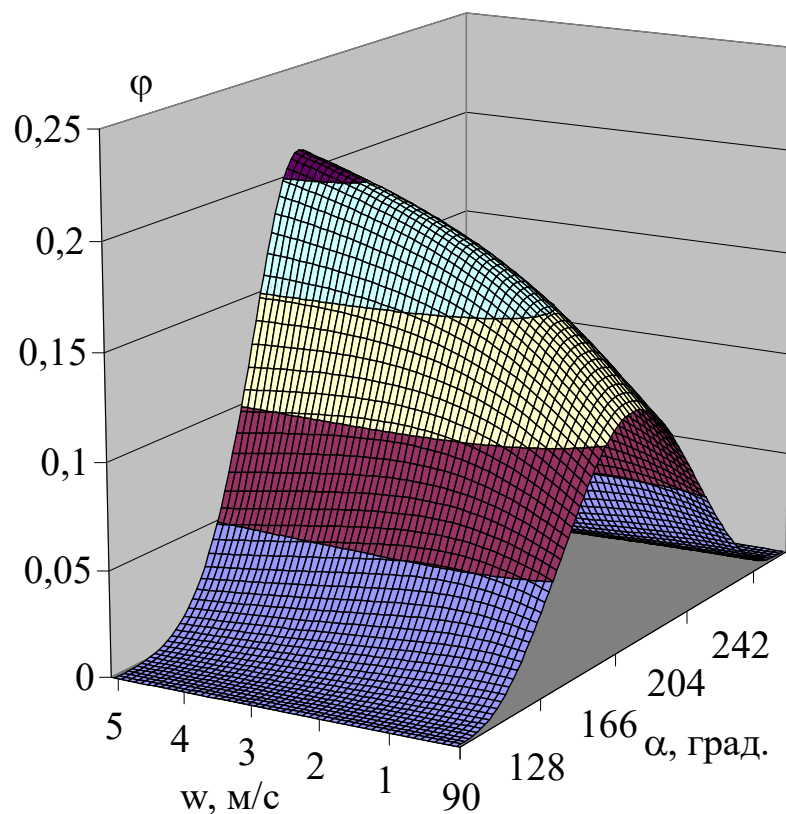


Рис. 2.11. Розподіл коефіцієнта взаємного опромінення по верхньому краю стінки підвітряного резервуара в залежності від швидкості вітру при горінні сусіднього резервуара с легкозаймистою рідиною

Аналіз залежності, наведеної на рис. 2.11, показує, що нахил факела вітром в бік сусіднього резервуара призводить до збільшення коефіцієнта



взаємного опромінення. У випадку легкозаймистої рідини коефіцієнт взаємного опромінення монотонно зростає від 0,1095 (при  $w = 0$ ) до 0,2109 (при  $w = 5$  м/с), збільшуючись в 1,93 рази.

Залежність коефіцієнта взаємного опромінення на верхньому краї стінки резервуара від напрямку вітру проілюстровано на рис. 2.12 (горюча рідина) і рис. 2.13 (легкозаймиста рідина). В обох випадках швидкість вітру була прийнята  $w = 2$  м/с.

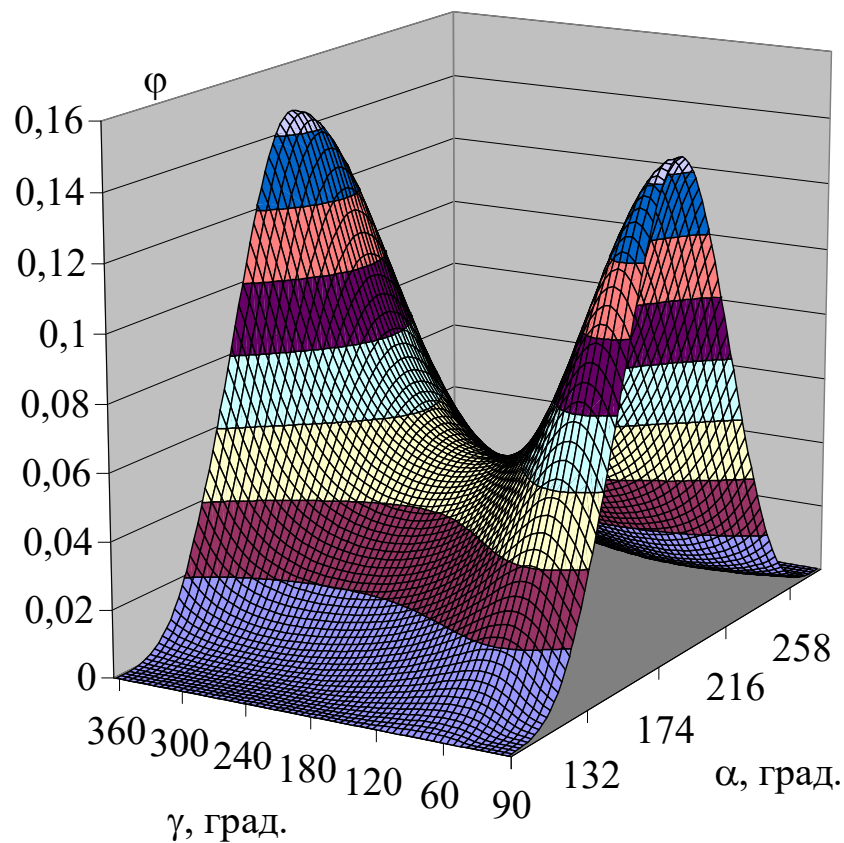


Рис. 2.12. Розподіл коефіцієнта взаємного опромінення по верхньому краю стінки резервуара в залежності від напрямку вітру при горінні сусіднього резервуара з горючою рідиною

Аналіз графічних залежностей, наведених на рис. 2.12 і рис. 2.13, свідчить, що коефіцієнт взаємного опромінення досягає максимального значення, коли вітер направлений від резервуара, що горить, до сусіднього

( $\gamma = 0$ ). Мінімального – коли вітер направлений в протилежному напрямку ( $\gamma = 180^\circ$ ).

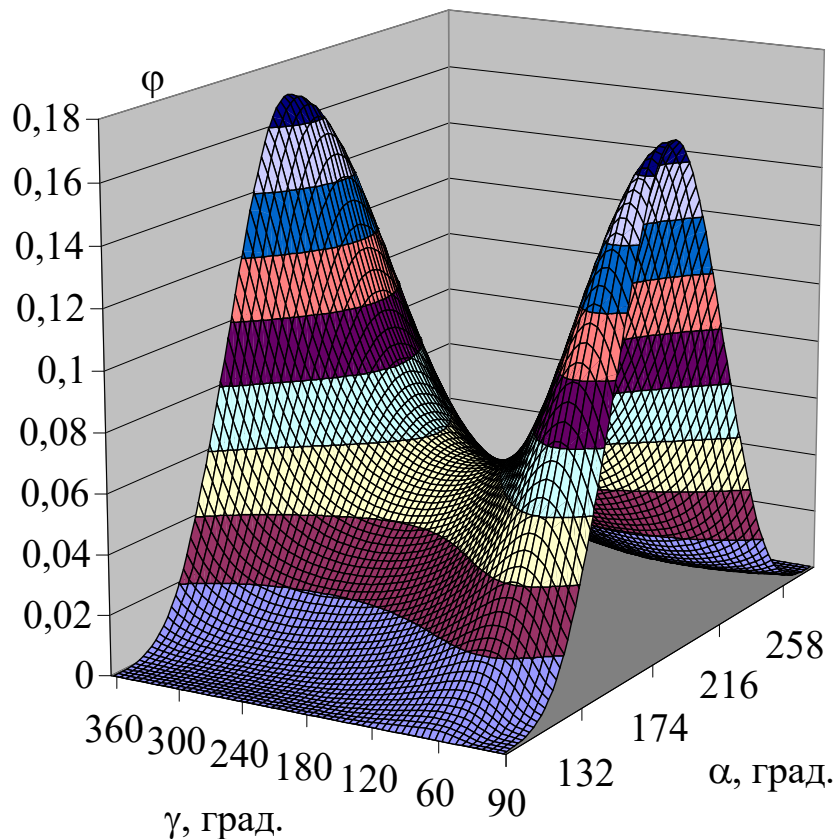


Рис. 2.13. Розподіл коефіцієнта взаємного опромінення по верхньому краю стінки резервуара в залежності від напрямку вітру при горінні сусіднього резервуара с легкозаймистою рідиною

Як і у випадку з відсутністю вітру, залежність (2.31) містить безрозмірні координати  $x_0/R$ ,  $z/R$  у підінтегральній функції. Це означає, що для всіх резервуарів з діаметром  $D \leq 30/0,75 = 40$  (м), можуть бути використані графічні залежності на рис. 2.10 – 2.13.

## 2.6. Вимушена конвекція, обумовлена вітровим впливом

Характер обтікання резервуара вітровим потоком визначається значенням числа Рейнольдса

$$Re = \frac{w_f D}{\nu},$$

де  $w_f$  – швидкість вітру;  $D$  – діаметр резервуара;  $\nu$  – динамічна в'язкість повітря. Для резервуарів РВС-700 і більше (діаметром  $D \geq 10$  м) і швидкості вітру  $w \geq 1$  м/с значення числа Рейнольдса  $Re \geq 6 \cdot 10^5$ , що відповідає турбулентному режиму обтікання (рис. 2.14) [78].

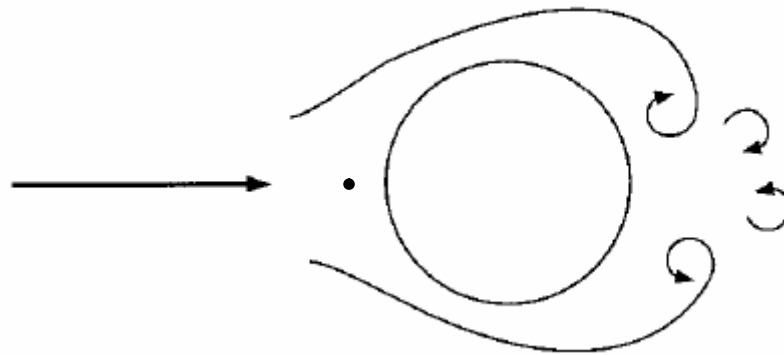


Рис. 2.14. Турбулентний характер обтікання резервуара повітряним потоком

Для вказаного діапазону значень числа Рейнольда усереднене за периметром окружності резервуара значення числа Нусельта описується залежністю [79]

$$\overline{Nu} = 0,3 + \frac{0,62 Re^{0,5} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{2,82 \cdot 10^5}\right)^{5/8}\right]^{4/5}.$$

Тоді середнє за периметром значення коефіцієнту конвекційної тепловіддачі набуде вигляду:

$$\bar{\alpha}_{\text{out}} = \frac{\lambda_f}{D} \left[ 0,3 + \frac{0,62 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{1/3}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,4}{\text{Pr}} \right)^{2/3} \right]^{1/4}} \left[ 1 + \left( \frac{\text{Re}}{2,82 \cdot 10^5} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \right]. \quad (2.32)$$

В [80] показано, що в діапазоні температур  $T = (273 \div 1273)$  К залежність (2.32) може бути апроксимована виразом

$$\bar{\alpha}_{\text{out}} = 198 T_f^{-0,7655} w_f^{0,9227} D^{-0,0773}. \quad (2.33)$$

Аналіз виразу (2.33) показує, що коефіцієнт конвекційної тепловіддачі майже лінійно зростає зі збільшенням швидкості вітру, зменшується при збільшенні температури повітряного потоку і слабо залежить від діаметру резервуара: збільшення діаметра резервуара з 10 м до 60 м призводить до зменшення коефіцієнта  $\bar{\alpha}_{\text{out}}$  лише на 15% [80].

В якості приклада на рис. 2.15 наведено залежність середнього значення коефіцієнта конвекційної тепловіддачі від швидкості вітру для резервуарів РВС-1000 ( $D = 10,4$  м) і РВС-50000 ( $D = 60,7$  м).

Порівняння коефіцієнтів вільної (рис. 2.6) і вимушеної (рис. 2.15) конвекції показує, що при швидкості вітру понад 5 м/с коефіцієнт конвекційного теплообміну вимушеної конвекції перевищує відповідний коефіцієнт вільної конвекції. А в діапазоні температур стінки резервуара  $T \leq 250$  °С і діапазоні швидкості вітру  $w \leq 5$  м/с коефіцієнт конвекційного теплообміну не перевищує 9 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

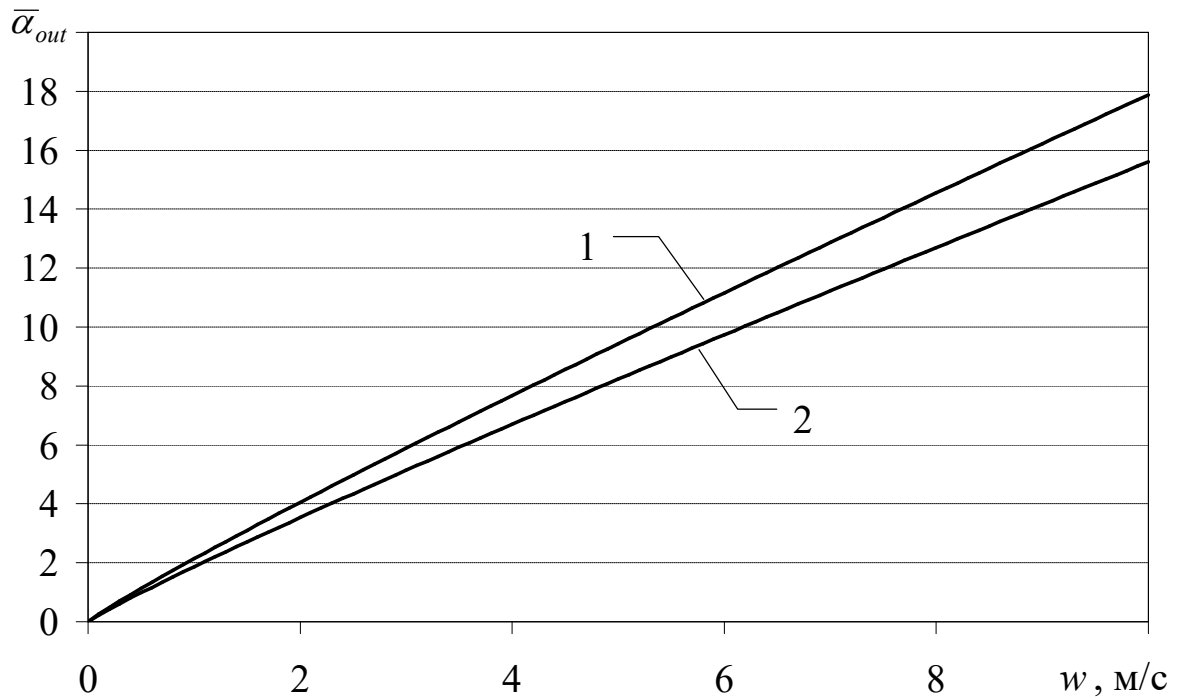


Рис. 2.15. Залежність середнього значення коефіцієнта конвекційного теплообміну від швидкості вітру: 1 – PVC-1000; 2 – PVC-50000

Значення локального коефіцієнта конвекційної тепловіддачі  $\alpha_{out}$  (значення в конкретній точці вздовж периметра резервуара) може бути отримано із співвідношення

$$\alpha_{out} = u(\varphi)\bar{\alpha}_{out}, \quad (2.34)$$

де  $\varphi$  – кут, який відраховується від лобової точки (точка А на рис. 2.14).

Залежність  $u(\varphi)$  визначається емпірично [78] і проілюстрована на рис. 2.16.

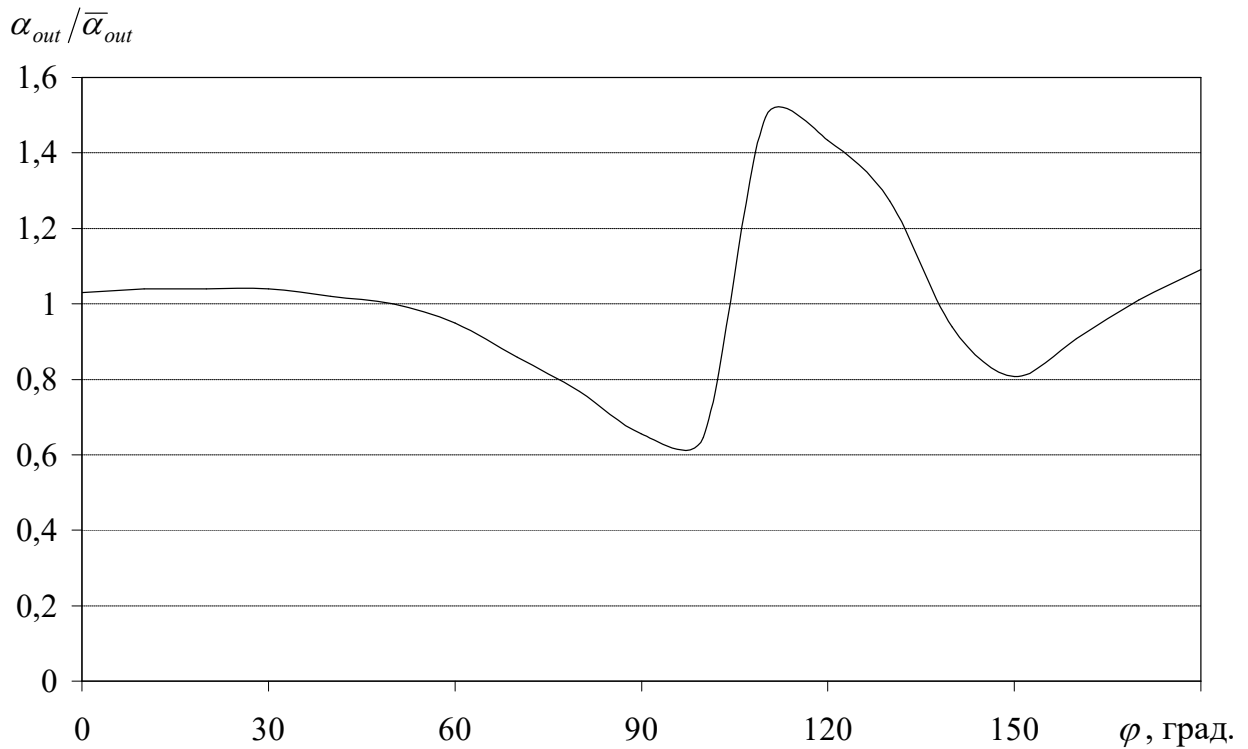


Рис. 2.16. Відношення локального коефіцієнта конвекційного теплообміну до середнього в залежності від кута  $\varphi$  відносно лобової точки

## 2.7. Розподіл температури по стінці резервуара в умовах вітру

В залежності від швидкості вітру, його напрямку, температури на зовнішній поверхні стінки резервуара може переважати вільна конвекція, обумовлена підйомом розігрітого повітря вздовж стінки (рис. 2.6), або вимушена конвекція, обумовлена вітром (рис. 2.15, 2.16). Отже для визначення коефіцієнта конвекційного теплообміну будемо обирати максимальне із значень коефіцієнта конвекційної тепловіддачі в режимі вільної і вимушеної конвекції:

$$\bar{\alpha}_{out} = \max \left\{ 198 T_f^{-0,7655} w_f^{0,9227} D^{-0,0773} u(\varphi), \left( 15,904 - 0,0082 \frac{T_w + T_0}{2} \right) \left( \frac{T_w - T_0}{T_w + T_0} \right)^{1/3} \right\}.$$

В якості прикладу на рис. 2.17 наведено динаміку зміни температури верхнього краю зовнішньої поверхні стінки резервуара РВС-10000, оберненої в бік пожежі в аналогічному резервуарі з нафтою, для різних швидкостей вітру. При цьому були прийняті наступні значення параметрів:  $T_f = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\varepsilon_f = 0,85$ ;  $\varepsilon_f = 0,8$ ;  $\delta = 8 \text{ мм}$ ; вітер направлений в бік резервуара, що нагрівається.

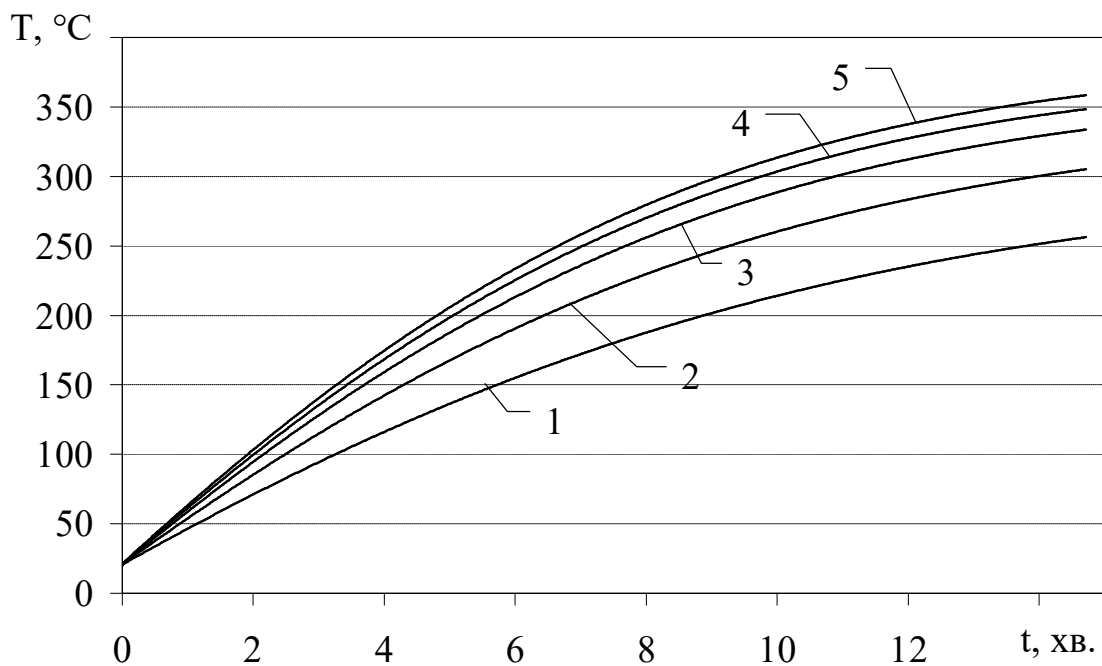


Рис. 2.17. Динаміка зміни температури верхнього краю стінки резервуара, оберненої в бік пожежі при різних швидкостях вітру: 1 –  $w = 0$ ; 2 –  $w = 1 \text{ м/с}$ ; 3 –  $w = 2 \text{ м/с}$ ; 4 –  $w = 3 \text{ м/с}$ ; 5 –  $w = 5 \text{ м/с}$

На рис. 2.18 наведено динаміку зміни температури верхнього краю зовнішньої поверхні стінки резервуара РВС-10000 за аналогічних умов, але при горінні резервуара з бензином. При цьому були прийняті наступні значення параметрів:  $T_f = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\varepsilon_f = 0,97$ ;  $\varepsilon_f = 0,8$ ;  $\delta = 8 \text{ мм}$ .

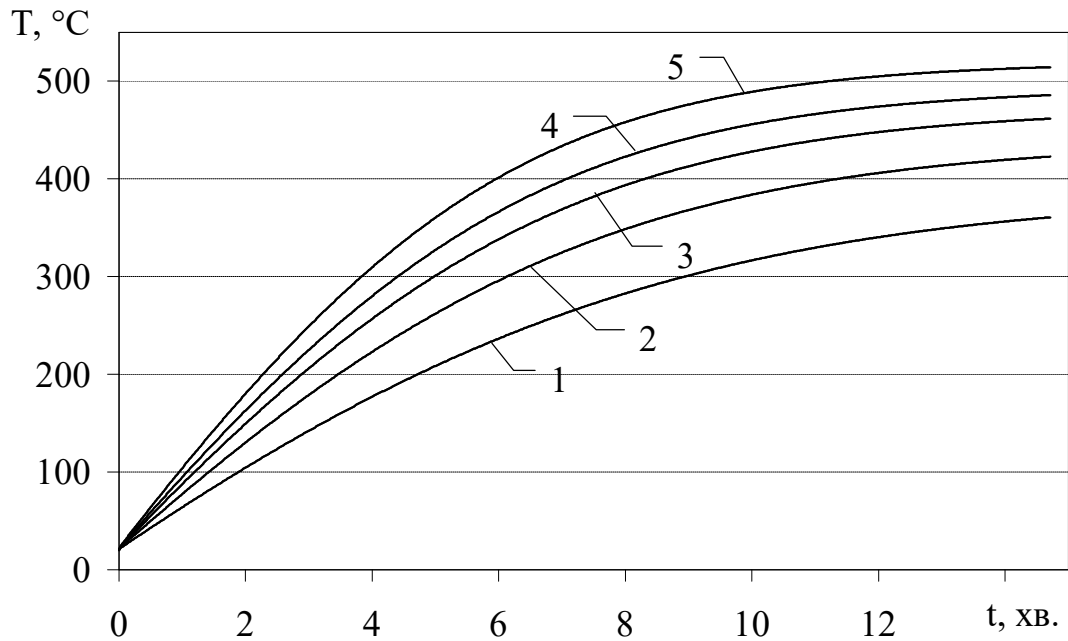


Рис. 2.18. Динаміка зміни температури верхнього краю стінки резервуара, оберненої в бік пожежі при різних швидкостях вітру: 1 –  $w = 0$ ; 2 –  $w = 1$  м/с; 3 –  $w = 2$  м/с; 4 –  $w = 3$  м/с; 5 –  $w = 5$  м/с

## 2.8. Модель нагріву покрівлі резервуара під тепловим впливом пожежі

### 2.8.1. Побудова оцінки коефіцієнта взаємного опромінення

Оберемо систему координат наступним чином: вісь  $X$  перетинає під прямим кутом вісі обох резервуарів, вісь  $Z$  співпадає з віссю резервуара, що горить, а початок координат знаходиться на висоті стінки резервуара, що горить (рис. 2.19). В такому випадку вісь резервуара, що не горить, перетинає вісь  $X$  у точці  $x_0$ .



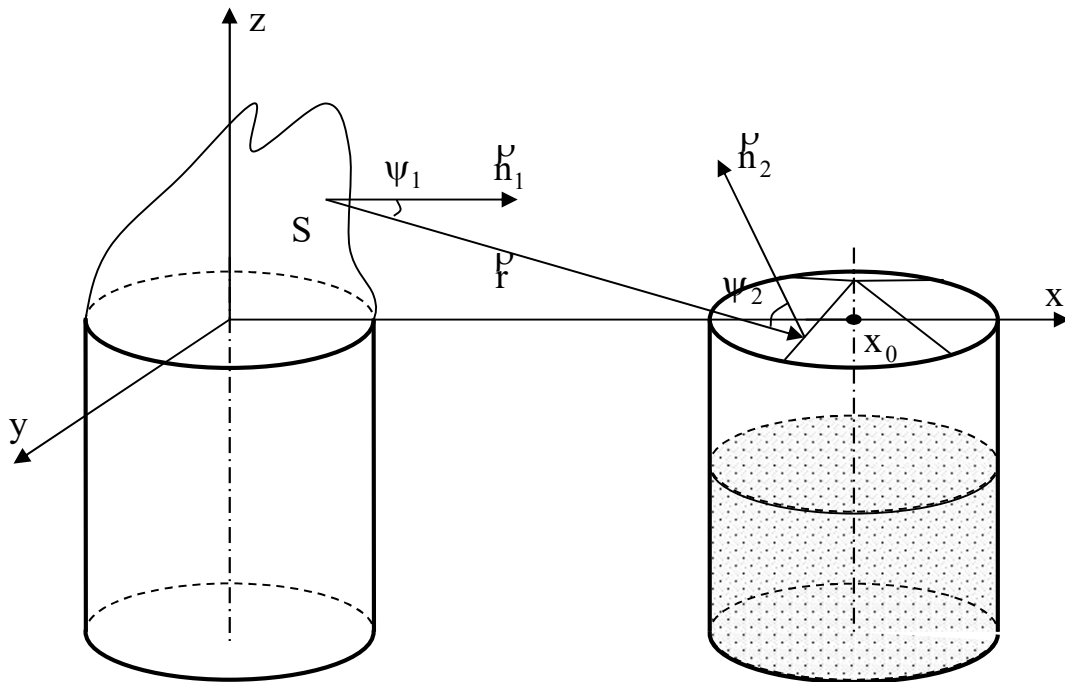


Рис. 2.19. Обчислення коефіцієнта взаємного опромінення між факелом і точкою на покрівлі резервуара

Коефіцієнт взаємного опромінення між довільною точкою на покрівлі резервуара і випромінюючою поверхнею полум'я визначається формулою (2.12), де  $\psi_1$  – кут між нормальним вектором до поверхні факела  $\vec{n}_1$  і радіус-вектором  $\vec{r}$ , що з'єднує точку на поверхні факела і точку на покрівлі сусіднього резервуара;  $\psi_2$  – кут між нормальним вектором до покрівлі резервуара  $\vec{n}_2$  і радіус-вектором  $\vec{r}$  (рис. 2.19). При цьому інтеграл обчислюється лише по тій частині поверхні факела, яка видна із даної точки на стінці резервуара (де  $\cos \psi_1 > 0$ ,  $\cos \psi_2 > 0$ ). З урахуванням представлення косинусів кутів через скалярний добуток відповідних векторів, вираз (2.12) набуде вигляду:

$$\varphi = \frac{1}{\pi} \iint_S \frac{(\vec{n}_1, \vec{r})(\vec{n}_2, \vec{r})}{r^4 |\vec{n}_1| |\vec{n}_2|} dS. \quad (2.35)$$

Вважаючи форму полум'я конічною, а її деформацію під впливом вітру такою, що зводиться до нахилу конуса в напрямку вітру [22], запишемо рівняння випромінюючої поверхні факела в параметричному вигляді:

$$\begin{cases} x_1 = u \cos v + c(R - u) \sin \beta \cos \gamma; \\ y_1 = u \sin v + c(R - u) \sin \beta \sin \gamma; \\ z_1 = c(R_f - u) \cos \beta; \\ 0 \leq u \leq R_f, 0 \leq v \leq 2\pi, \end{cases} \quad (2.36)$$

де  $\beta$  – кут нахилу полум'я відносно вертикальної вісі; напрямок вектора  $(\cos \gamma, \sin \gamma)$  співпадає з напрямком вітру;  $R$  – радіус резервуара.

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{w}{2},$$

$w$  – швидкість вітру. При цьому координати нормального вектору до поверхні полум'я мають вигляд [69]:

$$A = \frac{\partial y_1}{\partial u} \frac{\partial z_1}{\partial v} - \frac{\partial z_1}{\partial u} \frac{\partial y_1}{\partial v} = cu \cos v \cos \beta; \quad (2.37)$$

$$B = \frac{\partial z_1}{\partial u} \frac{\partial x_1}{\partial v} - \frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial z_1}{\partial v} = cu \sin v \cos \beta; \quad (2.38)$$

$$C = \frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial y_1}{\partial v} - \frac{\partial y_1}{\partial u} \frac{\partial x_1}{\partial v} = u - u \sin \beta \cos(v - \gamma). \quad (2.39)$$

Враховуючи, що вісь резервуара, який не горить, перетинає вісь  $X$  у точці  $x_0$ , координати точки на покрівлі резервуара мають вигляд:

$$\begin{cases} x_2 = x_0 + r \cos \alpha; \\ y_2 = r \sin \alpha; \\ z_2 = (R - r) \sin \omega, \end{cases} \quad (2.40)$$

де  $r$  – відстань до осі резервуара, що нагрівається;  $\alpha$  – полярний кут, який відповідає точці  $(x_2, y_2, z_2)$  на стінці резервуара;  $\omega$  – кут нахилу покритті резервуара. Нормальний вектор до покритті резервуара може бути записаний:

$$\mathbf{n}_2 = (\cos \alpha, \sin \alpha, \cos \omega). \quad (2.41)$$

Підставляючи вирази (2.36)–(2.41) в (2.35), отримуємо:

$$\begin{aligned} \Phi = & \frac{1}{\pi} \int_{u_1}^{u_2} \int_{v_1}^{v_2} \frac{A(x_0 + r \cos \alpha - x_1) + B(r \sin \alpha - y_1) + C((R - r) \sin \omega - z_1)}{\left[ (x_1 - x_0 - r \cos \alpha)^2 + (y_1 - r \sin \alpha)^2 + (z_1 - (R - r) \sin \omega)^2 \right]^{3/2}} \times \\ & \times \frac{[(x_1 - x_0) \cos \alpha + y_1 \sin \alpha - r + \cos \omega (z_1 - (R - r) \sin \omega)]}{\sqrt{1 + \cos^2 \omega}} du dv. \end{aligned} \quad (2.42)$$

Позначимо:

$$\tilde{x}_1 = \frac{x_1}{R} = s \cos v + c(1 - s) \sin \beta \cos \gamma;$$

$$\tilde{y}_1 = \frac{y_1}{R} = s \sin v + c(1 - s) \sin \beta \sin \gamma;$$

$$\tilde{z}_1 = \frac{z_1}{R} = c(1 - s) \cos \beta;$$

$$\tilde{A} = \frac{A}{R} = cs \cos v \cos \beta;$$

$$\tilde{B} = \frac{B}{R} = cs \sin v \cos \beta;$$

$$\tilde{C} = \frac{C}{R} = s - sc \sin \beta \cos(v - \gamma),$$

$$r_2 = \frac{r}{R},$$

$$\text{де } s = \frac{u}{R}.$$

Тоді коефіцієнт взаємного опромінення набуде вигляду

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{1}{\pi\sqrt{1+\cos^2\omega}} \times \\ &\times \int_0^R \int_0^{2\pi} \frac{R^2 \tilde{A}(x_0/R + r_2 \cos\alpha - \tilde{x}_1) + R^2 \tilde{B}(r_2 \sin\alpha - \tilde{y}_1) + R^2 \tilde{C}((1-r_2)\sin\omega - \tilde{z}_1)}{R^4 \left[ (\tilde{x}_1 - x_0/R - r_2 \cos\alpha)^2 + (\tilde{y}_1 - r_2 \sin\alpha)^2 + (\tilde{z}_1 - (1-r_2)\sin\omega)^2 \right]^2} \times \\ &\times [(\tilde{x}_1 - x_0/R)\cos\alpha + \tilde{y}_1 \sin\alpha - r_2 + \cos\omega(\tilde{z}_1 - (1-r_2)\sin\omega)] R^2 d(u/R) dv = \\ &= \frac{1}{\pi\sqrt{1+\cos^2\omega}} \times \\ &\times \int_0^1 ds \int_0^{2\pi} dv \frac{\tilde{A}(x_0/R + r_2 \cos\alpha - \tilde{x}_1) + \tilde{B}(r_2 \sin\alpha - \tilde{y}_1) + \tilde{C}((1-r_2)\sin\omega - \tilde{z}_1)}{\left[ (\tilde{x}_1 - x_0/R - r_2 \cos\alpha)^2 + (\tilde{y}_1 - r_2 \sin\alpha)^2 + (\tilde{z}_1 - (1-r_2)\sin\omega)^2 \right]^2} \times \\ &\times [(\tilde{x}_1 - x_0/R)\cos\alpha + \tilde{y}_1 \sin\alpha - r_2 + \cos\omega(\tilde{z}_1 - (1-r_2)\sin\omega)], \quad (2.43) \end{aligned}$$

де інтегрування проводиться лише по тим точкам  $(s, v)$ , в яких обидва множники в чисельнику є додатними:

$$\begin{aligned} \tilde{A}(x_0/R + r_2 \cos\alpha - \tilde{x}_1) + \tilde{B}(r_2 \sin\alpha - \tilde{y}_1) + \tilde{C}((1-r_2)\sin\omega - \tilde{z}_1) &> 0; \\ (\tilde{x}_1 - x_0/R)\cos\alpha + \tilde{y}_1 \sin\alpha - r_2 + \cos\omega(\tilde{z}_1 - (1-r_2)\sin\omega) &> 0. \end{aligned}$$

На рис. 2.20 наведено розподіл коефіцієнта взаємного опромінення по покрівлі резервуара РВС-10000 ( $D=14,25$  м,  $\omega=11^\circ$ ) за умови пожежі горючої рідини в аналогічному сусідньому резервуарі і відсутності вітру.

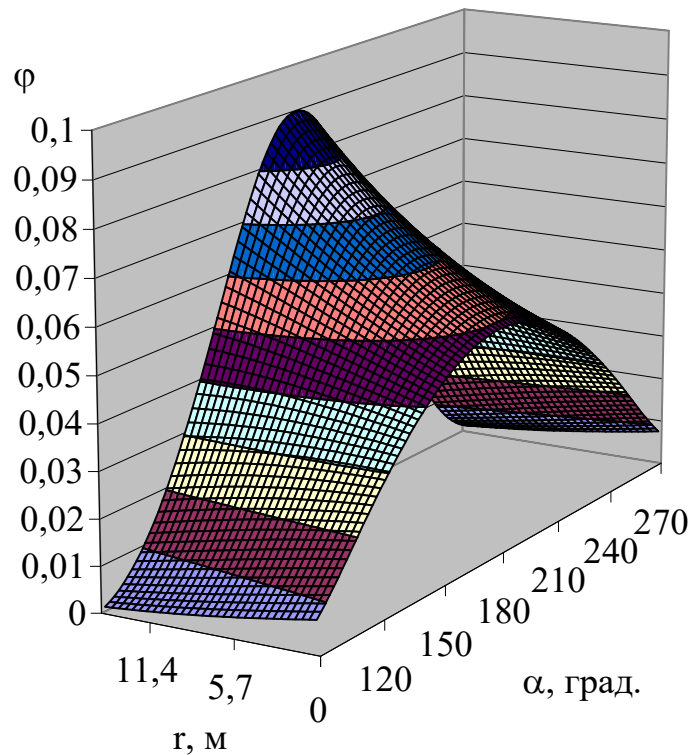


Рис. 2.20. Розподіл коефіцієнта взаємного опромінення по покрівлі резервуара за відсутності вітру при пожежі в сусідньому резервуарі з горючою рідиною

Аналіз графічної залежності на рис. 2.20 показує, що максимальне значення коефіцієнта взаємного опромінення досягається на краю покрівлі з боку пожежі ( $r = R$ ,  $\alpha = 180^\circ$ ). На рис. 2.21, 2.22 показано випадки, коли вітер, направлений в бік резервуара, що нагрівається, і має швидкість 2 м/с і 4 м/с відповідно.

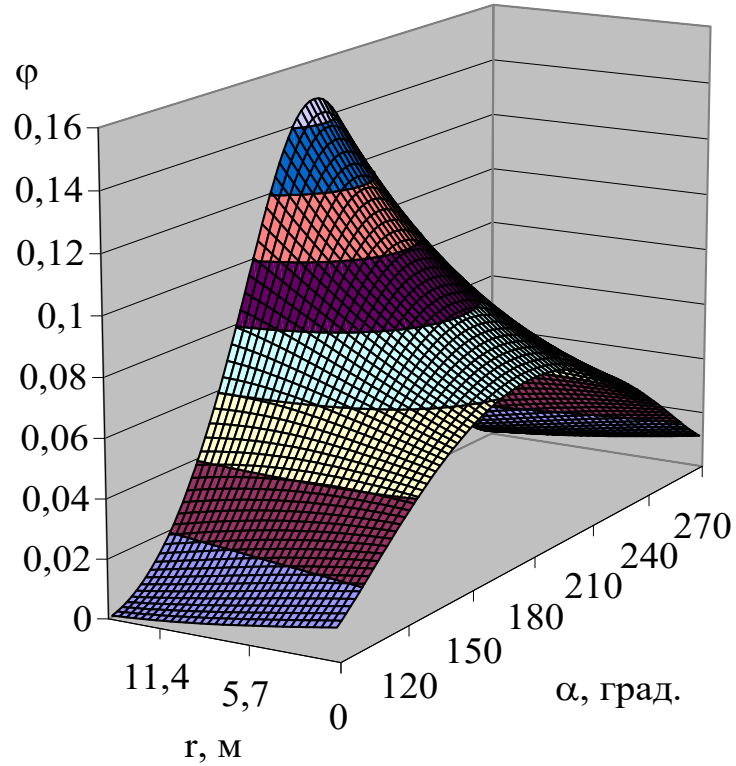


Рис. 2.21. Розподіл коефіцієнта взаємного опромінення по покрівлі резервуара при пожежі в сусідньому резервуарі з горючою рідиною і швидкості вітру 2 м/с

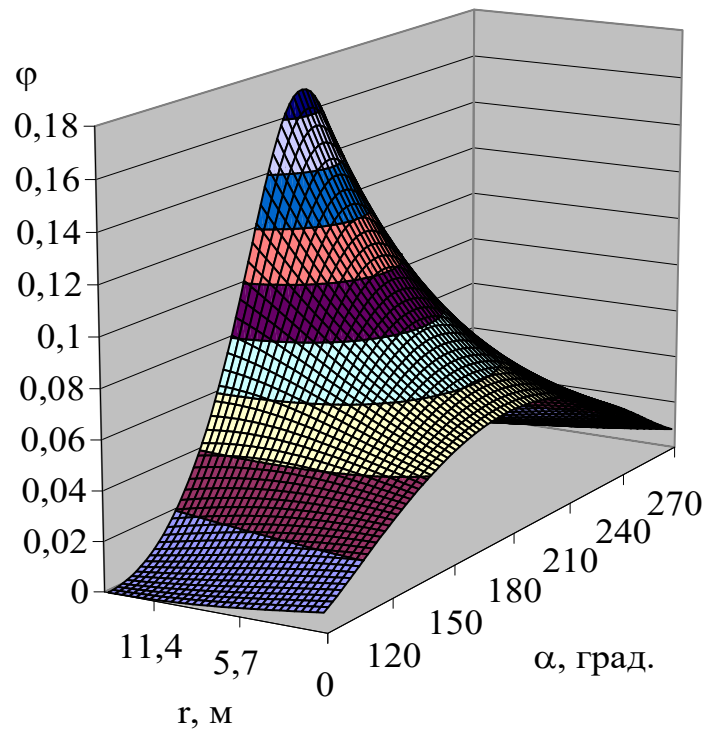


Рис. 2.22. Розподіл коефіцієнта взаємного опромінення по покрівлі резервуара при пожежі в сусідньому резервуарі з горючою рідиною і швидкості вітру 4 м/с

Аналіз графічних залежностей, наведених на рис. 2.21, 2.22, свідчить, що нахил факела вітром в бік сусіднього резервуара призводить до збільшення коефіцієнта взаємного опромінення. Його максимального значення досягається на краю покрівлі з боку резервуара, що горить.

### 2.8.2. Побудова оцінки коефіцієнта конвекційного теплообміну

У випадку відсутності вітру для вертикальних поверхонь має місце вільна конвекція, що описується критеріальним рівнянням:

$$\text{Nu} = 0,135(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{1/3}, \quad (2.44)$$

де Nu, Gr, Pr – числа Нусельта, Грасгофа і Прандтля відповідно:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha D}{\lambda_f}; \quad (2.45)$$

$$\text{Gr} = \frac{\beta \Delta T D^3 g}{\nu^2}; \quad (2.46)$$

$\alpha$  – коефіцієнт конвекційного теплообміну;  $D$  – діаметр резервуара;  $\lambda_f$  – коефіцієнт теплопровідності повітря;  $\beta=1/T$  – температурний коефіцієнт об'ємного розширення;  $\Delta T$  – різниця температур між повітрям і поверхнею;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості. Об'єднуючи (2.44)–(2.46), отримаємо значення коефіцієнта конвекційного теплообміну:

$$\alpha = 0,135 \frac{\lambda_f}{D} \left( 2 \frac{(T - T_0) D^3 g}{\nu^2 (T_0 + T)} \text{Pr} \right)^{1/3} = 0,135 \lambda_f \left( \frac{2g \text{Pr}}{\nu^2} \right)^{1/3} \left( \frac{T - T_0}{T + T_0} \right)^{1/3}. \quad (2.47)$$

Для розрахунку коефіцієнта конвекційного теплообміну для горизонтальних поверхонь, температура яких вище, ніж температура повітряного середовища, вираз (2.47) має бути збільшений на 30 % у випадку теплообміну верхньої поверхні покрівлі з навколишнім повітрям і зменшений на 30 % у випадку теплообміну нижньої поверхні покрівлі з пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара. Отже, для коефіцієнта конвекційного теплообміну з навколишнім повітрям буде мати місце співвідношення:

$$\alpha_{\text{out}} = 0,176\lambda_f \left( \frac{2gPr}{v^2} \right)^{1/3} \left( \frac{T - T_0}{T + T_0} \right)^{1/3}. \quad (2.48)$$

Коефіцієнт конвекційної тепловіддачі в пароповітряну суміш набуде вигляду:

$$\alpha_{\text{in}} = 0,095\lambda_f \left( \frac{2gPr}{v^2} \right)^{1/3} \left( \frac{T - T_0}{T + T_0} \right)^{1/3}. \quad (2.49)$$

За наявності вітру має місце співвідношення:

$$Nu = 0,0364 Re^{0,8} Pr^{0,4} \left( \frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,11}, \quad (2.50)$$

де  $Re$  – число Рейнольда;  $\mu_f$ ,  $\mu_w$  – динамічна в'язкість повітряного середовища при температурі повітряного середовища і температурі поверхні відповідно:

$$Re = \frac{wD}{v}. \quad (2.51)$$



Об'єднуючи вирази (2.45), (2.50), (2.51), отримаємо:

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{out}} &= 0,0364 \frac{\lambda_f}{D} \left( \frac{wD}{v} \right)^{0,8} \text{Pr}^{0,4} \left( \frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,11} = \\ &= 0,0364 \frac{\lambda_f}{D^{0,2}} \left( \frac{w}{v} \right)^{0,8} \text{Pr}^{0,4} \left( \frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,11}.\end{aligned}\quad (2.52)$$

Таким чином, для розрахунку коефіцієнта конвекційної теплопередачі для зовнішньої поверхні покрівлі слід використовувати вираз (2.52) при наявності вітру і (2.48) при його відсутності.

### 2.8.3. Розв'язання рівняння теплопровідності в покрівлі резервуара

Розповсюдження тепла в глибину покрівлі описується одновимірним рівнянням теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \delta, \quad t > 0, \quad (2.53)$$

де  $T(x,t)$  – температура у точці  $x$  в момент часу  $t$ ;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho},$$

де  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  – коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність і густина сталі відповідно;  $x=0$  – відповідає точці на зовнішній поверхні покрівлі;  $x=\delta$  – точці на внутрішній поверхні покрівлі.

В початковий момент часу (до початку пожежі) температура всередині покрівлі дорівнює температурі навколишнього середовища  $T_0$ :

$$T(x,0) = T_0, \quad 0 \leq x \leq \delta, \quad (2.54)$$

Крайова умова на зовнішній поверхні покрівлі буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = & -\frac{c_0 \varepsilon_f \varepsilon_w}{\lambda} \left[ \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{out}}{100} \right)^4 \right] \varphi + \frac{c_0 \varepsilon_w}{\lambda} \left[ \left( \frac{T_{out}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] (1 - \varphi) + \\ & + \frac{\alpha_{out}}{\lambda} (T_{out} - T_0), \end{aligned} \quad (2.55)$$

а на внутрішній:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta} = -\frac{c_0 \varepsilon_w}{\lambda} \left[ \left( \frac{T_{in}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] - \frac{\alpha_{in}}{\lambda} (T_{in} - T_0). \quad (2.56)$$

Таким чином, диференціальне рівняння параболічного типу (2.53) разом з крайовими умовами (2.55) і (2.56), а також початковою умовою (2.54) описують динаміку зміни температури в покрівлі вертикального сталевого резервуара.

Отримане диференціальне рівняння не може бути розв'язано аналітично внаслідок складних виразів в крайових умовах. Тому розв'язання було проведено методом скінчених різниць, суть якого полягає в заміні похідних скінченими приростами. При цьому крок по просторовій вісі було обрано 1 мм, а крок по вісі часу обирався з урахуванням умови Куранта-Фрідрікса-Леві, що забезпечує збіжність розв'язку.

В якості прикладу на рис. 2.23 наведено динаміку зміни температури краю зовнішньої поверхні покрівлі резервуара РВС-10000 з боку пожежі в

аналогічному резервуарі з нафтою, для різних швидкостей вітру. При цьому були прийняті наступні значення параметрів:  $T_f=1100\text{ °C}$ ;  $\varepsilon_f=0,85$ ;  $\varepsilon_w=0,8$ ;  $\delta=4\text{ мм}$ ; вітер направлений в бік резервуара, що нагрівається.

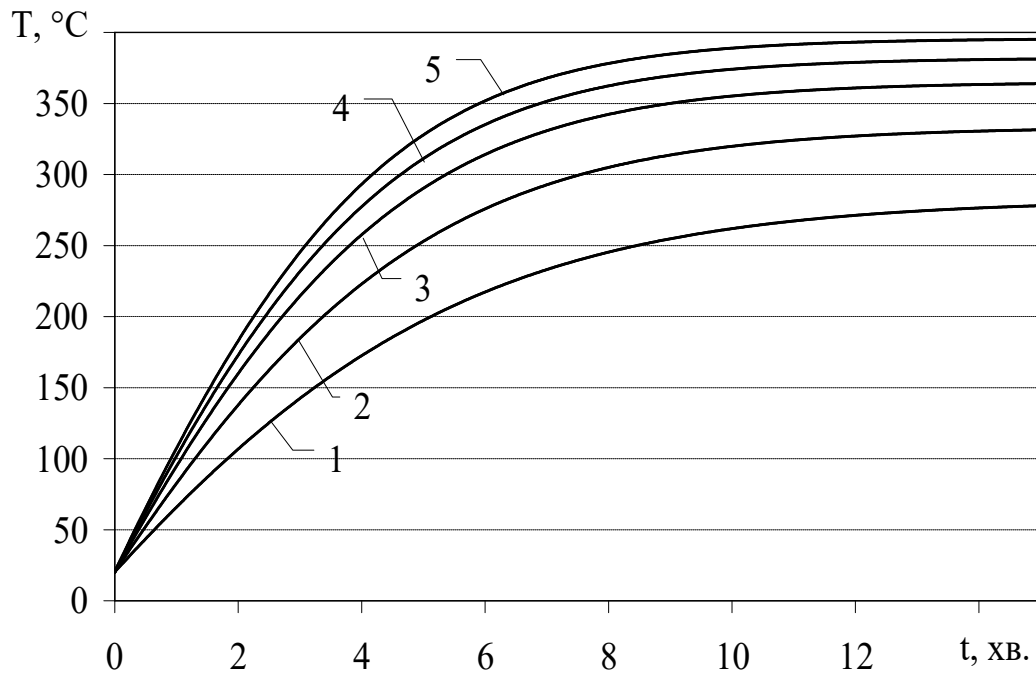


Рис. 2.23. Динаміка зміни температури зовнішньої покрівлі резервуара з боку пожежі при різних швидкостях вітру: 1 –  $w=0$ ; 2 –  $w=1\text{ м/с}$ ; 3 –  $w=2\text{ м/с}$ ; 4 –  $w=3\text{ м/с}$ ; 5 –  $w=5\text{ м/с}$

Аналіз графічних залежностей на рис. 2.23 показує наступне:

- при відсутності вітру покрівля резервуара досягає температури  $250\text{ °C}$  приблизно через 8 хв. При цьому температура стінки резервуара досягає цієї величини лише через 15 хв. після початку пожежі. Це свідчить про першочерговість подання води на охолодження покрівлі резервуара;

- вітер, направлений від резервуара, що горить, до сусіднього збільшує небезпеку розповсюдження пожежі. Зокрема, при швидкості вітру  $2\text{ м/с}$  покрівля досягає температури  $250\text{ °C}$  вже через 4,3 хв., а при  $5\text{ м/с}$  – через 2,5 хв;

- скорочення часу досягнення небезпечних значень температури покрівлею резервуара означає необхідність охолодження сусідніх резервуарів

вже через 2–3 хв. після початку пожежі.

## Висновки до розділу II

1. Обґрунтовано припущення і побудовано модель нагріву стінки резервуара з нафтопродуктом під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі. Модель враховує променевий теплообмін зовнішньої поверхні стінки резервуара з факелом та навколишнім середовищем, внутрішньої поверхні стінки з внутрішнім простором; конвекційний теплообмін з навколишнім повітрям і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара. Модель може бути використана для прогнозування наслідків надзвичайної ситуації, обумовленої пожежею горючої рідини в вертикальному сталевому резервуарі.

2. Проведено оцінку коефіцієнта взаємного опромінення з факелом для довільної точки на стінці резервуара. Показано, що для вертикальних сталевих резервуарів, місткістю до 20000 м<sup>3</sup> включно, в безрозмірних координатах коефіцієнт опромінення залежить лише від типу рідини, що горить. Для горючих рідин максимальне значення коефіцієнта опромінення сягає 0,0996, а для легкозаймистих рідин – 0,1095. При цьому максимальне значення досягається на верхньому краї стінки резервуара, оберненої в бік пожежі, монотонно спадаючи при віддаленні від неї, як по висоті, так і по куту.

3. З використанням методів теорії подібності проведено оцінку коефіцієнта конвекційного теплообміну на зовнішній і внутрішній поверхнях стінки резервуара за умови вільної конвекції. Його значення монотонно зростає із підвищенням температури стінки, досягаючи 9 Вт/м<sup>2</sup>К при температурі стінки 500 °С.

4. Розв'язання рівняння теплового балансу для стінки резервуара, проведене чисельним методом, дозволяє визначити розподіл температур по стінці резервуара. Це дозволяє визначити область, яка потребує охолодження і

граничний час його початку. Показано, що на стінці резервуара, оберненої вбік пожежі, небезпечні температури досягаються вже через 15 хвилин після виникнення пожежі. При цьому розподіл температур всередині стінки резервуара носить майже лінійний характер, температура зменшується із віддаленням від зовнішньої поверхні стінки із швидкістю  $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мм}$ .

5. Нахил факела вітром в напрямку сусіднього резервуара призводить до збільшення коефіцієнта взаємного опромінення між факелом і верхнім краєм стінки сусіднього резервуара. При цьому коефіцієнт взаємного опромінення монотонно зростає із збільшенням швидкості вітру. Як і для випадку вітрового штилю, показано, що для вертикальних сталевих резервуарів, місткістю до  $20000\text{ м}^3$  включно, в безрозмірних координатах коефіцієнт опромінення залежить лише від типу рідини, що горить. Значення коефіцієнта взаємного опромінення на верхньому краї стінки резервуара для горючих рідин досягає  $0,1642$  (при швидкості вітру  $5\text{ м}/\text{с}$ ), збільшуючись в  $1,65$  рази порівняно з випадком вітрового штилю. Для легкозаймистих рідин досягає  $0,2109$  (при швидкості вітру  $5\text{ м}/\text{с}$ ), збільшуючись в  $1,93$  рази.

6. Оцінено коефіцієнт взаємного опромінення факела і точки на покрівлі резервуара за умови зміни форми факела під впливом вітру. Нахил факела вітром в напрямку сусіднього резервуара призводить до збільшення коефіцієнта взаємного опромінення між факелом і покрівлею сусіднього резервуара. При цьому коефіцієнт взаємного опромінення зростає із збільшенням швидкості вітру. За відсутності вітру він складає  $0,0901$  для точки на краю покрівлі з боку пожежі. При швидкості вітру  $2\text{ м}/\text{с}$  цей коефіцієнт становить  $0,1475$ , а при швидкості  $4\text{ м}/\text{с}$  досягає величини  $0,1697$ . Показано, що для вертикальних сталевих резервуарів, місткістю до  $20000\text{ м}^3$  включно, в безрозмірних координатах коефіцієнт опромінення залежить лише від типу рідини, що горить.

7. Із застосуванням методів теорії подібності побудовано оцінки коефіцієнта конвекційної тепловіддачі на зовнішній і внутрішній поверхнях

покрівлі резервуара. За відсутності вітру на зовнішній поверхні має місце вільна конвекція, а при його наявності – вимушена. На внутрішній поверхні покрівлі резервуара має місце теплообмін з пароповітряною сумішшю в режимі вільної конвекції.

8. Шляхом застосування метода скінчених різниць розв'язано рівняння теплового балансу і визначено розподіл температур по покрівлі резервуара. Показано, що нахил факелу в бік сусіднього резервуара істотно підвищує небезпеку розповсюдження пожежі. Якщо при відсутності вітру покрівля резервуара досягає температури 250 °С через 8 хв., то при швидкості вітру 2 м/с цей час зменшується до 4,3 хв., а при 5 м/с – до 2,5 хв.

## РОЗДІЛ III

### МОДЕЛЬ ОХОЛОДЖЕННЯ РЕЗЕРВУАРА В УМОВАХ ПОЖЕЖІ

Основна небезпека пожежі в обвалуванні полягає в нагріві резервуара під тепловим впливом пожежі. Досягнення окремими елементами конструкції резервуара температури самоспалахування парів нафтопродукту, що зберігається, здатне призвести до полум'яного горіння парів на дихальній арматурі резервуара або до вибуху у газовому просторі резервуара. Саме тому охолодження резервуарів є першочерговою задачею при локалізації пожежі в резервуарному парку.

В даному розділі побудовано модель охолодження стінки та покрівлі резервуара за допомогою водної плівки, що стікає по ним.

Матеріали розділу викладено в роботах автора [81, 82, 83].

#### **3.1. Побудова моделі охолоджувальної дії водної плівки на стінку резервуара при пожежі**

##### **3.1.1. Побудова рівняння теплового балансу для стінки резервуара**

Розглянемо довільну точку на стінці резервуара, розташовану вище рівня залитого в резервуара нафтопродукту. Зовнішня поверхня стінки нагрівається за рахунок теплового потоку випромінюванням від факела над сусіднім резервуаром ( $q_1$ ), віддає тепло випромінюванням в навколишнє середовище ( $q_2$ ) та конвекцією в оточуючу середу (повітря або водну плівку –  $q_3$ ). Внутрішня поверхня стінки віддає тепло випромінюванням у внутрішній простір резервуара ( $q_4$ ) та конвекційно в пароповітряну суміш ( $q_5$ ). Розподіл температури в середині стінки описується одновимірним рівнянням теплопровідності (рис. 3.1) [69].

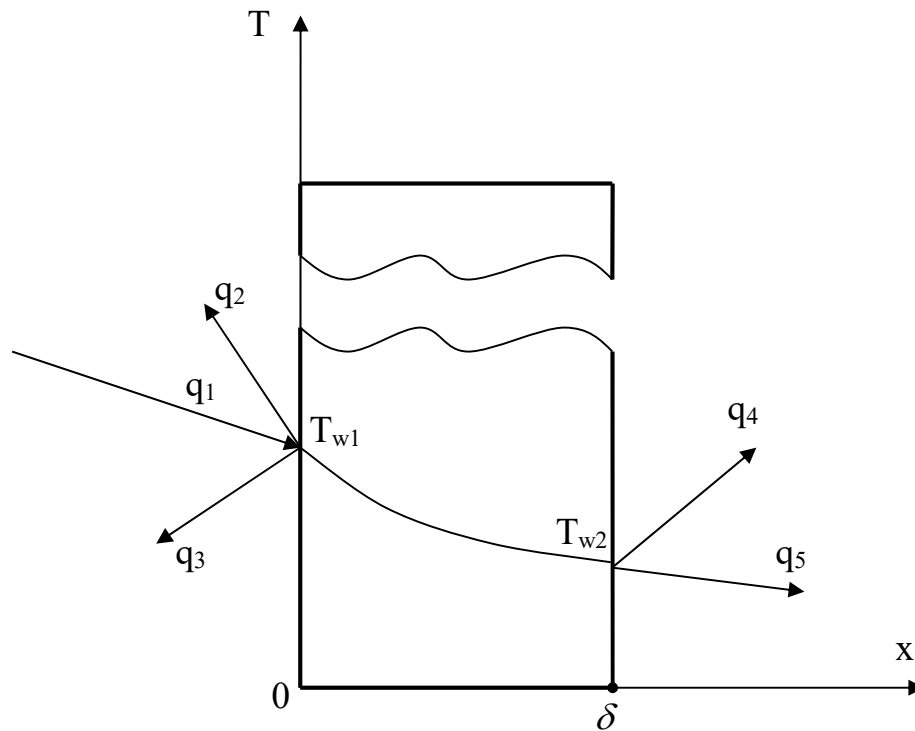


Рис. 3.1. Нагрів сухої стінки резервуара під тепловим впливом пожежі

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \delta_w, \quad t > 0, \quad (3.1)$$

де  $T(x,t)$  – температура всередині стінки резервуара на відстані  $x$  від її зовнішньої поверхні в момент часу  $t$ ;  $\delta_w$  – товщина стінки;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності:

$$a = \frac{\lambda_w}{c_w \rho_w}, \quad (3.2)$$

$\lambda_w$ ,  $c_w$ ,  $\rho_w$  – теплопровідність, теплоємність і густина сталі відповідно. Наявність теплового потоку відповідає крайовій умові другого роду на зовнішній поверхні стінки:



$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = -\frac{1}{\lambda_w} (q_1 - q_2 - q_3). \quad (3.3)$$

На внутрішній стінці крайова умова буде мати вигляд:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta} = -\frac{1}{\lambda_w} (q_4 + q_5). \quad (3.4)$$

В [69] показано, що крайова умова для зовнішньої поверхні стінки може бути представлена у вигляді:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = & -\frac{c_0 \varepsilon_f \varepsilon_w}{\lambda_w} \left[ \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{out}}{100} \right)^4 \right] \varphi + \frac{c_0 \varepsilon_w}{\lambda_w} \left[ \left( \frac{T_{out}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] (1 - \varphi) + \\ & + \frac{\alpha_{out}}{\lambda_w} (T_{out} - T_0), \end{aligned} \quad (3.5)$$

де  $c_0=5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$  – стала;  $\varepsilon_f, \varepsilon_w$  – ступіні чорноти випромінюючої поверхні факела і стінки резервуара відповідно;  $T_f$  – температура поверхні факела;  $T_{out}$  – температура зовнішньої поверхні стінки резервуара;  $\varphi$  – коефіцієнт взаємного опромінення між факелом і точкою на поверхні резервуара;  $T_0$  – температура навколишнього середовища;  $\alpha_{out}$  – коефіцієнт конвекційного теплообміну стінки з водною плівкою, що стікає по ній.

Для внутрішньої поверхні стінки резервуара крайова умова набуває вигляду [69]:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta} = -\frac{c_0 \varepsilon_w}{\lambda_w} \left[ \left( \frac{T_{in}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] - \frac{\alpha_{in}}{\lambda_w} (T_{in} - T_0). \quad (3.6)$$

де  $\alpha_{in}$  – коефіцієнт конвекційного теплообміну внутрішньої поверхні стінки резервуара з пароповітряною сумішшю в його газовому просторі;  $T_{in}$  – температура на внутрішній поверхні стінки резервуара. При теплообміні стінки з пароповітряною сумішшю має місце режим вільної конвекції. В цьому випадку коефіцієнт конвекційного теплообміну може бути описаний виразом [69]:

$$\alpha_{in} = \left( 15,904 - 0,0082 \frac{T_{in} + T_0}{2} \right) \left( \frac{T_{in} - T_0}{T_{in} + T_0} \right)^{1/3}, \quad (3.7)$$

де температури задаються в градусах Кельвіна.

Коефіцієнт конвекційного теплообміну з водною плівкою, що стікає по зовнішній стінці резервуара описується виразом [65]:

$$\alpha_{out} = (238,53T_c - 45098)I^{0,25}, \quad (3.8)$$

де  $T_c$  – температура води;  $I$  – інтенсивність стікання води,  $m^3/(m \cdot s)$ .

Стікаюча по стінці вода є основним чинником її охолодження і запобігання того, що температура стінки може досягти небезпечних значень. Згідно (3.8) при температурі води  $T_c=20$  °С та інтенсивності її подачі  $I=(0,5 \div 2,0)$  л/(м·с) коефіцієнт конвекційного теплообміну між стінкою і водною плівкою складає  $\alpha_{out}=(3,7 \div 5,2)$  кВт/( $m^2 \cdot K$ ). Це на 3 порядки перевищує типові значення коефіцієнта конвекційного теплообміну внутрішньої поверхні стінки з пароповітряною сумішшю:  $\alpha_{in}=(6,5 \div 8,5)$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ) при температурі стінки  $T_{in}=(100 \div 300)$  °С – вираз (3.7).

Чисельне розв'язання рівняння (3.1) з крайовими умовами (3.5), (3.6) і значеннями коефіцієнтів конвекційного теплообміну (3.7), (3.8) дозволяє знайти усталений (при  $t \rightarrow \infty$ ) розподіл температур всередині стінки резервуара.

Зокрема, буде знайдено значення температури на зовнішній поверхні стінки резервуара:

$$T_{\text{out}}^* = \lim_{t \rightarrow \infty} T_{\text{out}}(t).$$

Це означає, що температура поверхні стінки резервуара збігається до певного граничного значення. Рівняння (3.1) разом з крайовими умовами (3.5) і (3.6), що відповідають умовам теплообміну, визначає динаміку зміну розподілу температури в стінці резервуара. Застосування метода скінчених різниць до (3.1), (3.5), (3.6) дозволяє знайти усталений розподіл температур в стінці резервуара, як граничний розподіл при  $t \rightarrow \infty$ . Використання метода скінчених різниць вимагає завдання початкової умови, в якості якої може бути обрана умова  $T = T_0$ .

### **3.1.2. Побудова моделі нагріву водної плівки, що стікає по стінці резервуара**

Відбір водою тепла від стінки резервуара призводить до нагріву води. Нагрів води до температури кипіння призведе до її скипання на поверхні стінки і відштовхування водної плівки від стінки. Це різко знижує охолоджуючий ефект. Тому важливим є не лише контроль температури стінки, а й температури води, що стікає по ній.

Розглянемо елементарний об'єм води у формі паралелепіпеда на стінці резервуара (рис. 3.2).

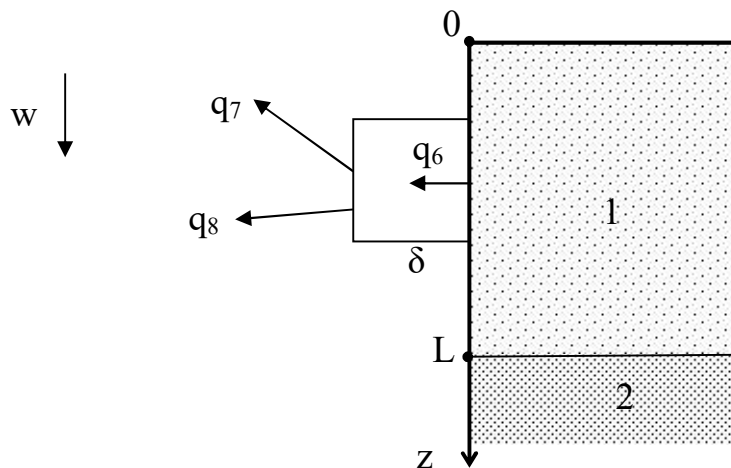


Рис. 3.2. Елементарний об'єм води на стінці резервуара: 1 – газовий простір резервуара; 2 – нафтопродукт

Будемо виходити за наступних припущень

1. Водна плівка рівномірно рухається по стінці резервуара зі сталою швидкістю  $w$ .

2. Шар води є тонким, внаслідок чого вода є прозорою для теплового випромінювання від факелу до стінки резервуара і від стінки резервуара в навколишнє середовище.

3. Вода нагрівається внаслідок конвекційного теплообміну зі стінкою резервуара (тепловий потік  $q_6$ , рис. 3.2).

4. Вода віддає тепло в навколишнє середовище шляхом випромінювання ( $q_7$ , рис. 3.2) і конвекції ( $q_8$ , рис. 3.2).

5. Внаслідок турбулентного характеру стікання і інтенсивного перемішування температура води по товщині водної плівки є однаковою.

Нехай  $\delta_w$  – товщина водної плівки;  $\Delta S$  – площа основи елементарного об'єму води  $\Delta V$  (рис. 3.2):

$$\Delta V = \delta \Delta S. \quad (3.9)$$

Тепловий потік від стінки резервуара внаслідок конвекційного теплообміну складає

$$q_6 = \alpha_{\text{out}} (T_{\text{out}}^* - T_c). \quad (3.10)$$

Тепловий потік випромінюванням від водної плівки в навколишнє середовище

$$q_7 = c_0 \varepsilon_c \left( \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right), \quad (3.11)$$

де  $\varepsilon_c$  – ступінь чорноти поверхні води. Тепловий потік внаслідок конвекційного теплообміну з повітрям

$$q_8 = \alpha_a (T_c - T_0), \quad (3.12)$$

де  $\alpha_a$  – коефіцієнт конвекційного теплообміну з повітрям. Таким чином, протягом часу  $\Delta t$  елементарний об'єм води отримує кількість тепла  $\Delta Q$ :

$$\Delta Q = (q_6 - q_7 - q_8) \Delta S \Delta t. \quad (3.13)$$

Отримане тепло йде на нагрів об'єму води  $\Delta V$  на температуру  $\Delta T$ :

$$\Delta Q = \Delta V \rho_c c_c \Delta T, \quad (3.14)$$

де  $\rho_c$ ,  $c_c$  – густина і теплоємність води відповідно.

Прирівнюючи вирази (3.13) і (3.14), отримаємо:

$$(q_6 - q_7 - q_8)\Delta S\Delta t = \Delta V\rho_c c_c \Delta T. \quad (3.15)$$

Із врахуванням співвідношення (3.9) вираз (3.15) набуде вигляду:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{q_6 - q_7 - q_8}{\delta\rho_c c_c}. \quad (3.16)$$

Переходячи до границі при  $\Delta t \rightarrow \infty$  у виразі (3.16), отримаємо:

$$\frac{dT}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{q_6 - q_7 - q_8}{\delta\rho_c c_c}. \quad (3.17)$$

Врахування рівномірного рух води по стінці:

$$dz = wdt, \quad (3.18)$$

дозволяє перетворити вираз (3.17) на:

$$\frac{dT_c}{dz} = \frac{q_6 - q_7 - q_8}{w\delta\rho_c c_c} \quad (3.19)$$

Підстановка (3.10)–(3.12) у (3.19) дає:

$$\frac{dT_c}{dz} = \frac{1}{w\delta\rho_c c_c} \times \left[ \alpha_{out}(T_{out}^* - T_c) - \alpha_a(T_c - T_0) - c_0\varepsilon_c \left( \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right) \right] \quad (3.20)$$

Відзначимо, що інтенсивність зрошення стінки дорівнює:

$$I = w\delta.$$

Тоді,

$$\frac{dT_c}{dz} = \frac{1}{I\rho_c c_c} \times \left[ \alpha_{out}(T_{out}^* - T_c) - \alpha_a(T_c - T_0) - c_0 \varepsilon_c \left( \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right) \right], \quad (3.21)$$

де інтенсивність зрошення стінки задається в  $\text{м}^3/(\text{м}\cdot\text{с})$ . Коефіцієнт конвекційного теплообміну зі стінкою  $\alpha_{out}$  визначається співвідношенням (3.8). Величину коефіцієнта конвекційного теплообміну з повітрям оцінимо виходячи з того, що повітря рухається зі швидкістю  $w$  відносно води:

$$\text{Nu} = 0,036 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4}, \quad (3.22)$$

де  $\text{Nu}$ ,  $\text{Re}$ ,  $\text{Pr}$  – числа Нусельта, Рейнольда і Прандтля відповідно:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_a L}{\lambda_a}; \quad \text{Re} = \frac{wL}{\nu_a},$$

де  $L$  – характерний розмір;  $\lambda_a$ ,  $\nu_a$  – теплопровідність і кінематична в'язкість повітря відповідно. Тоді,

$$\frac{\alpha_a L}{\lambda_a} = 0,036 \left( \frac{wL}{\nu_a} \right)^{0,8} \text{Pr}^{0,4},$$

$$\alpha_a = 0,036\lambda_a \left( \frac{w}{v_a} \right)^{0,8} L^{-0,2} Pr^{0,4}. \quad (3.23)$$

В [65] показано, що швидкість стікання водної плівки може бути апроксимована виразом:

$$w \cong 18,2I^{0,4}. \quad (3.24)$$

де інтенсивність зрошення стінки виражена в м<sup>3</sup>/(м·с). Тоді співвідношення (3.23) набуде вигляду:

$$\alpha_a = 0,367L^{-0,2}I^{0,32}\lambda_a v_a^{-0,8} Pr^{0,4}. \quad (3.25)$$

Із (3.24) випливає, що при інтенсивності подачі води  $I=(0,5\div 2,0)$  л/(м·с) швидкість стікання складає  $w=(0,87\div 1,5)$  м/с. Мала товщина шару води ( $\delta_c=(0,6\div 1,3)$  мм) дозволяє вважати його повністю прозорим для теплового випромінювання пожежі, що нагріває стінку резервуара.

Коефіцієнт теплопровідності повітря  $\lambda_a$ , кінематична в'язкість  $v_a$  і число Прандтля  $Pr$  залежать від температури повітря. На рис. 3.3 показано залежність:

$$f_a(T) = \lambda_a v_a^{-0,8} Pr^{0,4},$$

та її лінійну апроксимацію у вигляді:

$$\tilde{f}_a(T) = -0,14T + 62,4, \quad (3.26)$$



де температура повітря  $T$  має бути задана в градусах Цельсія. Аналіз зображень на рис. 3.3 свідчить, що відносна похибка апроксимації (3.26) не перевищує 1,5%. Тоді, підставляючи (3.26) у (3.25), отримаємо:

$$\begin{aligned}\alpha_a &= 0,367L^{-0,2}I^{0,32}(62,4 - 0,14T_0), \\ \alpha_a &= L^{-0,2}I^{0,32}(22,9 - 0,052T_0),\end{aligned}\quad (3.27)$$

де в якості характерного розміру  $L$  може бути обрано висоту стінки над рівнем нафтопродукту (рис. 3.2), а температуру повітря  $T_0$  задано в градусах Цельсія.

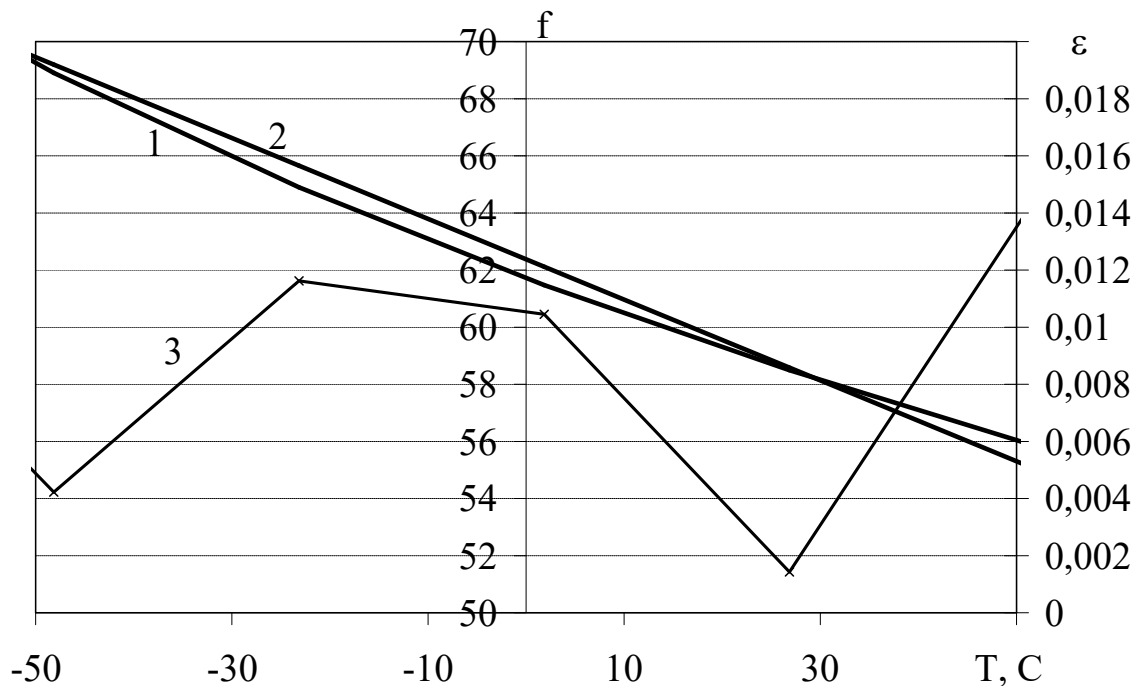


Рис. 3.3. Залежність функції  $f_a$  від температури навколишнього повітря (1), її лінійна апроксимація (2) і відносна похибка (3, по правій вісі)

Величина коефіцієнта конвекційного теплообміну водної плівки з навколишнім повітрям становить  $\alpha_a=(1,3\div 2,1)$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) при температурі води  $T_c=(20\div 90)$  °С, повітря  $T_0=20$  °С і висоті стінки над рівнем нафтопродукту  $L=6$  м.

Отже, вираз (3.21) після підстановки значень коефіцієнтів конвекційного теплообміну (3.8) і (3.27) описує зміну температури водної плівки у вертикальному напрямку в усталеному режимі.

### 3.1.3. Розробка алгоритму визначення розподілу температур по стінці резервуара і водній плівці

Розв'язання рівняння розподілу температури всередині стінки резервуара (3.1), (3.5), (3.6) разом з градієнтом температури у водній плівці (3.21) дозволяють побудувати алгоритм розрахунку температури стінки і водної плівки в умовах пожежі в сусідньому резервуарі.

Оберемо в якості початку координат точку на верхньому краї стінки резервуара, а вісь OZ спрямуємо вниз (рис. 3.2). Частина стінки при  $z > L$  внутрішньою поверхнею торкається нафтопродукту, який має охолоджувальну дію. Це означає, що небезпека нагріву стінки до температури самоспалахування існує тільки для відрізка стінки  $0 \leq z \leq L$ . Тоді алгоритм розрахунку розподілу температури стінки і водної плівки на відріжку  $0 \leq z \leq L$  зводиться до наступних кроків.

1. Розбиваємо відрізок  $[0; L]$  точками  $z_0, z_1, \dots, z_n$  на  $n$  рівних відрізків  $[z_i; z_{i+1}]$  довжиною  $\Delta z$ . При цьому  $z_0=0, z_n=L$ .

2. Обираємо гранично припустимі значення температури водної плівки  $T_{c \max}$  і стінки резервуара  $T_{out \max}$ . При цьому мають виконуватися умови:

$$T_{c \max} < 100^\circ \text{C};$$

$$T_{out \max} < T^*,$$

де  $T^*$  – температура самоспалахування парів нафтопродукту.

3. Початкова температура водної плівки на верхньому краї стінки резервуара дорівнює температурі навколишнього середовища:

$$T_c(0) = T_0.$$

4. Нехай  $i=0$ .

5. Для точки  $z_i$  розраховуємо усталену температуру зовнішньої поверхні стінки  $T_{out}^*(z_i)$ , розв'язуючи для цього одновимірне рівняння теплопровідності (3.1) з крайовими умовами (3.5) і (3.6), коефіцієнти конвекційного теплообміну для яких визначаються за формулами (3.7) і (3.8).

6. Обчислюємо приріст температури водної плівки у точці  $z_i$ :

$$\Delta T_c(z_i) = \frac{\Delta z}{I \rho_c c_c} \times \left[ \alpha_{out} (T_{out}^* - T_c) - \alpha_a (T_c - T_0) - c_0 \varepsilon_c \left( \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right) \right], \quad (3.28)$$

де коефіцієнти конвекційного теплообміну визначаються за формулами (3.8) і (3.27).

7. Обчислюємо температуру водної плівки у наступній точці:

$$T_c(z_{i+1}) = T_c(z_i) + \Delta T_c(z_i).$$

8. Якщо  $i < n$ , то покладаємо  $i = i+1$  та переходимо до кроку 5.

9. Якщо для кожної точки  $z_i$ ,  $0 \leq i \leq n$ , виконано умови:

$$T_{out}^*(z_i) \leq T_{out \max}; \quad (3.29)$$

$$T_c(z_i) \leq T_{c \max}, \quad (3.30)$$

то інтенсивність охолодження стінки є достатньою, небезпеки досягнення стінкою температури самоспалахування парів нафтопродуктів немає.

Суть алгоритму полягає в послідовному обчисленні усталеного значення температури стінки і приросту температури водної плівки в точках, розташованих вертикально на стінці резервуара з певним кроком  $\Delta z$ . Алгоритм починає роботу з точки на верхньому краї стінки резервуара і закінчує у точці на рівні нафтопродукту. В якості максимально припустимих значень температури стінки і водної плівки в (3.29), (3.30) доцільно обирати значення нижчі за температуру самоспалахування і кипіння води відповідно.

## 3.2. Побудова моделі охолодження покрівлі резервуара

### 3.2.1. Побудова рівняння теплового балансу для покрівлі резервуара

В розділі 2 було побудовано модель нагріву покрівлі резервуара, яка складається із рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \delta, \quad t > 0, \quad (3.31)$$

крайових умов на зовнішній і внутрішній поверхнях покрівлі. У випадку охолодження покрівлі резервуара водою крайова умова для зовнішньої поверхні покрівлі набуде вигляду

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = & -\frac{c_0 \varepsilon_f \varepsilon_w}{\lambda} \left[ \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{out}}{100} \right)^4 \right] \varphi + \frac{c_0 \varepsilon_w}{\lambda} \left[ \left( \frac{T_{out}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] (1 - \varphi) + \\ & + \frac{\alpha_{out}}{\lambda} (T_{out} - T_c), \end{aligned} \quad (3.32)$$

де  $T_c$  – температура водної плівки у даній точці покрівлі. Крайова умова для внутрішньої поверхні покрівлі залишається без змін:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta} = -\frac{c_0 \varepsilon_w}{\lambda} \left[ \left( \frac{T_{in}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] - \frac{\alpha_{in}}{\lambda} (T_{in} - T_0). \quad (3.33)$$

Коефіцієнт конвекційного теплообміну з пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара  $\alpha_{in}$  визначається виразом (3.7). На зовнішній поверхні покрівлі резервуара має місце вимушений конвекційний теплообмін з водною плівкою, тому коефіцієнт конвекційного теплообміну  $\alpha_{out}$  буде описується формулою, аналогічною (2.52):

$$\alpha_{out} = 0,0364 \frac{\lambda_f}{L^{0,2}} \left( \frac{w}{v} \right)^{0,8} Pr^{0,4} \left( \frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,11}. \quad (3.34)$$

де  $\lambda_f$  – коефіцієнт теплопровідності води;  $w$  – швидкість руху води;  $v$ ,  $Pr$  – кінематична в'язкість і число Прандтля води;  $\mu_f$ ,  $\mu_w$  – динамічна в'язкість води при температурі плівки і покрівлі відповідно;  $L$  – характерний розмір. Враховуючи конічну форму покрівлі і те, що, стікаючи від центру покрівлі до її краю, вода проходить шлях близько половини діаметру резервуара, можна покласти

$$L = \frac{D}{2}.$$

Тоді (3.34) набуде вигляду

$$\alpha_{\text{out}} = 0,0418 \frac{\lambda_f}{D^{0,2}} \left( \frac{w}{v} \right)^{0,8} \text{Pr}^{0,4} \left( \frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,11}. \quad (3.35)$$

### 3.2.2. Оцінка коефіцієнта конвекційного теплообміну покрівлі з водною плівкою

У формулі (3.35) величини  $\lambda_f$ ,  $\mu_f$ ,  $v$ ,  $\text{Pr}$  залежать від температури води, а  $\mu_w$  – від температури покрівлі. З урахуванням цього коефіцієнт конвекційного теплообміну (3.35) може бути представлений у вигляді

$$\alpha_{\text{out}} = D^{-0,2} w^{0,8} f(T_c) g(T_w), \quad (3.36)$$

де

$$f(T_c) = 0,0418 \lambda_f v^{-0,8} \text{Pr}^{0,4} \mu^{0,11}; \quad (3.37)$$

$$g(T_w) = \mu^{-0,11}. \quad (3.38)$$

При цьому множники в (3.37) залежать від температури води, а (3.38) – від температури покрівлі резервуара. На рис. 3.4 наведено залежність (3.37) та її лінійну апроксимацію у вигляді

$$\tilde{f}(T_c) = 11,379 T_c + 1368,5, \quad (3.39)$$

де температура  $T_c$  має бути подана в градусах Цельсія.

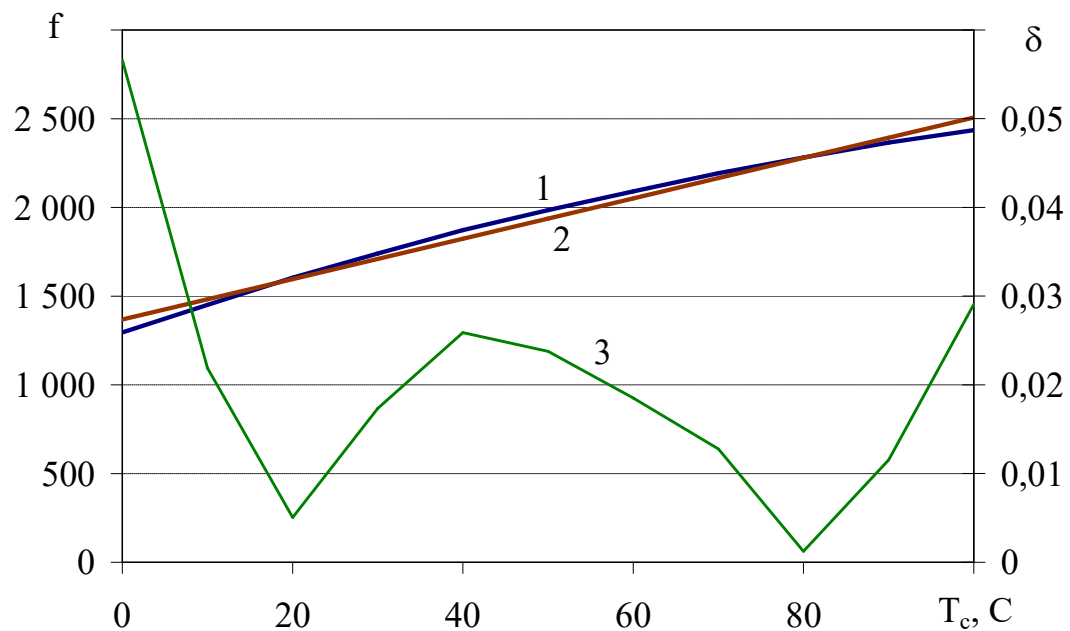


Рис. 3.4. Залежність від температури води: 1 –  $f(T_c)$  (3.37); 2 – лінійна апроксимація (3.39); 3 – відносна похибка апроксимації (по правій вісі)

Аналіз графічних залежностей на рис. 3.4 свідчить, що відносна похибка апроксимації (3.39) в діапазоні температур  $T_c=(0\div 100)$  °C не перевищує 6%.

На рис. 3.5 проілюстровано залежність (3.38) та її лінійну апроксимації у вигляді

$$\tilde{g}(T_w) = 0,0044T_w + 2,0423, \quad (3.40)$$

де температура покрівлі  $T_w$  має бути подана у градусах Цельсія.

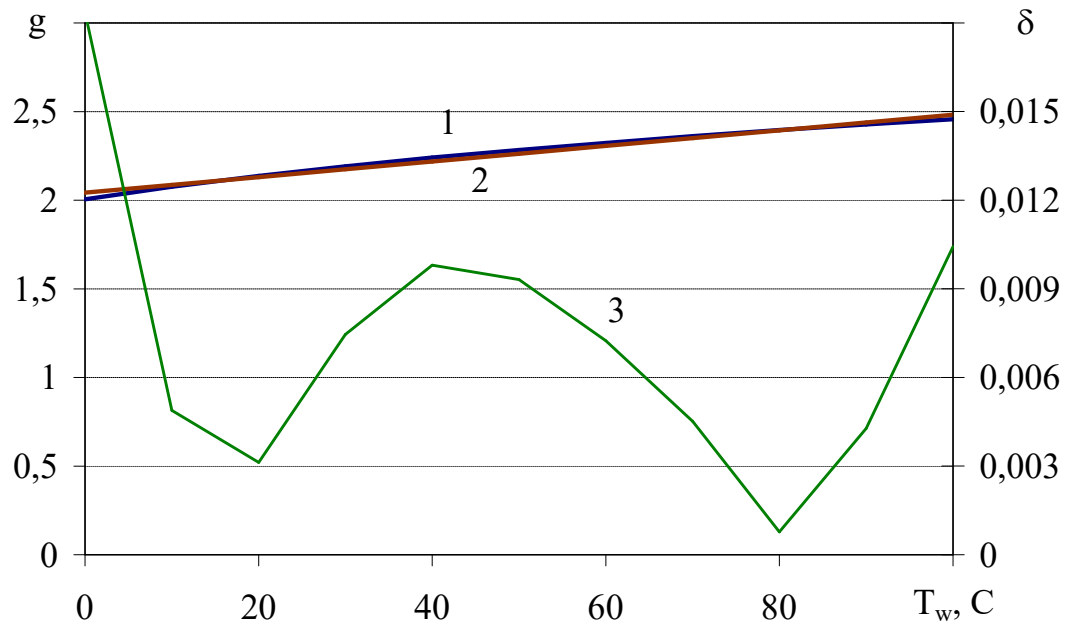


Рис. 3.5. Залежність від температури поверхні покрівлі: 1 –  $g(T_w)$ ; 2 – лінійна апроксимація (3.40); 3 – відносна похибка апроксимації (по правій вісі)

Аналіз графічних залежностей, наведених на рис. 3.5, свідчить, що відносна похибка апроксимації (3.40) в діапазоні температур  $T_c=(0\div 100)$  °C не перевищує 2%. Підстановка апроксимацій (3.39) і (3.40) в (3.36) дає

$$\alpha_{out} = D^{-0,2} w^{0,8} (11,379 T_c + 1368,5) (0,0044 T_w + 2,0423). \quad (3.41)$$

В якості приклада на рис. 3.6 наведено залежність коефіцієнта конвекційного теплообміну від температури водної плівки і температури покрівлі резервуара РВС-10000 (діаметром  $D=28,5$  м) при швидкості стікання води  $w=1$  м/с.



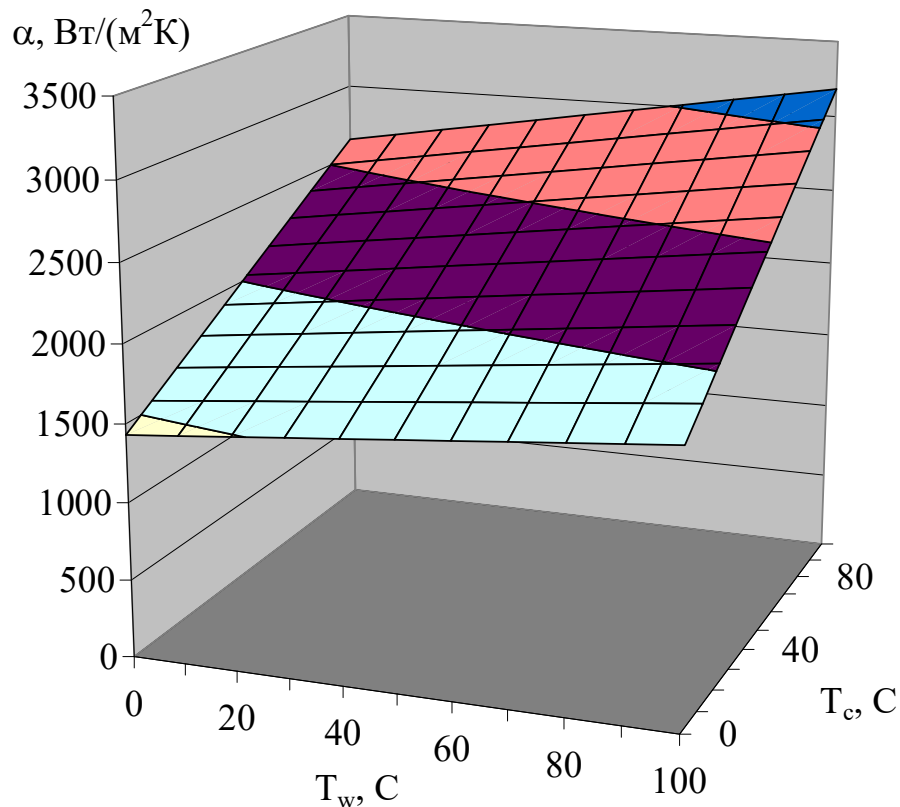


Рис. 3.6. Залежність коефіцієнта конвекційного теплообміну в залежності від температури води  $T_c$  і температури покрівлі  $T_w$

Із аналізу графічної залежності, наведеної на рис. 3.6, виливає, що коефіцієнт конвекційного теплообміну знаходиться в діапазоні  $(1,4 \div 3,2)$  кВт/(м<sup>2</sup>·К). При цьому значення коефіцієнта конвекційного теплообміну зростає зі збільшенням температури води і температури покрівлі резервуара.

### 3.2.3. Швидкість стікання води по покрівлі резервуара

Конічна форма покрівлі резервуара (кут нахилу  $\theta=11^\circ$ ) обумовлює стікання по ній води під дією сили тяжіння. Для визначення швидкості стікання води скористаємося моделлю розтікання рідини на похилій поверхні [84]

$$\frac{\partial h}{\partial t} = R \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left[ h^3 \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ h^3 \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right] - \gamma \frac{\partial}{\partial x} h^3 \right], \quad (3.42)$$

де  $h(x, y, t)$  – товщина шару води у точці  $(x, y)$  в момент часу  $t$ ;  $R$  – ефективний коефіцієнт дифузії:

$$R = \frac{\rho g}{3\mu} \cos \theta = \frac{g}{3\nu} \cos \theta; \quad (3.43)$$

$\gamma = \operatorname{tg} \theta$ ;  $\theta$  – кут нахилу поверхні; напрямок нахилу поверхні співпадає з віссю (рис. 3.7);  $\mu, \nu$  – динамічна і кінематична в'язкість води відповідно;  $\rho$  – густина води;  $g$  – прискорення сили тяжіння. Врахування неперервної подачі води на покрівлю проводиться введенням доданку в (3.42), що відповідає джерелу води

$$\frac{\partial h}{\partial t} = R \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left[ h^3 \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ h^3 \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right] - \gamma \frac{\partial}{\partial x} h^3 \right] + v \delta(x) \delta(y), \quad (3.44)$$

де  $\delta(x), \delta(y)$  –  $\delta$ -функція Дірака;  $v$  – об'ємна швидкість подачі води ( $\text{м}^3/\text{с}$ ).

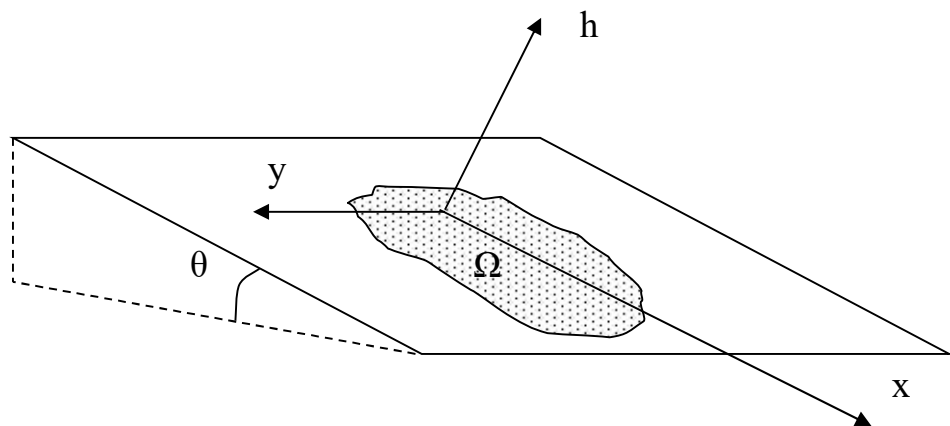


Рис. 3.7. Стікання рідини по похилій поверхні

Розв'язання рівняння (3.44) з початковою умовою

$$h(x, y, 0) = 0 \quad (3.45)$$

дозволяє знайти товщину шару води в довільній точці  $(x, y)$  в момент часу  $t$ . Розв'язання рівняння (3.44)-(3.45) проводилося з використанням методу скінчених різниць. На рис. 3.8 проілюстровано форму, яку має потік води, що стікає з похилої поверхні з кутом нахилу  $\theta=11^\circ$  при об'ємній швидкості витікання  $v=0,25$  л/с. Аналіз зображення свідчить, що приблизно через 1-2 м від точки витікання потік досягає сталої ширини.

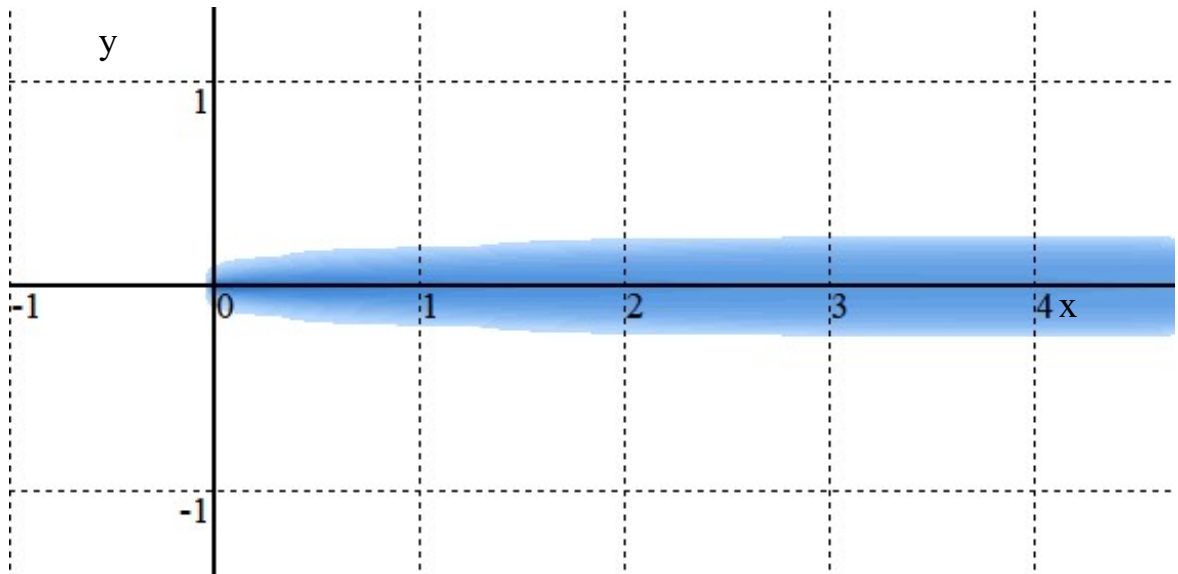


Рис. 3.8. Форма потоку води при стіканні по похилій поверхні

Для визначення швидкості  $w$ , м/с, і інтенсивності  $I$ , л/(м·с), стікання води обчислювалася площа поперечного перерізу  $S$  перпендикулярно осі  $Ox$  в точці, де ширина потоку досягала сталого значення. Значення швидкості і інтенсивності стікання води в залежності від її об'ємної швидкості подачі наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Швидкість і інтенсивність стікання води по похилій поверхні

Об'ємна швидкість подачі води, $v$ , л/с	Інтенсивність стікання води, $I$ , л/(м·с)	Швидкість стікання води, $w$ , м/с
0,1	0,154	0,362
0,25	0,333	0,594
0,5	0,588	0,818
0,75	0,882	1,081
1,0	1,176	1,248
1,25	1,316	1,334
1,5	1,579	1,537

Залежність швидкості стікання води від інтенсивності може бути апроксимована степеневою залежністю

$$w = 1,1457I^{0,612} . \quad (3.46)$$

На рис. 3.9 наведено залежність швидкості стікання води від інтенсивності.

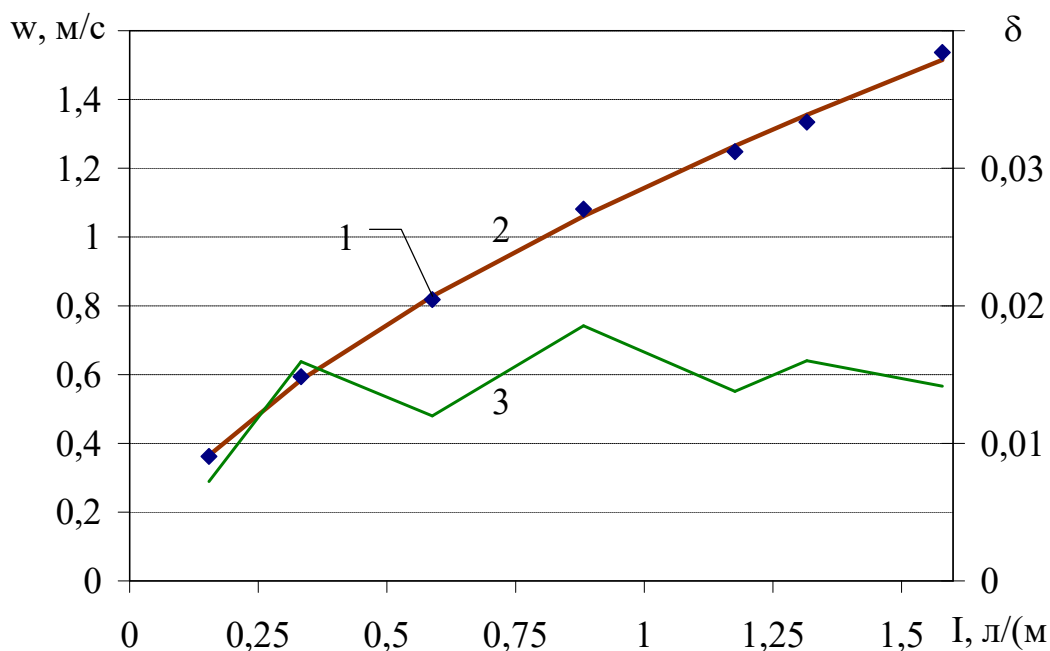


Рис. 3.9. Залежність швидкості стікання води від інтенсивності: 1 – результати розрахунків за моделлю (3.44)-(3.45); 2 – апроксимація (3.46); 3 – відносна похибка апроксимація (по правій вісі)

Аналіз графічних залежностей на рис. 3.9 свідчить, що відносна похибка апроксимації (3.46) не перевищує 2%. Тоді підстановка (3.46) в (3.41) дає

$$\alpha_{\text{out}} = D^{-0,2} I^{0,49} (12,69T_c + 1526)(0,0044T_w + 2,0423). \quad (3.47)$$

Отже коефіцієнт конвекційного теплообміну є приблизно пропорційним квадратному кореню із інтенсивності подачі води на охолодження покрівлі. При цьому інтенсивність подачі води  $I$  у формулі (3.47) має бути заданим у л/(м·с).

### 3.2.4. Побудова моделі нагріву водної плівки, що стікає по покрівлі резервуара

Рівняння теплового балансу для водної плівки, що стікає по покрівлі резервуара буде мати вигляд, аналогічний (3.21)

$$\frac{dT_c}{d\lambda} = \frac{1}{I\rho_c c_c} \times \left[ \alpha_{\text{out}}(T_{\text{out}}^* - T_c) - \alpha_a(T_c - T_0) - c_0 \varepsilon_c \left( \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right) \right], \quad (3.48)$$

де вісь  $\ell$  направлена в напрямку стікання води від вершини конуса, що утворює покрівлю. При цьому коефіцієнт конвекційного теплообміну водної плівки  $\alpha_a$  має вигляд, аналогічний (3.23):

$$\alpha_a = 0,036\lambda_a \left( \frac{W}{v_a} \right)^{0,8} (D/2)^{-0,2} \text{Pr}^{0,4}, \quad (3.49)$$

де  $\lambda_a$ ,  $\nu_a$ ,  $Pr$  – коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт динамічної в'язкості і число Прандтля води. В (3.49), на відміну від (3.23), характерним розміром є відстань, яку проходить вода, стікаючи по покрівлі – близько половини діаметра резервуара. Підстановка (3.46) в (3.49) дає

$$\alpha_a = 0,046\lambda_a \nu_a^{-0,8} I^{0,49} D^{-0,2} Pr^{0,4}. \quad (3.50)$$

Враховуючи, що залежність

$$f_a(T) = \lambda_a \nu_a^{0,8} Pr^{0,4}$$

може бути апроксимована виразом (3.26),

$$\alpha_a = I^{0,49} D^{-0,2} (2,88 - 0,0065T),$$

де температура навколишнього повітря  $T$  має бути задана в градусах Цельсія, а інтенсивність подачі води – в л/(м·с).

Сумісне розв'язання рівнянь (3.31) і (3.48) за алгоритмом, наведеним в п. 3.1.3, дозволяє визначити розподіл температур по покрівлі резервуара і водній плівці.

### **3.3. Результати застосування моделей охолоджувальної дії водної плівки, що стікає по стінці і покрівлі резервуара**

В якості прикладу розглянемо пожежу в резервуарі РВС-10000 з сирою нафтою в умовах відсутності вітру. На нормативній відстані від нього (21 м) заходиться інший резервуара, заповнений нафтопродуктом до рівня 9 м. Отже,

висота стінки над рівнем нафтопродукту буде складати  $L = 9$  м. На рис. 3.10 наведено розподіл температури по висоті стінки резервуара, в тій її частині, що обернена в бік пожежі і знаходиться вище рівня нафтопродукту. Початкову температуру води, що подається на охолодження прийнято рівною  $T_0 = 20$  °С.

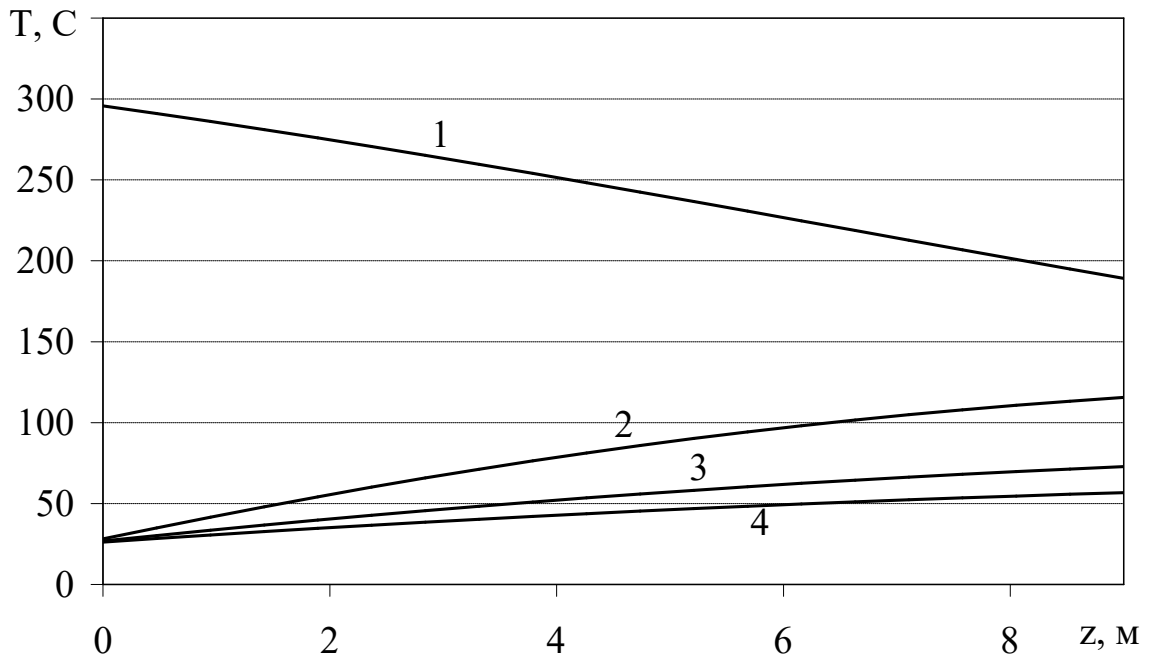


Рис. 3.10. Розподіл температур по стінці резервуара РВС-10000 через 20 хв. після початку горіння нафти в аналогічному сусідньому резервуарі при різних значеннях інтенсивності подачі води на охолодження: 1 –  $I = 0$ ; 2 –  $I = 0,2$  л/(м·с); 3 –  $I = 0,4$  л/(м·с); 4 –  $I = 0,6$  л/(м·с)

Із аналізу графічних залежностей, наведених на рис. 3.10, випливає, що найбільший охолоджуючий ефект має місце для верхнього краю стінки, на який потрапляє вода, температура якої дорівнює температурі навколишнього середовища. Стікаючи вниз по стінці, вода нагрівається (рис. 3.11), внаслідок чого її охолоджувальний ефект зменшується.

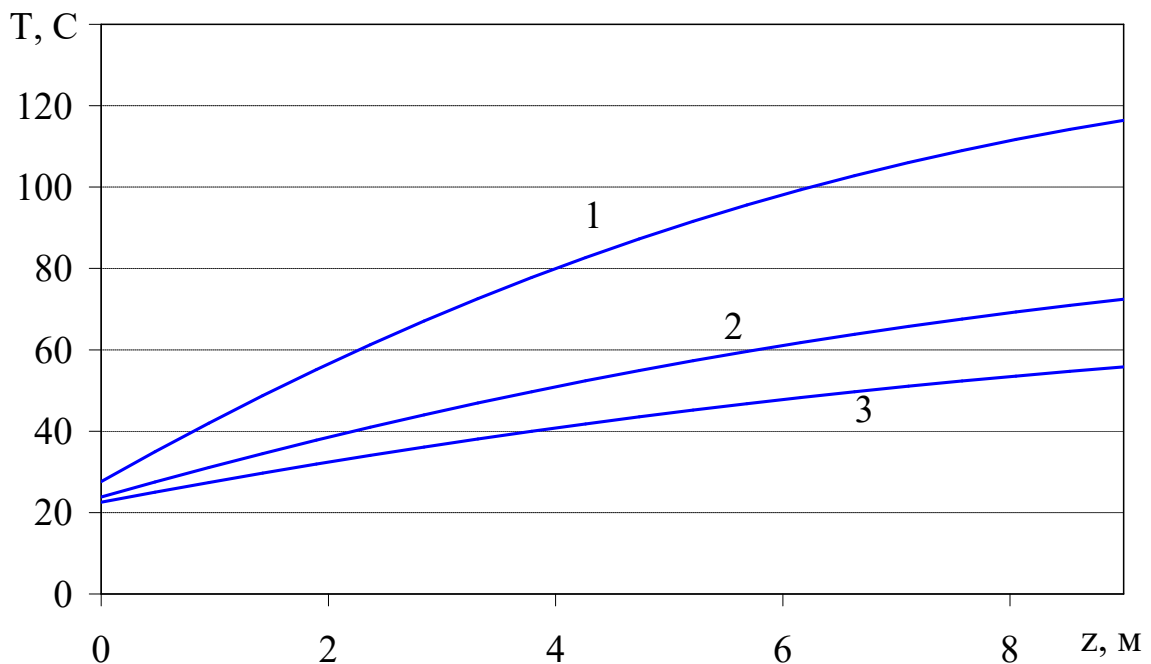


Рис. 3.11. Розподіл температур по водній плівці, що стікає по стінці резервуара РВС-10000, через 20 хв. після початку горіння нафти в аналогічному сусідньому резервуарі при різних значеннях інтенсивності подачі води на охолодження: 1 –  $I = 0,2$  л/(м·с); 2 –  $I = 0,4$  л/(м·с); 3 –  $I = 0,6$  л/(м·с)

Із рис. 3.11 випливає, що при інтенсивності подачі води на охолодження  $I = 0,2$  л/(м·с) вода на стінці досягає температури кипіння на відстані  $z_c \approx 6,2$  м від верхнього краю резервуара. Кипіння призводить до відштовхування водної плівки від поверхні стінки резервуара. Внаслідок цього ефективність охолодження різко зменшується. Це означає, що нижня частина стінки резервуара отримує охолодження і її температура може сягати значень, як і при відсутності охолодження –  $T_{out} = (190 \div 225)$  °С (лінія 1 на рис. 3.10). Отже інтенсивність подачі води  $I = 0,2$  л/(м·с) є недостатньою для охолодження резервуара.

При інтенсивності подачі води  $I = 0,4$  л/(м·с) або  $I = 0,6$  л/(м·с) такої проблеми не спостерігається – водна плівка не досягає температури кипіння води (лінії 2, 3 на рис. 3.11). Отже, в цих випадках охолодження є достатнім.

Порівняння температури стінки (рис. 3.10) з температурою водної плівки на ній (рис. 3.11) показує близькість цих значень. На рис. 3.12 проілюстровано



різницю між температурою на поверхні стінки і температурою водної плівки:

$$\Delta T_c = T_{\text{out}} - T_c.$$

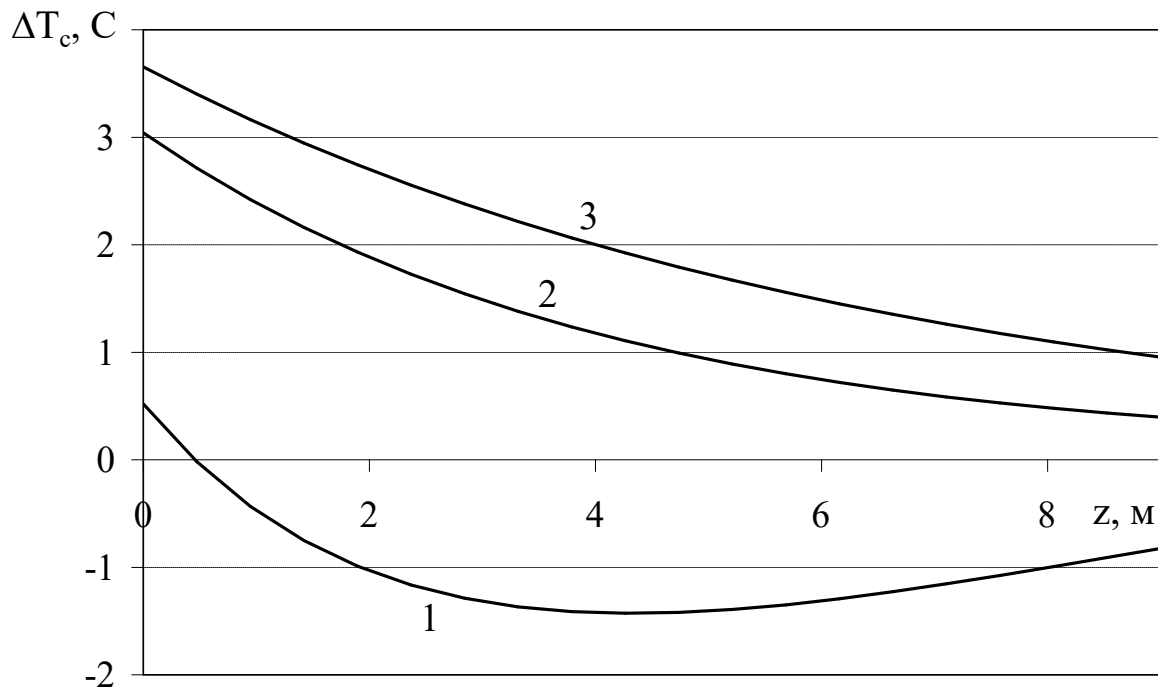


Рис. 3.12. Розподіл різниці температур  $\Delta T_c$  по стінці резервуара РВС-10000, через 20 хв. після початку горіння нафти в аналогічному сусідньому резервуарі при різних значеннях інтенсивності подачі води на охолодження: 1 –  $I = 0,2$  л/(м·с); 2 –  $I = 0,4$  л/(м·с); 3 –  $I = 0,6$  л/(м·с)

Аналіз графічних залежностей на рис. 3.12 свідчить, що різниця між значеннями температури поверхні стінки і водної плівки складає кілька градусів. Це означає, що при використанні алгоритму розрахунку, наведеного в попередньому підрозділі, достатньо контролювати лише виконання умови (3.30), тобто, що водна плівка на стінці не починає скипати. Це є можливим внаслідок того, що температура самоспалахування нафти і нафтопродуктів істотно перевищує температуру кипіння води.

На рис. 3.13 наведено розподіл температури по покрівлі резервуара вздовж вісі  $\ell$ , яка починається у вершині конуса покрівлі і направлена вздовж покрівлі до резервуара, що горить.

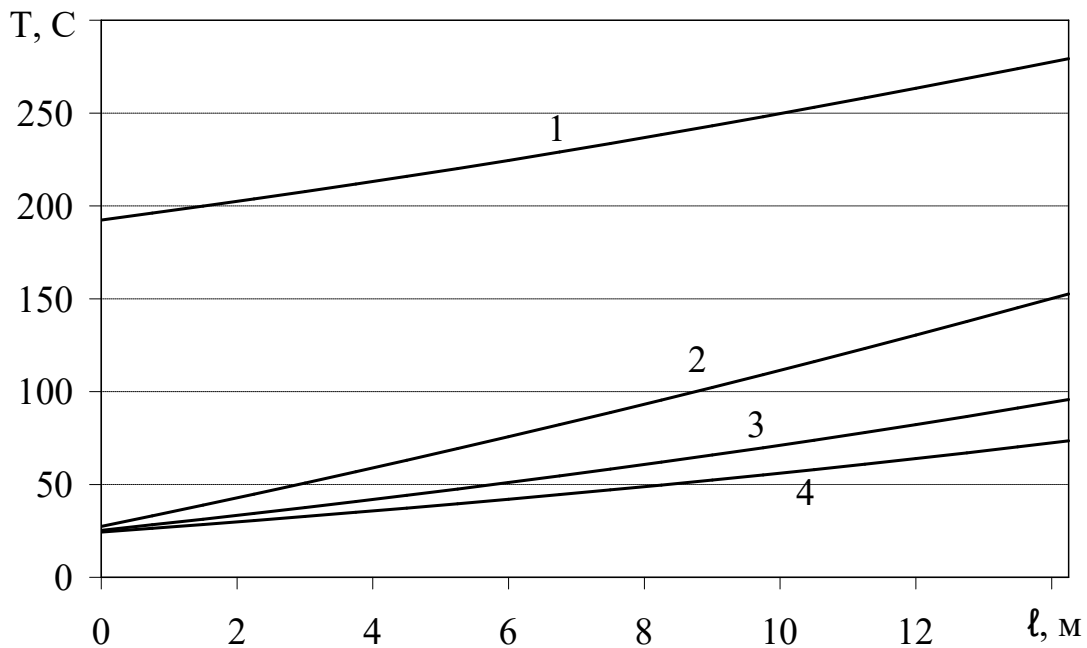


Рис. 3.13. Розподіл температур по покрівлі резервуара РВС-10000 через 20 хв. після початку горіння нафти в аналогічному сусідньому резервуарі при різних значеннях інтенсивності подачі води на охолодження: 1 –  $I = 0$ ; 2 –  $I = 0,2$  л/(м·с); 3 –  $I = 0,4$  л/(м·с); 4 –  $I = 0,6$  л/(м·с)

Із аналізу графічних залежностей на рис. 3.13 випливає, що при відсутності охолодження край покрівлі, обернений в бік пожежі, нагрівається приблизно так само, як і верхній стінки резервуара – до температури  $279$  °С. Тому покрівля також потребує охолодження. За умови подачі води на охолодження з інтенсивністю  $0,2$  л/(м·с) верхній край покрівлі нагрівається лише до  $150$  °С. Але розрахунок показує, що в цьому випадку температура води мала б істотно перевищити температуру кипіння (рис. 3.14). Наявність кипіння може відштовхувати воду вбік, внаслідок цього певні ділянки покрівлі можуть залишитися без охолодження. Отже, така інтенсивність подачі води на охолодження покрівлі ї недостатньою.

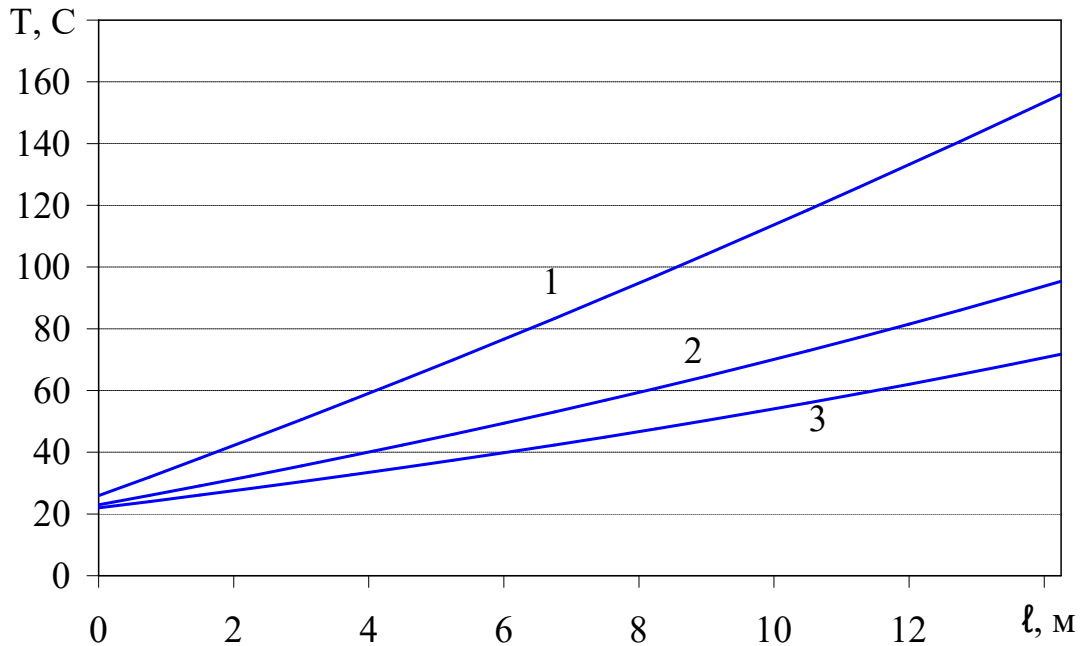


Рис. 3.14. Розподіл температур по водній плівці, що стікає по покрівлі резервуара РВС-10000, через 20 хв. після початку горіння нафти в аналогічному сусідньому резервуарі при різних значеннях інтенсивності подачі води на охолодження: 1 –  $I = 0,2$  л/(м·с); 2 –  $I = 0,4$  л/(м·с); 3 –  $I = 0,6$  л/(м·с)

При інтенсивності подачі води  $0,4$  л/(м·с) та  $0,6$  л/(м·с) стікаюча по покрівлі вода не досягає температури кипіння (рис. 3.14). Температура покрівлі при цьому також не перевищує  $100$  °С. Отже така інтенсивність подачі води є достатньою для охолодження покрівлі до безпечних значень температури.

Збільшення інтенсивності подачі води призводить до зменшення температури стінки і збільшенню різниці між температурою поверхні стінки і рідини. Останнє відбувається внаслідок того, що збільшення подачі води призводить до збільшення швидкості стікання водної плівки (формула (3.24)) і збільшенню її товщини [65]:

$$\delta_c \cong 0,055I^{0,6}.$$

Для тих самих умов, що і на рис. 3.10 (горіння резервуара РВС-10000 з нафтою, без вітру), на рис. 3.15 показано розподіл температур по поверхні

стілки резервуара через 20 хв. після початку пожежі. При цьому напрямку на резервуар, що горить, відповідає кут  $\alpha = 180^\circ$ .

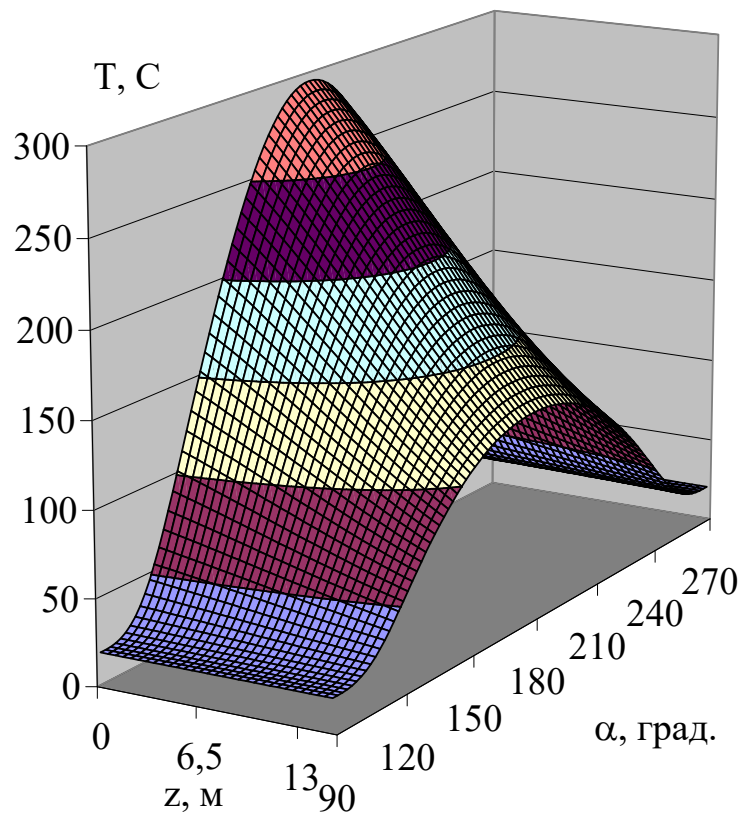


Рис. 3.15. Розподіл температур по стінці резервуара РВС-10000 за умови пожежі в аналогічному сусідньому резервуарі і відсутності вітру

На рис. 3.16 проілюстровано вплив охолодження на температуру поверхні стінки резервуара при подачі води з інтенсивністю  $I = 0,4$  л/(м·с).

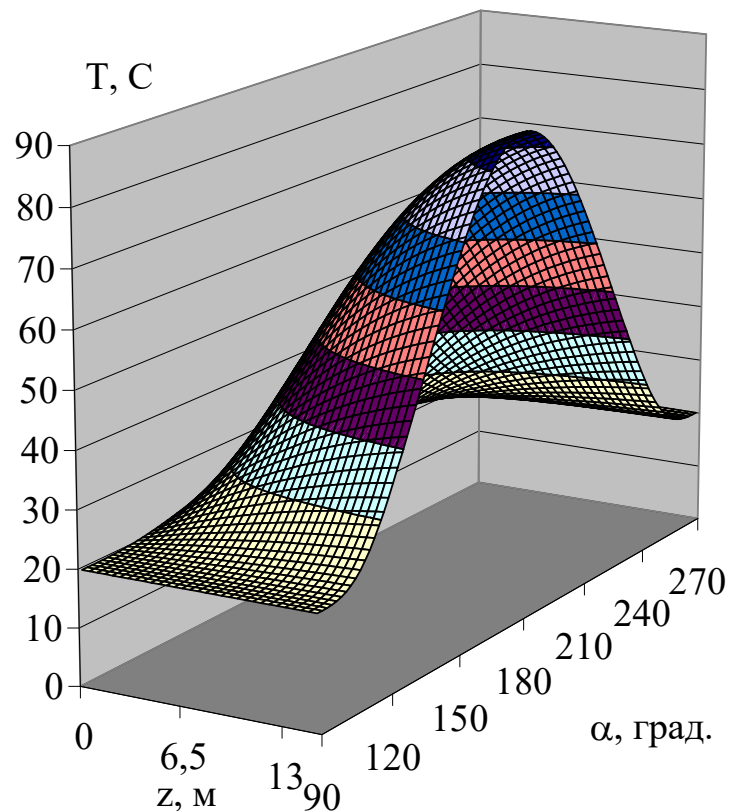


Рис. 3.16. Розподіл температур по стінці резервуара РВС-10000 за умови пожежі в аналогічному сусідньому резервуарі і відсутності вітру при інтенсивності подачі води на охолодження  $I = 0,4 \text{ л}/(\text{м}\cdot\text{с})$

Аналіз розподілу температури на рис. 3.16 свідчить, що температура стінки не перевищує  $85 \text{ }^\circ\text{C}$ . При цьому максимальна температура досягається в нижній частині резервуара. Це відбувається внаслідок того, що нижньої частини стінки резервуара досягає вода, яка вже отримала тепло у верхній частині стінки резервуара.

На рис. 3.17 і 3.18 показано розподіл температури по покрівлі резервуара без охолодження і при охолодженні водою з інтенсивністю подачі  $0,4 \text{ л}/(\text{м}\cdot\text{с})$ . Найбільші значення температур досягаються в напрямку резервуара, що горить ( $\alpha = 180^\circ$ ). Відзначимо, що під тепловим впливом пожежі нагрівається лише половина стінки резервуара, обернена в бік пожежі ( $90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$ , рис. 3.15). На відміну від неї покрівля нагрівається в ширшому кутовому діапазоні (рис. 3.17).

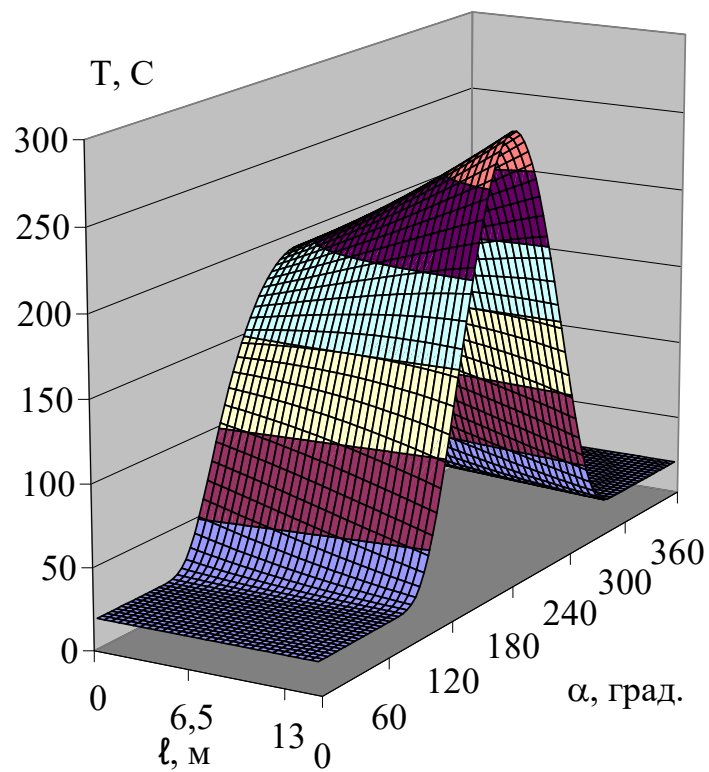


Рис. 3.17. Розподіл температур по покрівлі резервуара РВС-10000 за умови пожежі в аналогічному сусідньому резервуарі і відсутності вітру

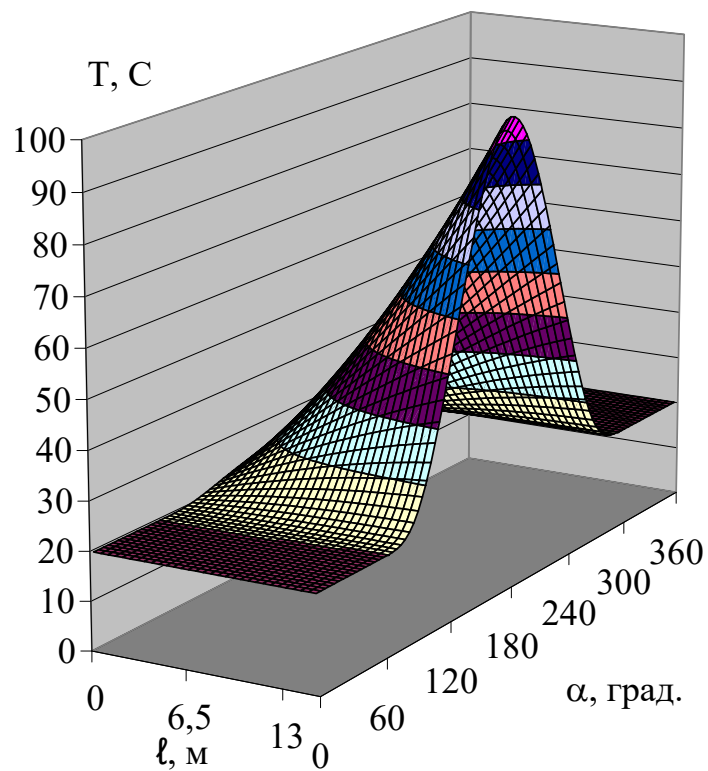


Рис. 3.18. Розподіл температур по покрівлі резервуара РВС-10000 за умови пожежі в аналогічному сусідньому резервуарі і відсутності вітру при інтенсивності подачі води на охолодження  $I = 0,4 \text{ л}/(\text{м} \cdot \text{с})$

Аналіз розподілу температури на рис. 3.18 свідчить, що температура не перевищує 96 °С. При цьому максимальна температура досягається на краю покрівлі в напрямку на резервуар, що горить.

### 3.4. Експериментальна перевірка моделі охолодження резервуара

В ході експерименту досліджувалося горіння дизельного палива (температура полум'я  $T_f = 1400$  К, ступінь чорноти  $\epsilon_f = 0,85$ ) об'ємом 5 л, налитого в піддон розміром  $1,0 \times 1,5$  м<sup>2</sup> (рис. 3.19, рис. 3.20). Під тепловим впливом полум'я відбувався нагрів сталевого листа ( $\rho = 7860$  кг/м<sup>3</sup>,  $c = 466$  Дж/(кг·К),  $\delta_w = 1$  мм,  $\epsilon_w = 0,8$ ), який моделював собою стінку резервуара. Температура сталевого листа фіксувалася за допомогою чотирьох термопар, закріплених висотах  $h_1 = 0,2$  м,  $h_2 = 0,4$  м,  $h_3 = 0,6$  м,  $h_4 = 0,6$  м.

На першому етапі досліджувався нагрів сталевого листа під тепловим впливом пожежі. На рис. 3.21 наведено динаміку зміни температури термопар. Розрахунковим шляхом було підібрано таку відстань між резервуарами ( $L = 48$  м), щоб динаміка зміни температури в точці, що нагрівається найбільше, якомога менше відрзнялася від середнього експериментального значення, отриманого шляхом усереднення температур на термопарах в однаковий момент часу (рис. 3.22):

$$\bar{T}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i(t),$$

де  $n = 4$  – кількість термопар;  $T_i$  – покази термопари  $T_i$ .

Це означає, що щільність теплового потоку, який припадає на сталевий лист в експерименті, приблизно дорівнює щільності теплового потоку, що моделюється.

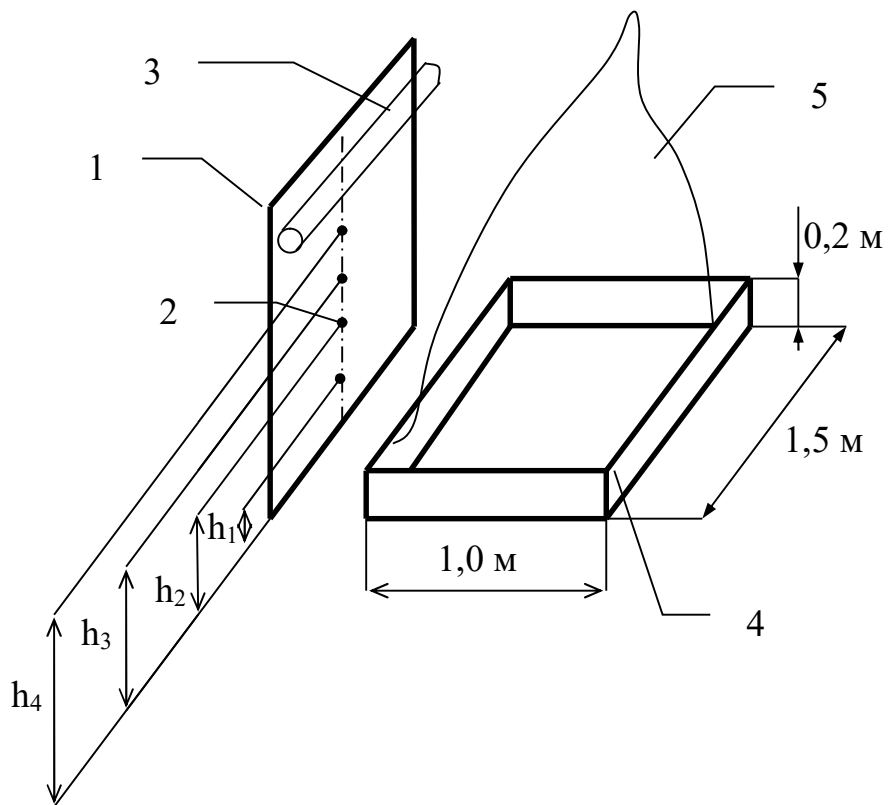


Рис. 3.19. Схема експерименту: 1 – сталевий лист; 2 – термопари; 3 – зрошувальна труба; 4 – піддон з горючою рідиною; 5 – полум'я





Рис. 3.20. Експериментальне визначення теплового впливу пожежі горючої рідини на модель стінки резервуара

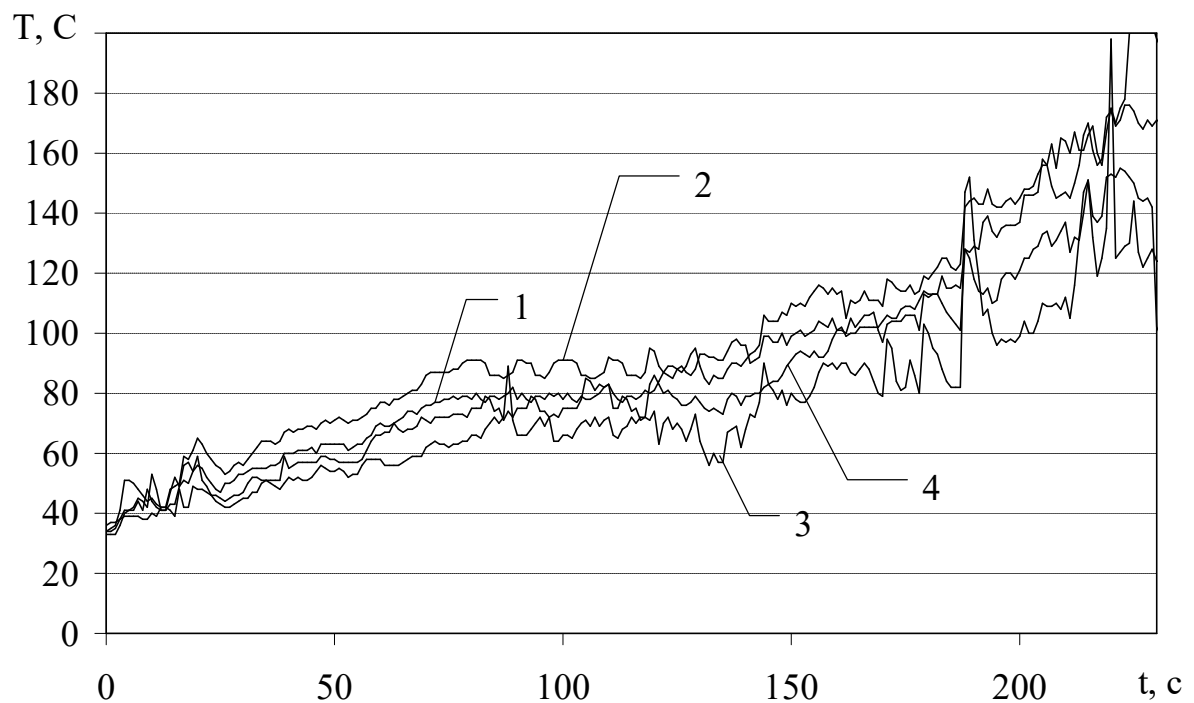


Рис. 3.21. Динаміка зміни температури сталевого листа: 1, 2, 3, 4 – термопари, розташовані на висотах  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ ,  $h_4$  відповідно

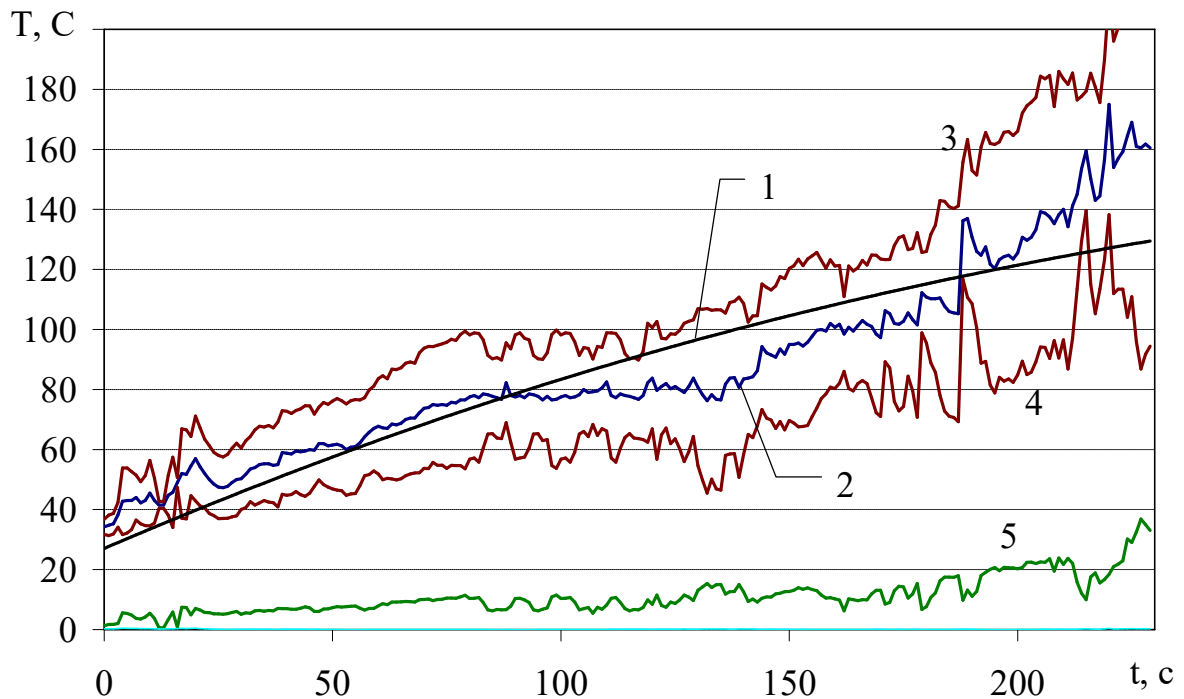


Рис. 3.22. Динаміка зміни температури сталевих листів при його нагріванні: 1 – розрахунок; 2 – середнє значення, отримане експериментально; 3, 4 – межі інтервалу  $\pm 2\sigma$ ; 5 – середньоквадратичне відхилення

Аналіз залежностей, наведених на рис. 3.22, свідчить, що результати розрахунків (лінія 1) лежить всередині інтервалу  $\pm 2\sigma$  (лінії 3 і 4), де  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення, отримане з вимірювань температури термопарами:

$$\sigma^2(t) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i(t) - \bar{T}(t))^2.$$

Відзначимо, що інтервал  $\pm 2\sigma$  відповідає довірчій ймовірності 0,95.

На другому етапі проводилося охолодження сталевих листів шляхом утворення водної плівки за допомогою зрошувальної труби, закріпленої на верхній частині листа (рис. 3.19). Інтенсивність подачі води складала  $I = 0,05$  л/(м·с). На рис. 3.23 наведено зміну температури сталевих листів, зафіксованого термопарами, і розрахункове значення, отримане з моделі за умови охолодження стінки з даною інтенсивністю.

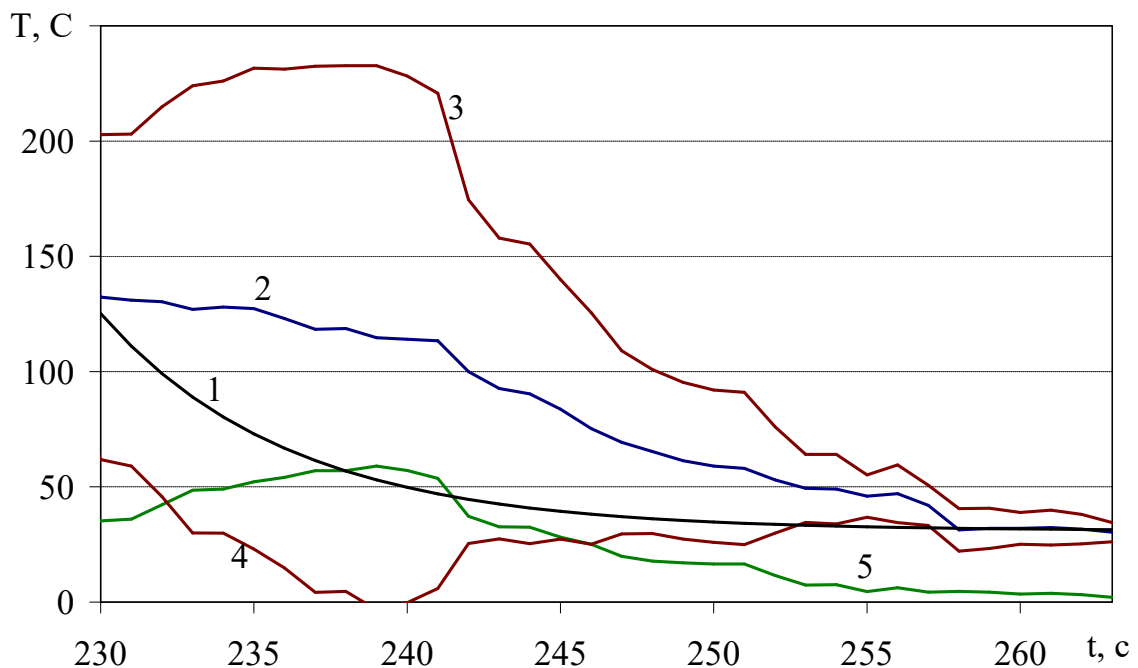


Рис. 3.23. Динаміка зміни температури сталевого листа при його охолодженні: 1 — розрахунок; 2 — середнє значення, отримане експериментально; 3, 4 — межі інтервалу  $\pm 2\sigma$ ; 5 — середньоквадратичне відхилення

Із аналізу залежностей на рис. 3.23 випливає, що і в цьому випадку розраховані значення температури лежать в межах інтервалу, що відповідає довірчій ймовірності 0,95.

Отже результати експериментальної перевірки моделей нагріву і охолодження стінки резервуара свідчать про їх адекватність.

### Висновки до розділу III

1. Побудовано рівняння теплового балансу для стінки резервуара з нафтопродуктом при охолодженні її водою в умовах пожежі в сусідньому резервуарі. Рівняння враховує променевий теплообмін стінки з факелом, навколишнім середовищем і внутрішнім простором резервуара; конвекційний теплообмін з водною плівкою і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара. Показано, що стікаюча по стінці вода є основним чинником її

охолодження. При інтенсивності подачі води  $0,5 \div 2,0$  л/(м·с) коефіцієнт конвекційного теплообміну між стінкою і водною плівкою складає  $3,7 \div 5,2$  кВт/(м<sup>2</sup>·К), що на 3 порядки перевищує коефіцієнт теплообміну з пароповітряною сумішшю або навколишнім повітрям.

2. Побудовано оцінку швидкості стікання води по покрівлі резервуара. Показано, що коефіцієнт конвекційного теплообміну між водою і покрівлею знаходиться в діапазоні  $(1,4 \div 3,2)$  кВт/(м<sup>2</sup>·К). Показано, що значення коефіцієнта конвекційного теплообміну зростає зі збільшенням температури води і температури покрівлі резервуара. Побудовано модель охолодження покрівлі вертикального сталевго резервуара водою в умовах пожежі. Модель враховує променевий і конвекційний теплообмін між покрівлею, водною плівкою, факелом, навколишнім середовищем і внутрішнім простором резервуара.

3. Побудовано алгоритм визначення розподілу температур в стінці або покрівлі резервуара і водній плівці, що стікає по ній. Алгоритм спирається на рівняння теплового балансу стінки резервуара (або покрівлі) і модель нагріву водної плівки. Для розв'язання рівняння теплового балансу використовується метод скінчених різниць. Суть алгоритму полягає в послідовному обчисленні усталеного значення температури стінки (або покрівлі) і приросту температури водної плівки в точках, розташованих вздовж вертикалі на стінці резервуара з певним кроком.

4. Проведено експериментальну перевірку моделі нагріву і охолодження сталевго стінки в умовах пожежі за допомогою зменшеної моделі з горінням дизельного палива в піддоні  $1,0 \times 1,5$  м<sup>2</sup>. З'ясовано, що як під час нагрівання, так і під час охолодження розраховані значення температури стінки потрапляють в довірчій інтервал, що відповідає довірчій ймовірності 0,95.

## РОЗДІЛ IV

### РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПОЖЕЖІ В РЕЗЕРВУАРІ З НАФТОПРОДУКТОМ

Розглянуто варіанти впровадження отриманих результатів щодо охолодження резервуарів з нафтопродуктами в умовах теплового впливу пожежі в сусідньому резервуарі: визначено інтенсивність подачі води на охолодження стінок і покрівлі вертикального сталевого резервуара в залежності від напрямку і швидкості вітру, а також від виду рідини, що горить. Сформульовано і розв'язано задачу оптимального вибору сил та засобів для охолодження сусідніх резервуарів при пожежі в резервуарній групі. Обґрунтовано використання пожежного гідромонітора для охолодження резервуарів в умовах пожежі.

Матеріали розділу викладено в роботах автора [85, 86, 87].

#### **4.1. Вибір оптимальної інтенсивності подачі води для охолодження резервуара**

##### **4.1.1. Постановка задачі оптимального вибору інтенсивності подачі води на охолодження резервуара**

Під оптимальною інтенсивністю подачі води будемо розуміти таку інтенсивність її подачі, яка, з одного боку, забезпечує мінімум витрат води:

$$I \rightarrow \min ,$$

а з іншого, забезпечує виконання наступних умов:

- температура стінки має не перевищувати гранично допустимого значення  $T_{out \max}$

$$T_{\text{out}}^*(z_i) \leq T_{\text{out max}} ; \quad (4.1)$$

- температура водної плівки має не перевищувати гранично допустимого значення  $T_{c \text{ max}}$

$$T_c(z_i) \leq T_{c \text{ max}} . \quad (4.2)$$

Оптимальна інтенсивність подачі води буде визначатися виконанням умов (4.1) і (4.2), які в свою чергу залежать від низки факторів:

- виду рідини, що горить;
- напрямку і швидкості вітру;
- рівня нафтопродукту в резервуарі, що нагрівається.

Рівень нафтопродукту в резервуарі, що нагрівається, впливає на висоту стінки над рівнем нафтопродукту. Саме ця частина стінки потребує охолодження. Найскладнішим випадком з точки зору охолодження є низький півень нафтопродукту, оскільки тоді необхідно забезпечити виконання умов (4.1), (4.2) по всій висоті стінки резервуара. Із табл. 1.1 випливає, що вертикальні сталеві резервуари об'ємом 1000 м<sup>3</sup> (РВС-1000) і більше мають висоту 12 м або 18 м.

Вид рідини, що горить визначає довжину полум'я, температуру випромінюючої поверхні факела і ступінь її чорноти. Нахил факелу вітром змінює коефіцієнт взаємного опромінення між факелом і сусіднім резервуаром, тим самим впливаючи на щільність теплового потоку від пожежі. Найбільшого охолодження сусідній з пожежею резервуар буде потребувати, коли вітер направлений від пожежі до цього резервуара.

В розділі 2 показано, що в резервуарній групі з однакових вертикальних сталевих резервуарів, місткістю до 20000 м<sup>3</sup> включно, в безрозмірних

координатах коефіцієнт опромінення залежить лише від типу рідини, що горить, напрямку, швидкості вітру і не залежить від місткості резервуарів. Це означає, що для резервуарних груп з резервуарами місткістю до 20000 м<sup>3</sup> включно достатньо провести розрахунки для довільного резервуара висотою 18 м і висотою 12 м.

Отже вхідними параметрами для задачі оптимального вибору інтенсивності охолодження резервуара є

- вид рідини, що горить;
- висота стінки резервуара, яку необхідно охолоджувати (12 м або 18 м);
- швидкість вітру.

#### **4.1.2. Алгоритм розв'язання задачі оптимального вибору інтенсивності подачі води на охолодження резервуара**

Задача оптимального вибору інтенсивності подачі води на охолодження є оберненою до задачі визначення температури стінки резервуара в умовах її охолодження водою. Це дозволяє представити процес розв'язання як послідовність розв'язань прямої задачі, в ході яких відбувається уточнення інтенсивності подачі води на охолодження.

Позначимо через  $F(I)$  різницю між максимальною температурою води на стінці резервуара при даній інтенсивності подачі  $I$  та максимально припустимою температурою  $T_{c \max}$  води, що стікає по стінці:

$$F(I) = \max_{z, \varphi} T_c(z, \varphi) - T_{c \text{ out}}.$$

Тоді алгоритм розв'язання задачі оптимального вибору інтенсивності буде мати наступний вигляд.

1. Задаємо максимально припустиму похибку  $\varepsilon$  і максимально припустиму температуру води  $T_{c \max}$ .

2. Обираємо таке значення інтенсивності подачі води  $I_b$ , яке гарантовано забезпечує охолодження до необхідного рівня, наприклад,  $I_b = 2 \text{ л/(м}\cdot\text{с)}$ .

3. Обчислюємо значення

$$F_a = F(I_a); F_b = F(I_b).$$

4. Якщо

$$|I_a - I_b| < \varepsilon,$$

то переходимо до кроку 9.

5. Обчислюємо

$$I_c = \frac{I_a + I_b}{2}; F_c = F(I_c).$$

6. Якщо  $I_c < 0$ , то покладаємо

$$I_b = I_c; F_b = F_c.$$

7. Якщо  $I_c > 0$ , то покладаємо

$$I_a = I_c; F_a = F_c.$$

8. Якщо  $I_c = 0$ , то переходимо до кроку 9, інакше до кроку 4.

9. Оптимальна інтенсивність подачі



$$I^* = \frac{I_a + I_b}{2}.$$

Відзначимо, що наведений алгоритм може бути використаний як для визначення оптимальної інтенсивності подачі води на стінку резервуара, так і на покрівлю.

#### **4.1.3. Результати розв'язання задачі оптимального вибору інтенсивності подачі води на охолодження**

На рис. 4.1 показано залежність оптимальної інтенсивності подачі води на охолодження стінки від швидкості вітру за умови горіння сирової нафти в аналогічному сусідньому резервуарі. При розрахунках припускалося, що резервуари знаходяться на відстані  $0,75D$  один від одного ( $D$  – діаметр резервуара); вітер направлений від резервуара, що горить, до сусіднього, який має охолоджуватися. Температура випромінюючої поверхні полум'я і ступінь його чорноти були прийняті  $T_f = 1100$  °С,  $\varepsilon_f = 0,85$  відповідно. Максимально допустима температура води на стінці резервуара  $T_{c \max} = 95$  °С; максимальна похибка визначення інтенсивності подачі води  $\varepsilon = 0,01$  л/(м·с). Висновок про необхідність охолодження робився, якщо температура поверхні стінки резервуара перевищувала  $T_{out \max} = 120$  °С.

На рис. 4.2 наведено оптимальну інтенсивності подачі води на охолодження покрівлі резервуара в залежності від швидкості і напрямку вітру. Із його аналізу випливає, що у випадку, коли вітер нахиляє полум'я в бік сусіднього резервуара (лінія 1), тепловий потік до покрівлі збільшується, внаслідок чого необхідно збільшувати інтенсивність подачі води. Максимальна інтенсивність має місце при швидкості вітру близько 2,5 м/с. Подальше збільшення швидкості вітру призводить до зменшення коефіцієнта взаємного опромінення між факелом і покрівлею.

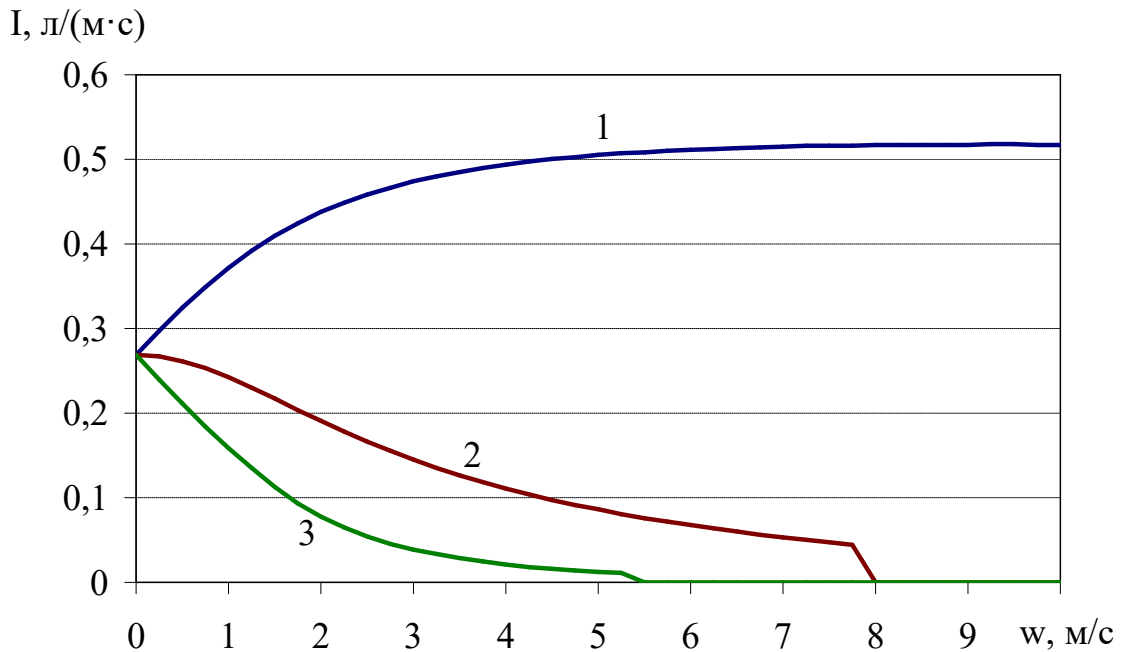


Рис. 4.1. Оптимальна інтенсивність подачі води на охолодження стінки резервуара при пожежі в аналогічному сусідньому резервуарі з нафтою в залежності від швидкості вітру: 1 – вітер направлений від резервуара, що горить, в бік сусіднього; 2 – вітер направлений перпендикулярно напрямку на сусідній резервуар; 3 – вітер направлений в протилежний бік від сусіднього резервуара

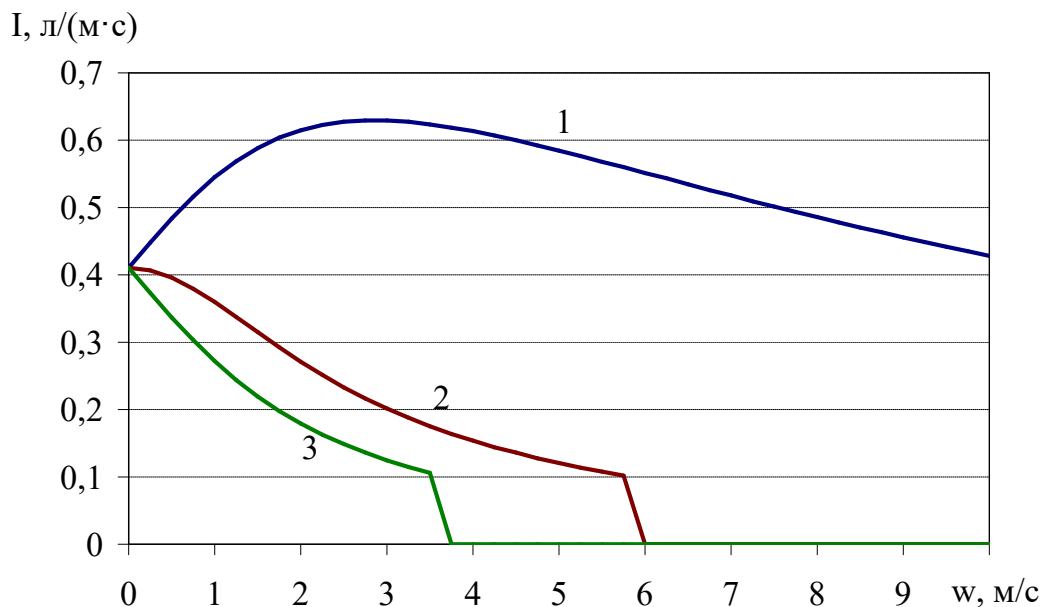


Рис. 4.2. Оптимальна інтенсивність подачі води на охолодження покрівлі резервуара при пожежі в аналогічному сусідньому резервуарі з нафтою в залежності від швидкості вітру: 1 – вітер направлений від резервуара, що горить, в бік сусіднього; 2 – вітер направлений перпендикулярно напрямку на сусідній резервуар; 3 – вітер направлений в протилежний бік від сусіднього резервуара

Внаслідок цього інтенсивність подачі води на охолодження може бути зменшено. На рис. 4.3 наведено залежність оптимальної інтенсивності подачі води на охолодження резервуара від швидкості вітру за умови пожежі в сусідньому резервуарі з бензином. При цьому температура випромінюючої поверхні полум'я і ступінь його чорноти біли прийняті  $T_f = 1200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon_f = 0,97$  відповідно.

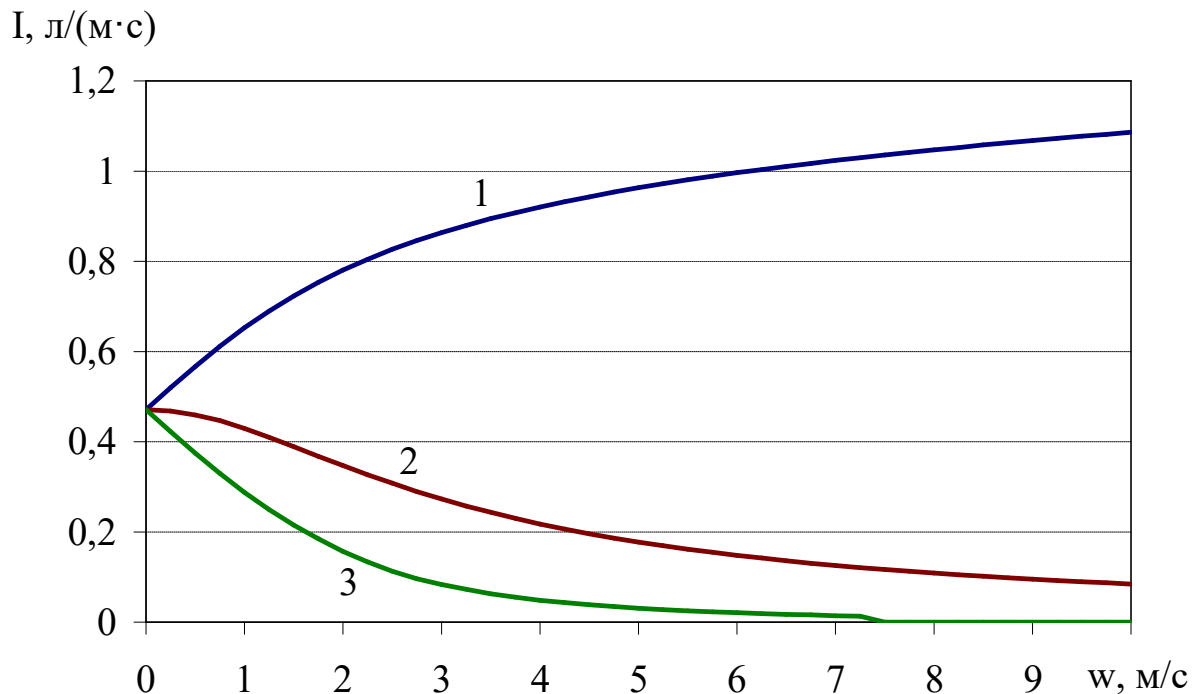


Рис. 4.3. Оптимальна інтенсивність подачі води на охолодження стінки резервуара при пожежі в аналогічному сусідньому резервуарі з бензином в залежності від швидкості вітру: 1 – вітер направлений від резервуара, що горить, в бік сусіднього; 2 – вітер направлений перпендикулярно напрямку на сусідній резервуар; 3 – вітер направлений в протилежний бік від сусіднього резервуара

Горіння бензину характеризується більшою довжиною полум'я, більшим ступенем чорноти його поверхні і більшою температурою порівняно з сирою нафтою. Це призводить до більших значень щільності теплового потоку до сусіднього резервуара. Внаслідок цього збільшується необхідна інтенсивність

подачі води на охолодження сусіднього резервуара (рис. 4.3). Внаслідок більшої довжини полум'я його нахил вітром призводить до монотонного зростання теплового потоку  $i$ , відповідно, інтенсивності подачі води на охолодження покрівлі в діапазоні швидкості вітру ( $0 \div 10$ ) м/с (рис. 4.4).

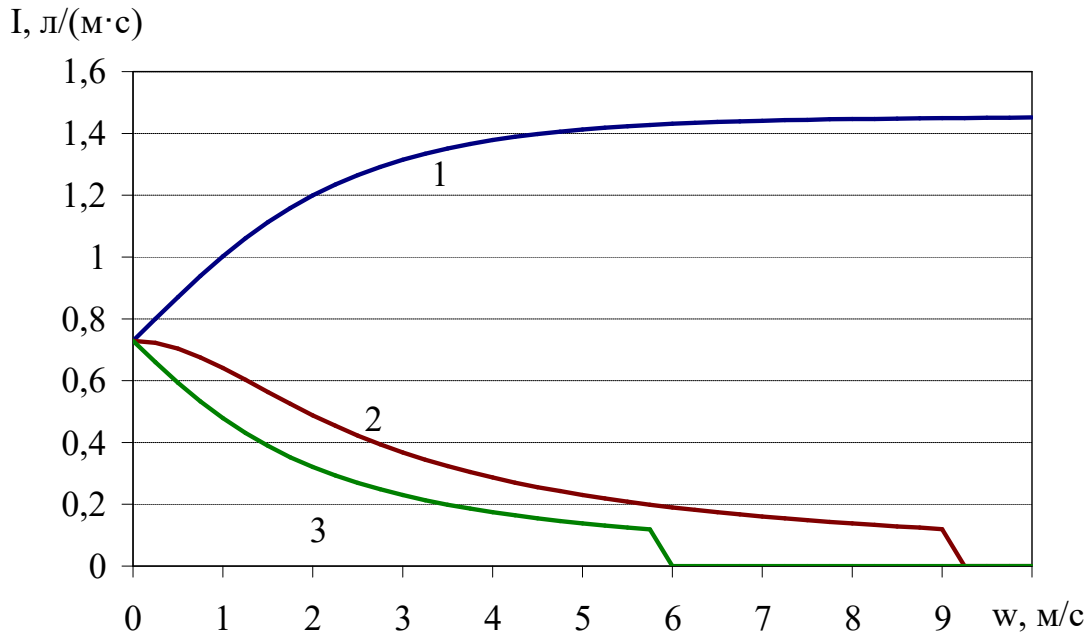


Рис. 4.4. Оптимальна інтенсивність подачі води на охолодження покрівлі резервуара при пожежі в аналогічному сусідньому резервуарі з бензином в залежності від швидкості вітру: 1 – вітер направлений від резервуара, що горить, в бік сусіднього; 2 – вітер направлений перпендикулярно напрямку на сусідній резервуар; 3 – вітер направлений в протилежний бік від сусіднього резервуара

На рис. 4.5 наведено залежність оптимальної інтенсивності подачі води на охолодження стінки резервуара при горінні дизельного палива в аналогічному сусідньому резервуарі. Температура випромінюючої поверхні полум'я і ступінь його чорноти були прийняті  $T_f = 1100$  °С,  $\epsilon_f = 0,95$  відповідно.

Залежність оптимальної інтенсивності подачі води від напрямку і швидкості вітру показано на рис. 4.6. Як і у випадку з горінням нафти (рис. 4.2), максимальний тепловий потік від пожежі має місце при швидкості вітру близько 2,5 м/с в напрямку сусіднього резервуара. Отже, такі умови вимагають найбільшої інтенсивності охолодження – 0,7 л/(м·с).

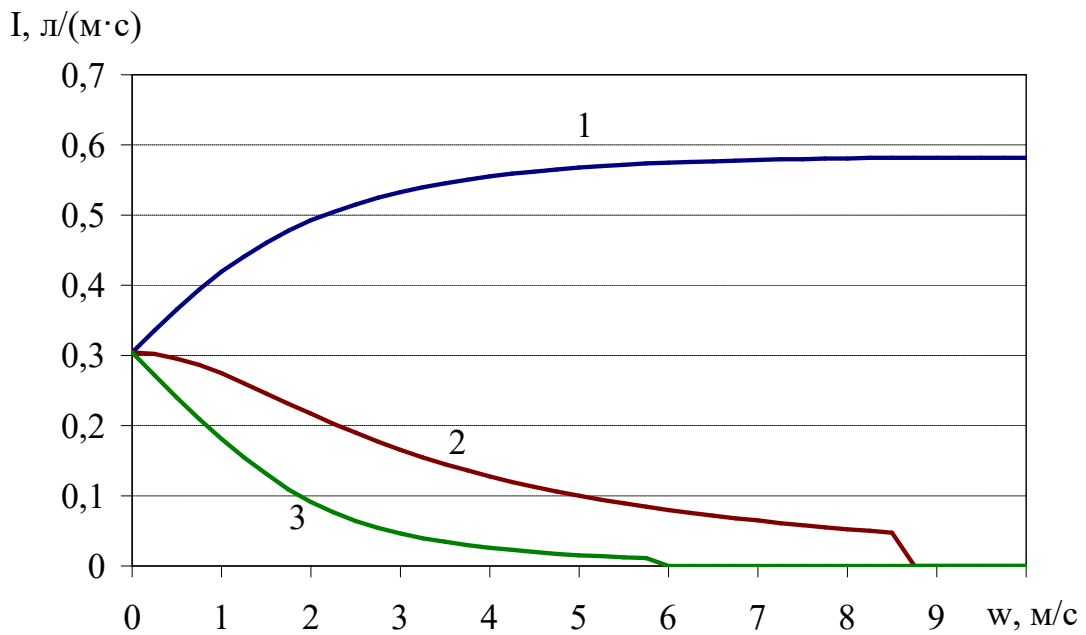


Рис. 4.5. Оптимальна інтенсивність подачі води на охолодження стінки резервуара при пожежі в аналогічному сусідньому резервуарі з дизельним паливом в залежності від швидкості вітру: 1 – вітер направлений від резервуара, що горить, в бік сусіднього; 2 – вітер направлений перпендикулярно напрямку на сусідній резервуар; 3 – вітер направлений в протилежний бік від сусіднього резервуара

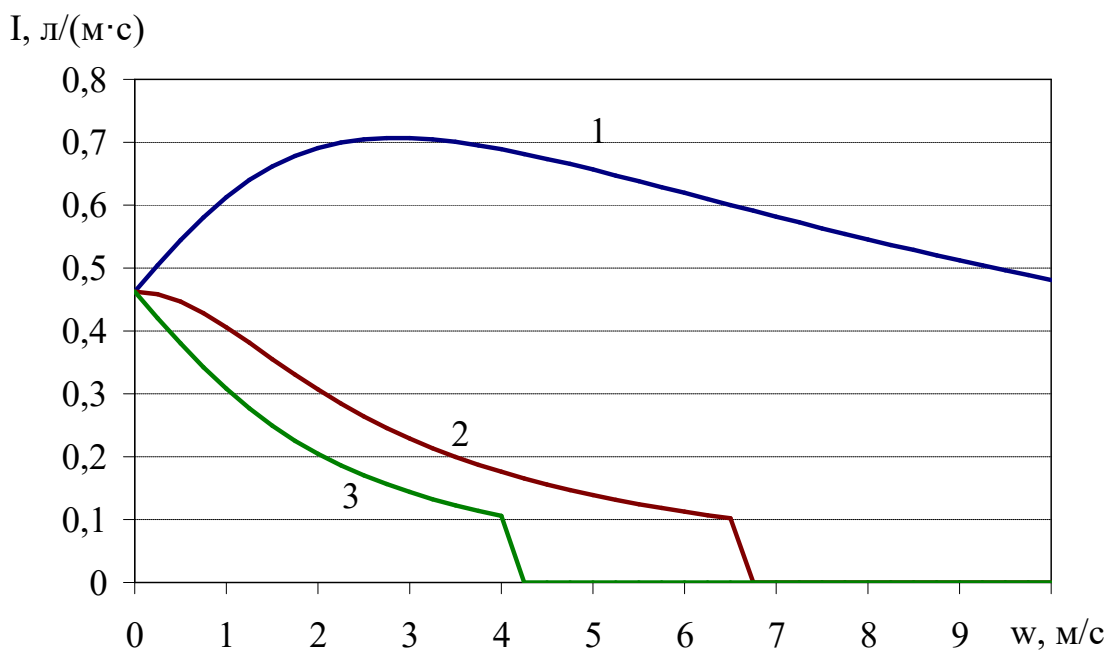


Рис. 4.6. Оптимальна інтенсивність подачі води на охолодження покрівлі резервуара при пожежі в аналогічному сусідньому резервуарі з дизельним паливом в залежності від швидкості вітру: 1 – вітер направлений від резервуара, що горить, в бік сусіднього; 2 – вітер направлений перпендикулярно напрямку на сусідній резервуар; 3 – вітер направлений в протилежний бік від сусіднього резервуара

Менша температура факела при горінні дизельного палива, а також менша його довжина, порівняно з бензином обумовлюють меншу щільність теплового потоку від пожежі до сусіднього резервуара. Це, в свою чергу, дозволяє зменшити інтенсивність подачі води на охолодження сусіднього резервуара (рис. 4.5).

На рис. 4.7 наведено залежність оптимальної інтенсивності подачі води на охолодження стінки резервуара при горінні мазуту в аналогічному сусідньому резервуарі. Температура випромінюючої поверхні полум'я і ступінь його чорноти були прийняті  $T_f = 1000\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon_f = 0,85$  відповідно.

На рис. 4.8 показано вплив напрямку і швидкості вітру на оптимальну інтенсивність подачі води на охолодження покрівлі резервуара.

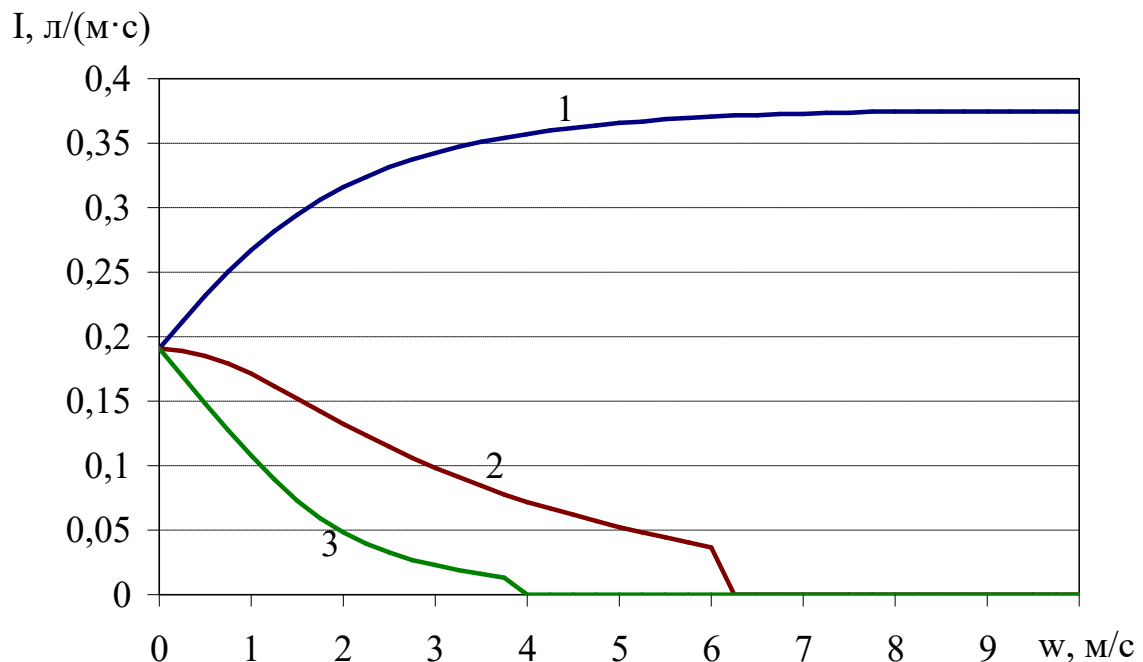


Рис. 4.7. Оптимальна інтенсивність подачі води на охолодження стінки резервуара при пожежі в аналогічному сусідньому резервуарі з мазутом в залежності від швидкості вітру: 1 – вітер направлений від резервуара, що горить, в бік сусіднього; 2 – вітер направлений перпендикулярно напрямку на сусідній резервуар; 3 – вітер направлений в протилежний бік від сусіднього резервуара

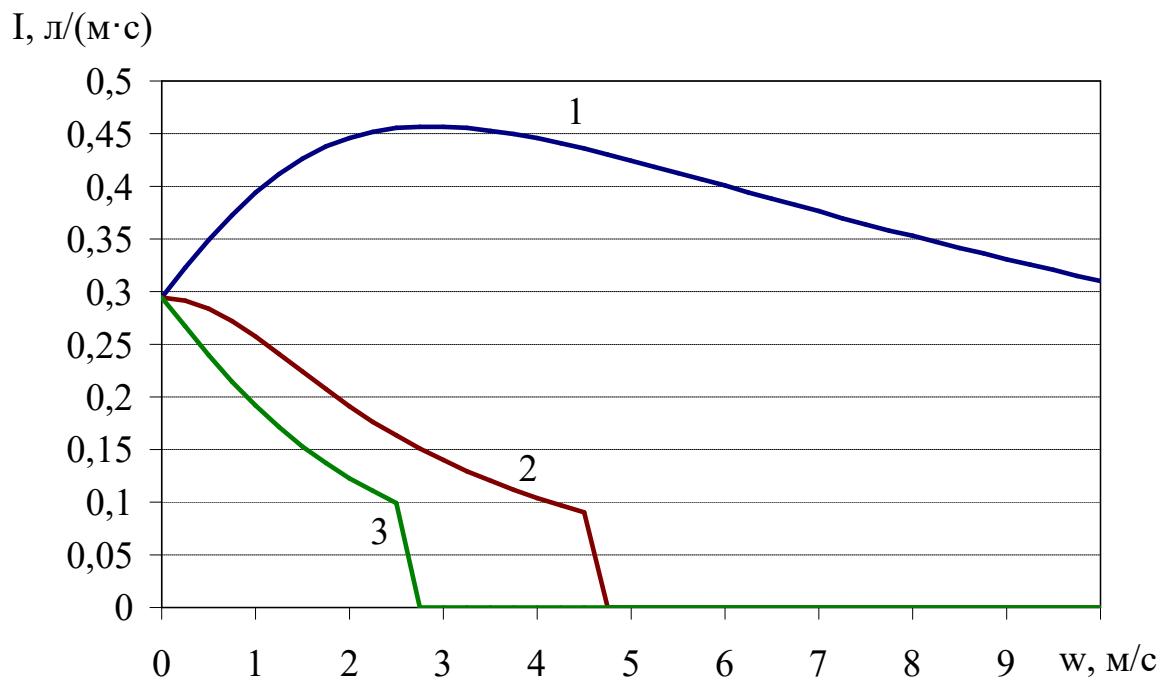


Рис. 4.8. Оптимальна інтенсивність подачі води на охолодження покрівлі резервуара при пожежі в аналогічному сусідньому резервуарі з мазутом в залежності від швидкості вітру: 1 – вітер направлений від резервуара, що горить, в бік сусіднього; 2 – вітер направлений перпендикулярно напрямку на сусідній резервуар; 3 – вітер направлений в протилежний бік від сусіднього резервуара

Менша температура факела порівняно з іншими горючими рідинами обумовлює меншу щільність теплового потоку до сусіднього резервуара, а, значить, і меншу інтенсивність подачі води на охолодження (рис. 4.7). Як і у випадку з іншими горючими рідинами (нафта, дизельне паливо), максимальний тепловий потік на покрівлю має місце при швидкості вітру 2,5 м/с (рис. 4.8), направленому в бік даного резервуара.

Нахил факела вітром в бік сусіднього резервуара збільшує щільність теплового потоку до нього, що потребує більшої інтенсивності охолодження (рис. 4.1 – рис. 4.5). Навпаки, коли напрям вітру є протилежним напрямку на сусідній резервуар, то щільність теплового потоку зменшується. При цьому для значень швидкості вітру більше певної величини (5,5 м/с для нафти, 7,5 м/с для бензину, 6 м/с для дизельного палива) щільність теплового потоку зменшується настільки, що відпадає необхідність охолодження стінок сусіднього резервуара.

Нахил факела у напрямку перпендикулярним до напрямку на сусідній резервуар призводить до зменшення теплового потоку до сусіднього резервуара внаслідок зменшення висоти факела і його відхилення в бік відносно резервуара, що нагрівається. При цьому для значень швидкості вітру більше 8 м/с для нафти і 8,5 м/с для дизельного палива щільність теплового потоку зменшується настільки, що сусідні резервуар не потребує охолодження.

#### **4.2. Порівняння розрахованої інтенсивності подачі води на охолодження резервуара з нормативною**

Згідно [23] інтенсивність подачі води на охолодження приймається не меншою, ніж наведена у табл. 1.2. З неї випливає, що інтенсивність подачі води кільцями зрошення розраховується на одиницю довжини окружності резервуара і при пожежі в обвалуванні має складати  $I = 0,3$  л/(м·с) для резервуарів вище 12 м і  $I = 0,2$  л/(м·с) для резервуарів висотою до 12 м включно.

В табл. 4.4 наведено порівняння розрахованої інтенсивності подачі води на охолодження сусіднього резервуара (рис. 4.1 – рис. 4.7) з нормативною [23] для різної швидкості вітру (за 12-бальною шкалою Бофорта), що направлений в бік сусіднього резервуара.

З аналізу даних, наведених в табл. 4.4, випливає, що у випадку штиля нормативна інтенсивність подачі води на охолодження сусіднього резервуара є достатньою, окрім випадку горіння бензину. Більші значення висоти полум'я, ступеня його чорноти і температури при горінні бензину, порівняно з іншими нафтопродуктами, наведеними в табл. 4.4, призводять до більших значень щільності теплового потоку. Внаслідок цього необхідно подавати більшу кількість води на охолодження сусіднього резервуара.



Таблиця 4.1

Порівняння розрахованої інтенсивності подачі води на охолодження стінки сусіднього резервуара з нормативною

Продукт	Розрахована інтенсивність, л/(м·с)				Нормативна інтенсивність, л/(м·с)
	Штиль, u = (0÷0,3) м/с	Легкий, u = (1,6÷3,4) м/с	Помірний, u = (5,5÷7,9) м/с	Свіжий, u = (8,0÷10,7) м/с	
Нафта	0,27	0,35	0,37	0,37	0,30
Бензин	0,47	0,90	1,05	1,09	
Дизельне паливо	0,30	0,55	0,58	0,58	
Мазут	0,19	0,35	0,37	0,37	

При побудові плану локалізації і ліквідації пожежі в резервуарному парку необхідно виділити пожежний ствол для охолодження покрівлі і дихальних пристроїв резервуара [23]. Приймаючи витрати води лафетним стволом 15,6 л/с [22], для резервуара РВС-10000 (D = 28,5 м) отримаємо інтенсивність подачі води 0,35 л/(м·с), вважаючи, що охолоджується половина покрівлі з боку пожежі. Порівняння розрахованих вище значень інтенсивності подачі води на охолодження покрівлі з нормативною наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Інтенсивності подачі води на охолодження покрівлі сусіднього резервуара

Продукт	Розрахована інтенсивність, л/(м·с)				Нормативна інтенсивність, л/(м·с)
	Штиль, u = (0÷0,3) м/с	Легкий, u = (1,6÷3,4) м/с	Помірний, u = (5,5÷7,9) м/с	Свіжий, u = (8,0÷10,7) м/с	
Нафта	0,44	0,62	0,56	0,48	0,35*
Бензин	0,80	1,33	1,44	1,45	
Дизельне паливо	0,50	0,70	0,64	0,54	
Мазут	0,32	0,45	0,41	0,35	

\* – інтенсивність розрахована із припущення про використання одного лафетного ствола (15,6 л/с) для захисту покрівлі резервуара РВС-10000

Аналіз наведених в табл. 4.2 значень свідчить, що за відсутності вітру лише у випадку пожежі мазуту нормативної інтенсивності достатньо для охолодження покрівлі. В інших випадках необхідно збільшувати інтенсивність подачі води, або зосереджуватися на охолодженні тієї частини покрівлі, де температура досягає критичних значень (рис. 3.17). При охолодженні покрівлі за допомогою лафетного ствола складно забезпечити потрапляння води на певну ділянку покрівлі внаслідок того, що ствольщик на бачить покрівлі. Тому з практичної точки доцільно збільшувати подачу води на охолодження.

### 4.3. Розрахунок сил та засобів на охолодження сусідніх резервуарів

Розглянемо пожежу в резервуарній групі з чотирьох резервуарів РВС (рис. 4.9), що знаходяться на нормативній відстані  $0,75D$  один від одного, де  $D$  – діаметр резервуара.

Напрямок вітру співпадає з напрямком від резервуара 1, що горить, до резервуара 2. При цьому відстань між резервуаром 1 і 4 буде складати:

$$L = (1,75\sqrt{2} - 1)D \approx 1,47D. \quad (4.3)$$

Оскільки охолоджуватися має півпериметр сусіднього резервуара, обернений в бік пожежі, то витрати води на його охолодження описуються виразами

$$G_w = 0,5\pi I_w D;$$

$$G_r = 0,5\pi I_r D,$$

де  $I_w$ ,  $I_r$  – інтенсивності подачі води на охолодження стінки і покрівлі

відповідно;  $G_w$ ,  $G_r$  – витрати води на охолодження стінки і покрівлі.

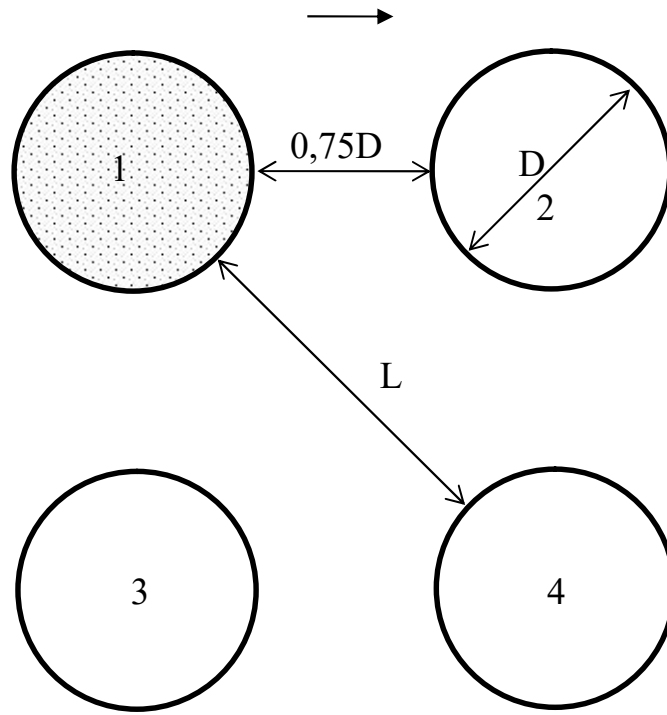


Рис. 4.9. Пожежа в резервуарній групі із чотирьох резервуарів РВС: 1 – резервуар, що горить; 2, 3, 4 – інші резервуари в групі

Витрати води стволом залежать від його діаметру і напору – табл. 4.3 [22].

Таблиця 4.3

Витрати води пожежними стволами

Ствол	Діаметр ствола, мм	Напір води, м		
		20	40	60
Лафетний	25	9,7	13,6	21
А	19	5,4	7,4	9
Б	13	2,7	3,7	4,5

З урахуванням коефіцієнта використання води  $k_s$  ствол може забезпечити подачу води на охолодження стінки

$$Q_w = k_s Q,$$

де  $Q$  – витрати води пожежним стволом (табл. 4.3).

При охолодженні покрівлі будемо вважати коефіцієнт використання води рівним 1, оскільки в цьому випадку не відбувається відбиття води при ударі. Тоді необхідна кількість стволів для подачі води на охолодження стінки  $n_w$  і покрівлю  $n_r$  може бути обчислена за формулою

$$n_w = \left[ \frac{G_w}{Q_w} \right] = \left[ \frac{\pi I_w D}{2k_s Q} \right], \quad (4.4)$$

$$n_r = \left[ \frac{G_r}{Q} \right] = \left[ \frac{\pi I_r D}{2Q} \right], \quad (4.5)$$

де квадратні дужки означають округлення до цілого.

Для подачі води на охолодження резервуарів за допомогою пересувної техніки можуть бути використані стволи різних типів: А, Б, лафетні. Вони відрізняються один від одного як витратами води (табл. 4.3), так і кількістю особового складу, що забезпечує їх роботу. Отже забезпечити подачу води з інтенсивністю, наведеною в табл. 4.5 і табл. 4.6 можна різними способами. Враховуючи дефіцит сил та засобів на початковій стадії локалізації пожежі, виникає необхідність забезпечити достатню інтенсивність подачі води, задіявши мінімальну кількість сил та засобів.

Задача оптимального вибору сил та засобів для охолодження резервуарів в резервуарній групі має вигляд

$$f(n, d, h_w) \rightarrow \min_{n, d, h_w};$$

$$T_w(n, d, h_w) < T_{\max};$$

$$T_{wc}(n, d, h_w) < T_b;$$

$$T_r(n, d, h_w) < T_{\max};$$

$$T_{rc}(n, d, h_w) < T_b,$$

де  $n = n_w + n_r$  – загальна кількість стволів, що приймає участь в охолодженні сусідніх резервуарів;  $d$  – діаметр насадка;  $h_w$  – напір води;  $T_w, T_r$  – температура стінки та покрівлі резервуара, що охолоджується;  $T_{wc}, T_{rc}$  – температура води, що стікає по стінці і покрівлі резервуара;  $T_{max}$  – максимально припустима температура нагріву сталевих конструкцій резервуара;  $T_b = 100^\circ\text{C}$  – температура кипіння води. В якості функції  $f(n, d, h_w)$  може бути обрано:

- кількість особового складу, залученого до охолодження;
- кількість пожежних автомобілів, що забезпечують роботу даного типу пожежних стволів;
- витрати води пожежними стволами.

Розглянемо в якості приклада горіння в резервуарній групі РВС-10000 з дизельним паливом в умовах легкого вітру ( $u = (1,6 \div 3,4)$  м/с), направленою від резервуара 1 в бік резервуара 2 (рис. 4.9). Підстановка в формулу (4.4) інтенсивності подачі води із табл. 4.4 і витрат води стволом із табл. 4.3 дозволяє розрахувати кількість стволів, необхідних для охолодження певного резервуара. Із умови про охолодження всього півпериметра з боку пожежі випливає, що необхідно задіяти щонайменше два стволи. Результати розрахунків наведені в табл. 4.5.

В табл. 4.6 наведено розрахунок сил та засобів, необхідних для забезпечення охолодження покрівлі.

Розрахунок сил і засобів було проведено в припущенні, що ствол Б потребує одного ствольщика, ствол А – 2, лафетний ствол – 3; автомобіль АЦ-40 забезпечує роботу одного лафетного ствола або 2-х стволів А, або 4-х стволів Б [22]. Зірочкою (\*) відмічені мінімальні значення для даного резервуара за відповідним критерієм.

Таблиця 4.5

Сили і засоби для охолодження стінок сусідніх резервуарів

Резервуар	Ствол	Напір, м	Дизельне паливо; вітер легкий, $u = (1,6 \div 3,4)$ м/с			
			Стволів	Особовий склад	Автомобілів	Витрати води, л/с
2	А	40	10	20	5	74,0
		60	8	16	4*	72,0
	Б	40	19	19	4,75	70,3
		60	17	17	4,25	76,5
	Лаф.	40	5	15	5	68,0*
		60	4	12*	4*	84,0
3	А	40	5	10	2,5	37,0
		60	4	8	2	36,0
	Б	40	9	9	2,25	33,3
		60	7	7	1,75*	31,5
	Лаф.	40	2	6*	2	27,2*
		60	2	6*	2	42,0
4	А	40	3	6	1,5	22,2*
		60	3	6	1,5	27,0
	Б	40	6	6	1,5	22,2*
		60	5	5*	1,25*	22,5
	Лаф.	40	2	6	2	27,2
		60	2	6	2	42

Відзначимо, що обрати тип ствола і напір води так, щоб одночасно мінімізувати кількість задіяного особового складу, кількість пожежних автомобілів та витрати води, не завжди можливо. Наприклад, за критерієм мінімуму задіяного особового складу для охолодження стінок резервуара 2 доцільно обрати 4 лафетних стволи з напором 60 м (табл. 4.5). Це призводить до витрат води 84 л/с у той час, як мінімальні витрати води (68 л/с) досягаються використанням 5 лафетних стволів з напором 40 м, тобто різниця складає 1,24 рази.

Таблиця 4.6

Сили і засоби для охолодження покрівель сусідніх резервуарів

Резервуар	Ствол	Напір, м	Дизельне паливо; вітер легкий, $u = (1,6 \div 3,4)$ м/с			
			Стволів	Особовий склад	Автомобілів	Витрати води, л/с
2	А	40	5	10	2,5	37,0
		60	4	8	2	36,0
	Б	40	9	9	2,25	33,3
		60	7	7	1,75*	31,5
	Лаф.	40	2	6*	2	27,2*
		60	2	6*	2	42,0
3	А	40	2	4	1	14,8
		60	2	4	1	18,0
	Б	40	4	4	1	14,8
		60	3	3*	0,75*	13,5*
	Лаф.	40	1	3*	1	13,6
		60	1	3*	1	21,0
4	А	40	1	2*	0,5*	7,4*
		60	1	2*	0,5*	9,0
	Б	40	2	2*	0,5*	7,4*
		60	2	2	0,5*	9,0
	Лаф.	40	1	3	1	13,6
		60	1	3	1	21,0

Отже, в залежності від обраного критерію оптимізації (мінімальні витрати води, мінімальна кількість задіяного особового складу або автоцистерн) задача оптимізації має різні розв'язки. Дискретний характер зміни таких параметрів, як діаметр насадка і кількість пожежних стволів, дозволяє розв'язати задачу оптимізації шляхом повного перебору.

#### 4.4. Програмний комплекс підтримки прийняття рішення керівником гасіння пожежі

Розроблені моделі і алгоритми реалізовано у вигляді програмного застосунку (рис. 4.10).

The screenshot shows a Delphi 11 application window titled "Пожара в резервуарному парку". The interface is divided into several sections:

- Table 1 (Left):** A table with columns "Параметр" (Parameter) and "Значення" (Value). It lists various parameters such as "Навітряне середовище" (Wind environment), "Охолодження" (Cooling), "Параметри задачі" (Task parameters), "Продукт" (Product), and "Резервуар" (Reservoir).
- Table 2 (Middle):** A table with columns "Коэф. вз. опромінення" (Coeff. of irradiation), "Динаміка зміни температури" (Temperature change dynamics), "Сиритт" (Humidity), "Температура води" (Water temperature), and "Кінцева темп. стінки" (Final wall temperature). It contains numerical data for different time steps (0 to 5).
- Table 3 (Right):** A table with columns "№", "0", and "1". It lists parameters like "Швидкість вітру" (Wind speed), "Інтенсивність охолодження" (Cooling intensity), "Початок охолодження" (Start of cooling), "Ступінь чорноти води" (Water blackness degree), "Інтервал часу" (Time interval), "Крок збір. температури" (Temperature sampling step), "Крок по глибині стінки" (Wall depth step), "Кількість точок по верт. осі" (Number of points along the vertical axis), "Рідина" (Liquid), "Ступінь чорноти" (Blackness degree), "Температура полум'я" (Flame temperature), "Тип рідини" (Liquid type), "Висота" (Height), "Діаметр" (Diameter), "Кут нахилу покриття" (Roof slope angle), "Тип резервуара" (Reservoir type), "Висота полум'я" (Flame height), "Довжина полум'я" (Flame length), "Кут нахилу факела" (Flame angle), "Сусідній резервуар" (Adjacent reservoir), "Відстань між резервуарами" (Distance between reservoirs), "Рівень вливу" (Inlet level), "Ступінь чорноти стінки" (Wall blackness degree), and "Товщина стінки" (Wall thickness).
- Code Editor (Right):** Contains Delphi code for calculating optimal cooling intensity. The code includes comments, variable declarations, and a loop that iterates through different wind speeds to find the optimal cooling intensity.

Рис. 4.10. Зовнішній вигляд програмного комплексу підтримки прийняття рішення керівником гасіння пожежі

Реалізацію програмного застосунку виконано у середовищі Delphi 11 (Community Edition). Він може бути використаний як на етапі розробки планів пожежогасіння, так і оперативному режимі в ході локалізації і ліквідації пожежі. Вже під час слідування до місця виклику керівник гасіння пожежі може ввести вихідні дані щодо резервуара, що горить, сусідніх з ним резервуарів, напрямку і швидкості вітру. Це дозволяє визначити необхідні сили і засоби для охолодження резервуарів, ще до прибуття підрозділів до місця пожежі.

Отже, використання застосунку, в якому реалізовано розроблені моделі і алгоритми, дозволяє підвищити ефективність реагування на надзвичайну ситуацію як за рахунок оптимального визначення сили та засобів, так і завдяки скороченню часу, необхідного на прийняття рішення керівником гасіння пожежі.



#### 4.5. Використання пожежного монітора

Одним із ефективних рішень щодо захисту резервуарів є використання пожежних моніторів, керування якими відбувається дистанційно. Це дозволяє оператору монітора уникнути небезпеки, пов'язаної як з тепловим впливом пожежі, так і наслідками вибуху резервуара. Основним питанням при цьому є забезпечення охолодження всієї поверхні резервуара, що нагрівається. Зокрема, в [88] наведено пожежний монітор, який включає стінку з фланцем, корпус, кулю для установки насадків, електричний привід з редуктором для повороту насадків у вертикальній площині, систему управління, швидкодіючі клапани і насадки, в яких установлені швидкодіючі клапани, при цьому насадки установлені на кулі рівномірно по всьому діапазону зміни кутів розпилення вогнегасної речовини, а величини кутів між двома сусідніми насадками вибрані такими, щоб плями розпилення вогнегасної речовини перекривали одна одну на максимальній дальності її подачі.

Недоліком такого пожежного монітору є те, що його азимутальні можливості обмежені, внаслідок чого при використанні такого пожежного монітору в резервуарних парках із нафтопродуктами унеможлиблюється подача вогнегасної речовини до кожного з резервуарів.

В основу корисної моделі [87] покладена задача щодо зняття азимутальних обмежень при використанні пожежного монітора, зокрема, в резервуарних групах із нафтопродуктами.

Поставлена задача вирішується тим, що в пожежному моніторі, який включає корпус, швидкодіючі клапани, насадки, в яких установлені швидкодіючі клапани, та систему управління, насадки установлені на корпусі таким чином, що проекції їх поздовжніх осей на горизонтальну площину є взаємно перпендикулярними одна до одної, при цьому кожний насадок установлений під кутом в вертикальній площині, величина якого визначається виразом

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{h - h_0}{R}, \quad (4.6)$$

а кут розпилу насадка визначається виразом

$$\beta = 2 \operatorname{arcsin} \frac{r}{R + r}, \quad (4.7)$$

де  $h$  – висота резервуара в резервуарному парку із нафтопродуктами;  $h_0$  – висота пожежного монітора;  $R$  – відстань від пожежного монітора до резервуара;  $r$  – радіус резервуара.

На рис. 4.11 і рис. 4.12 наведено загальний і фронтальний вигляд пожежного монітора відповідно. При цьому  $\alpha$  – кут, під яким насадки розміщені у вертикальній площині.

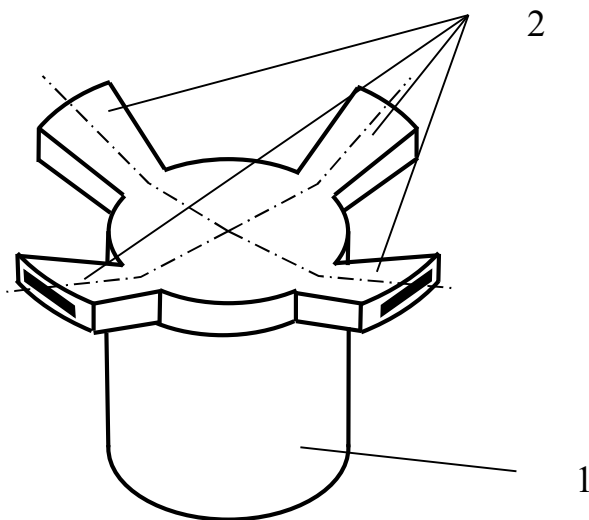


Рис. 4.11. Загальний вигляд пожежного монітора: 1 – корпус; 2 – насадки

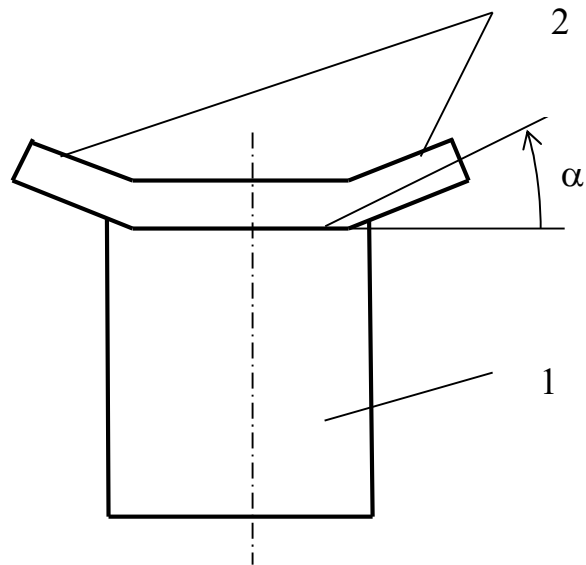


Рис. 4.12. Фронтальний вигляд пожежного монітора: 1 – корпус; 2 – насадки

На рис. 4.13 наведено схему розташування пожежного монітора відносно резервуара, де  $h$  – висота резервуара;  $h_0$  – висота пожежного монітора;  $R$  – відстань від пожежного монітора до резервуара.

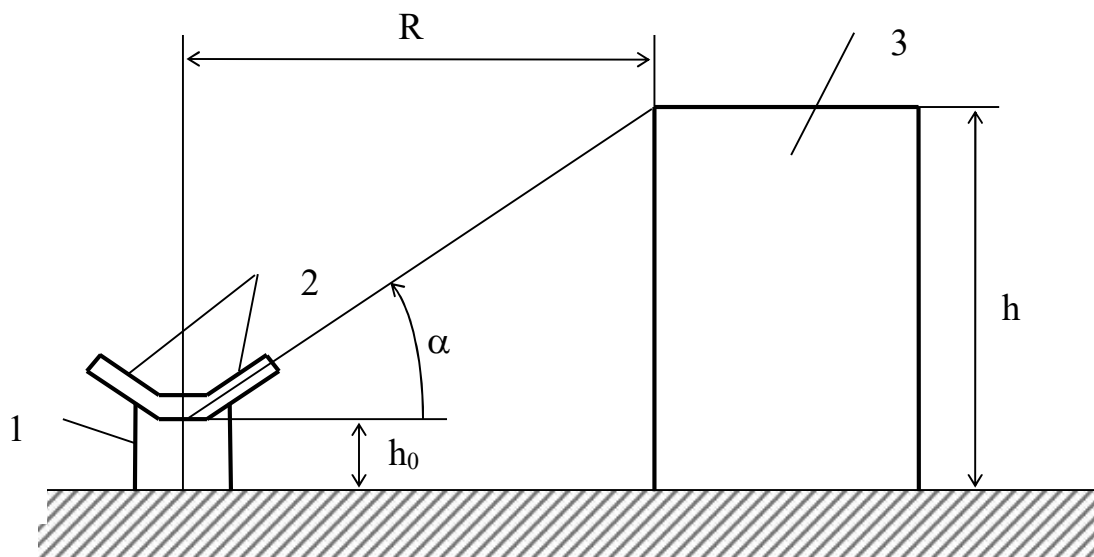


Рис. 4.13. Схема розташування пожежного монітора відносно резервуара: 1 – корпус монітора; 2 – насадки; 3 – резервуар

На рис. 4.14 наведена схема розміщення пожежного монітора в резервуарному парку із нафтопродуктами, де  $r$  – радіус резервуара;  $R$  – відстань від пожежного монітора до резервуара;  $\beta$  – кут розпилу насадки.

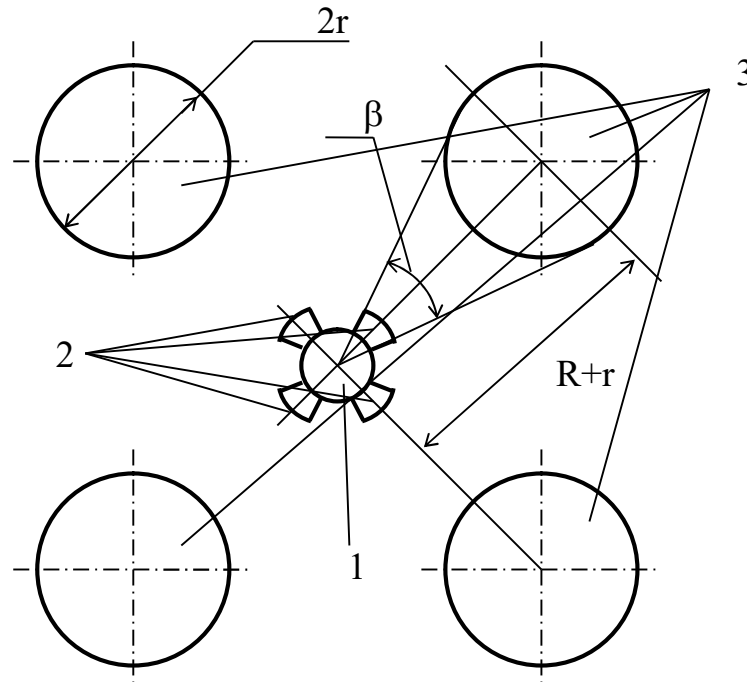


Рис. 4.14. Схема розміщення пожежного монітора в резервуарному парку із нафтопродуктами: 1 – пожежний монітор; 2 – насадки; 3 – резервуари

Пожежний монітор працює наступним чином. Вогнегасна речовина від пожежного монітора може подаватися до резервуарів в резервуарному парку як через кожний окремий насадок 2 (рис. 4.11), так і через всі насадки 2 одночасно. Вибір режимів роботи забезпечується системою управління, яка управляє роботою швидкодіючих клапанів, що розміщені в насадках. Для забезпечення подачі вогнегасної речовини на максимальну висоту, яка відповідає висоті резервуара  $h$  (рис. 4.13), насадки 2 установлені на корпусі пожежного монітора під кутом  $\alpha$  (рис. 4.12), величина якого визначається через висоту резервуара  $h$ , висоту пожежного монітора  $h_0$  та відстань від нього до резервуара  $3 - R$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{h - h_0}{R}. \quad (4.8)$$

Для одночасної подачі вогнегасної речовини на всю фронтальну поверхню резервуара 3 кут розпилу насадка  $\beta$  (рис. 4.14) визначається виразом

$$\beta = 2 \operatorname{arcsin} \frac{r}{R + r}, \quad (4.9)$$

де  $r$  – радіус резервуара 3.

При установці насадків 2 на корпусі 1 пожежного монітора таким чином, що проекції їх повздовжніх осей на горизонтальну площину є взаємно перпендикулярними одна до одної, забезпечується подача вогнегасної речовини до кожного із резервуарів 3 в резервуарному парку з нафтопродуктами (рис. 4.11), тобто без обмежень в азимуті. При цьому виконання умов (4.8), (4.9) забезпечує доставку вогнегасної речовини до кожного резервуара в резервуарному парку як по його кутовому положенню, так і по висоті.

Отже, установка насадків на корпусі пожежного монітора таким чином, що проекції їх повздовжніх осей на горизонтальну площину є взаємно перпендикулярними одна до одної, а також їх установка під кутом у вертикальній площині, величина якого визначається виразом (4.8), за умови, що кут розпилу насадка визначається виразом (4.9), знімає азимутальні обмеження стосовно пожежного монітора.

## Висновки до розділу IV

1. Побудовано алгоритм визначення оптимальної інтенсивності подачі води на охолодження стінки і покрівлі резервуара. В основі наведеного

алгоритму лежить метод дихотомії. За кожну ітерацію алгоритму ширина діапазону, в якому міститься оптимальне значення інтенсивності подачі води, зменшується в 2 рази. Це означає, для визначення оптимальної інтенсивності з похибкою не більше 0,001 л/(м·с), достатньо виконати 11 ітерацій, якщо ширина початкового діапазону не перевищує 2 л/(м·с). Показано, що на найбільшу небезпеку наражається резервуар, розташований з навітряного боку. При помірному і свіжому вітрі (за шкалою Бофорта) потреби в охолодженні його стінки зростають в 1,5÷2 рази порівняно зі штилем. Наявність вітру також збільшує тепловий потік до покрівлі навітряного резервуара, внаслідок чого він потребує більшого охолодження. При цьому максимальна потреба в охолодженні для горючих рідини (нафта, дизельне паливо, мазут) має місце при легкому вітрі. Для легкозаймистих рідин (бензин) тепловий потік від пожежі до цього резервуара монотонно зростає зі збільшенням швидкості вітру. Причиною цього є більша довжина факела при горінні легкозаймистих рідин.

2. Побудовано залежності оптимальної інтенсивності подачі води на охолодження резервуара від напрямку і швидкості вітру. Нахил факела вітром в бік сусіднього резервуара збільшує щільність теплового потоку до нього, що потребує більшої інтенсивності охолодження. Навпаки, коли напрям вітру є протилежним напрямку на сусідній резервуар, то щільність теплового потоку зменшується. При цьому для значень швидкості вітру більше певної величини (5,5 м/с для нафти, 7,5 м/с для бензину, 6 м/с для дизельного палива) щільність теплового потоку зменшується настільки, що зникає необхідність охолодження стінок сусіднього резервуара. При перпендикулярному напрямку вітру для значень швидкості більше 8 м/с для нафти і 8,5 м/с для дизельного палива необхідності в охолодженні стінок сусіднього резервуара також немає.

3. Визначено кількість пожежних стволів, що забезпечують необхідну інтенсивність охолодження стінок або покрівлі резервуара в залежності від типу ствола і напору води. Враховано, що частина води після удару об стінку відбивається і не приймає участі в її охолодженні. Виходячи з кількості

пожежних стволів визначено кількість особового складу і автомобілів АЦ-40, що забезпечують їх роботу. Показано, що витрати води в залежності від обраного типу ствола і напору можуть відрізнятися до 50%. Сформульовано задачу оптимального вибору сил та засобів для охолодження резервуарів, сусідніх з тим, що горить. Показано, що в залежності від обраного критерію оптимізації (мінімальні витрати води, мінімальна кількість задіяного особового складу або автоцистерн) задача має різні розв'язки. Дискретний характер зміни таких параметрів, як діаметр насадка і кількість пожежних стволів, дозволяє розв'язати задачу оптимізації шляхом повного перебору.

4. Реалізація розроблених моделей і алгоритмів у вигляді програмного застосунку дозволяє підвищити ефективність реагування на надзвичайну ситуацію як за рахунок оптимального визначення сили та засобів, так і завдяки скороченню часу, необхідного на прийняття рішення керівником гасіння пожежі.

5. Обґрунтовано використання пожежного гідромонітора для охолодження резервуарів в умовах пожежі. Особливістю гідромонітора є зняття азимутальних обмежень при використанні пожежного монітора в резервуарних парках з нафтопродуктами.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу у галузі цивільної безпеки, а саме: підвищення ефективності реагування на надзвичайні ситуації техногенного характеру унаслідок пожежі на об'єкті зберігання нафтопродуктів шляхом оптимального вибору сил та засобів для охолодження сусідніх резервуарів.

За підсумками виконаної наукової роботи зроблено наступні висновки:

1. Проведений аналіз стану пожежної безпеки в резервуарних парках з нафтопродуктами показав, що аваріям в резервуарних парках притаманний «ефект доміно», коли одна аварія, навіть відносно незначна, створює підґрунтя для іншої. Аналіз літературних джерел засвідчив, що близько 43% масштабних аварій в резервуарних парках, яким був притаманний «ефект доміно», починалися з пожежі. В умовах повномасштабної російської агресії проти України пожежі стали основним видом надзвичайних ситуацій, що виникали в резервуарних парках. Основним засобом запобігання «ефекту доміно» в резервуарних парках є охолодження резервуарів водою. В той же час існуючі нормативні документи щодо інтенсивності подачі води на охолодження резервуарів не враховують вплив нафтопродукту, що горить, напрямку і швидкості вітру на тепловий потік від пожежі до сусідніх резервуарів.

2. Подальшого розвитку набула модель теплового впливу пожежі в резервуарі з нафтопродуктами на сусідні резервуари. Побудовано модель нагріву стінки та покрівлі сусіднього резервуара, що враховує їх променевий теплообмін з пожежею, навколишнім середовищем та внутрішнім простором резервуара, а також конвекційний теплообмін з навколишнім повітрям і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара. Модель враховує нахил полум'я вітром. Побудовано оцінки коефіцієнта взаємного опромінення стінки і покрівлі резервуара з факелом та коефіцієнти конвекційного



теплообміну стінки і покрівлі з навколишнім повітрям і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара.

3. Удосконалено модель охолодження стінок і покрівлі резервуара водою. Побудовано рівняння теплового балансу для стінки та покрівлі резервуара при їх охолодженні водою в умовах пожежі в сусідньому резервуарі. Рівняння враховує променевий теплообмін стінки та покрівлі з факелом, навколишнім середовищем і внутрішнім простором резервуара; конвекційний теплообмін з водною плівкою і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара. Експериментальна перевірка моделі нагріву і охолодження сталеві стінки в умовах пожежі за допомогою зменшеної моделі з горінням дизельного палива в піддоні  $1,0 \times 1,5 \text{ м}^2$  засвідчила, що як під час нагрівання, так і під час охолодження розраховані значення температури стінки потрапляють в довірчій інтервал, що відповідає довірчій ймовірності 0,95.

4. Побудовано алгоритм визначення оптимальної інтенсивності подачі води на охолодження стінки і покрівлі резервуара. Показано, що на найбільшу небезпеку наражається резервуар, розташований з навітряного боку. При помірному і свіжому вітрі (за шкалою Бофорта) потреби в охолодженні його стінки зростають в  $1,5 \div 2$  рази порівняно зі штилем. Визначено кількість пожежних стволів, що забезпечують необхідну інтенсивність охолодження стінок або покрівлі резервуара в залежності від типу ствола і напору води. Виходячи з кількості пожежних стволів визначено кількість особового складу і автомобілів АЦ-40, що забезпечують їх роботу. Показано, що витрати води в залежності від обраного типу ствола і напору можуть відрізнятись до 50%. Вперше сформульовано і розв'язано задачу оптимального вибору сил та засобів для охолодження резервуарів, сусідніх з тим, що горить. Показано, що в залежності від обраного критерію оптимізації (мінімальні витрати води, мінімальна кількість задіяного особового складу або автоцистерн) задача має різні розв'язки.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Yang R., Wang Z., Jiang J., Shen S, Sun P., Lu Y. Cause analysis and prevention measures of fire and explosion caused by sulfur corrosion. *Engineering Failure Analysis*. 2020. Vol. 108. P. 104342. doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.104342.
2. Zhang M., Dou Z., Liu L., Jiang J., Mebarki A., Ni L. Study of optimal layout based on integrated probabilistic framework (IPF): Case of a crude oil tank farm. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017. Vol. 48. P. 305–311. doi: 10.1016/j.jlp.2017.04.025.
3. Ni Z., Wang Y. Relative risk model for assessing domino effect in chemical process industry. *Safety Science*. 2016. Vol. 87. P. 156–166. doi: 10.1016/j.ssci.2016.03.026
4. Otrosh Yu., Semkiv O., Rybka E., Kovalov A. About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708 (1). doi: 10.1088/1757-899X/708/1/012065
5. Kustov M. V., Kalugin V. D., Tutunik V. V., Tarakhno E. V. Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Chemistry and Chemical Technology Issues*. 2019. Vol. 1. P. 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99
6. Mygalenko K., Nuyanzin V., Zemlianskyi A., Dominik A., Pozdieiev S. Development of the technique for restricting the propagation of fire in natural peat ecosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1(10). P. 31–37. doi: 10.15587/1729-4061.2018.121727
7. Popov O., Iatsyshyn A., Kovach V., Artemchuk V., Kameneva I., Taraduda D., Sobyna V., Sokolov D., Dement M., Yatsyshyn T. Risk assessment for the population of Kyiv, Ukraine as a result of atmospheric air pollution. *Journal of Health and Population*. 2020. Vol. 10(25). doi: 10.5696/2156-9614-10.25.200303

8. Протипожежний захист складів нафти і нафтопродуктів. Оглядова інформація / Бабенко Ю.В., Дудченко В.Г., Басаєв А.М. та інші. – К.: УкрНДІПБ, 2002. – 142 с.

9. Класифікатор надзвичайних ситуацій ДК 019:2010. 2010. Available online: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va457609-10#Text>

10. Yang R., Khan F., Neto E. T., Rusli R., Ji J. Could pool fire alone cause a domino effect? *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. Vol. 202. P. 106976. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106976>

11. Hou L., Wu X., Wu Z., Wu S. Pattern identification and risk prediction of domino effect based on data mining methods for accidents occurred in the tank farm. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. Vol. 193. P. 106646. Doi: [10.1016/j.ress.2019.106646](https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106646)

12. Abdolhamidzadeh B., Abbasi T., Rashtchian D., Abbasi S. A. Domino effect in process-industry accidents – An inventory of past events and identification of some patterns. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2011. Vol. 24 (5). P. 575–593. Doi: [10.1016/j.jlp.2010.06.013](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.06.013)

13. Reniers G., Cozzani V. Features of Escalation Scenarios. *Domino Effects in the Process Industries*. Elsevier. 2013. P. 30–42. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8>

14. Amin M. T., Scarponi G. E., Cozzani V., Khan F. Improved pool fire-initiated domino effect assessment in atmospheric tank farms using structural response. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 242. P. 109751. Doi: [10.1016/j.ress.2023.109751](https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109751)

15. Huang K., Chen G., Khan F., Yang Y. Dynamic analysis for fire-induced domino effects in chemical process industries. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 148. P. 686–697. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.042>

16. Hemmatian B., Abdolhamidzadeh B., Darbra R., Casal J. The significance of domino effect in chemical accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2014. Vol. 29. P. 30–38. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.01.003>

17. Fabiano B., Caviglione C., Reverberi A. P. Palazzi E. Multicomponent Hydrocarbon Pool Fire: Analytical Modelling and Field Application. *Chemical Engineering Transactions*. 2016. Vol. 48. P. 187–192. Doi: <https://doi.org/10.3303/CET1648032>

18. Одинець А., Ніжник В., Сізіков О., Фещук Ю., Балло Я., Климась Р., Жихарєв О. Обґрунтування додаткових заходів щодо оперативних дій під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів в умовах бойових дій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. №1 (13). С. 72–79. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1\(13\).72-79](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1(13).72-79)

19. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2022 року. 2023. Available online: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/1/6/0/8/6/7/7/analitichna-dovidka-pro-pojeji-122022.pdf>

20. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 2 місяці 2024 року. 2024. Available online: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/2/0/6/1/9/6/1/analitichna-dovidka-pro-pojeji-022024.pdf>

21. Кодекс цивільного захисту України. 2012. Available online: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text>

22. Довідник керівника гасіння пожежі. Київська книжково-журнальна фабрика. 2017. 320 с.

23. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою і нафтопродуктами. НАПБ 05.02: Офіц. вид. – К.: М-во з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи, 2003. 81 с. – (нормативний документ МНС України. Інструкція).

24. ВБН В.2.2-58.1-94 Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа.

25. ВБН В.2.2-58.2-94 Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа.

26. Абрамов Ю.А. Моделирование пожаров, их обнаружения, локализации и тушения / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов, А.А. Тарасенко. – Харьков: НУГЗУ, 2011. – 927с.

27. Wu B., Roy S. P., Zhao X. Detailed modeling of a small-scale turbulent pool fire. *Combustion and Flame*. 2020. Vol. 214. P. 224-237. Doi: 10.1016/j.combustflame.2019.12.034

28. Андриенко В.Н., Говаленков С.В., Созник А.П. Математическая модель теплового излучения от факелов, имеющих форму конуса. *Проблемы пожарной безопасности*. 2003. Вып. 14. – С. 24–28.

29. Рябова І.Б., Сайгук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі. Харків: АПБУ. 2002. – 352 с.

30. Сознік О.П., Говаленков С.В., Андрієнко В.М. Геометричне моделювання випромінювання полум'я при пожежі нафти в резервуарі. *Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці / Таврійська державна агротехнічна академія*. 2004. Вип. 4. Т. 27. Мелітополь: ТДАТА. С. 20-25.

31. Андриенко В.Н., Говаленков С.В., Созник А.П. Расчет излучения от факелов цилиндрической и эллипсоидальной формы. *Проблемы пожарной безопасности. Сб. науч. тр. АГЗ Украины. Спец. вып.* 2004. С. 19–25.

32. Андриенко В.Н., Говаленков С.В., Созник А.П., Басманов А.Е. Зависимость теплового излучения факела от их формы. *Вісник міжнародного слов'янського університету*. 2004. Т. 7. №2. С. 55–60.

33. Casal J. Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants. *Industrial Safety Series*. V. 8. Elsevier, 2008. – 117 p.

34. Siegel R., Howel J.R. *Thermal Radiation Heat Transfer*. Taylor & Francis. – New York, 1992.

35. Thomas P.H. The size of flames from natural fires. Proc. Combust. Inst. 1963. V.9. P. 844.
36. Fay H. Pool fire models. Hazard. Mater. 2006. Vol. 136. P. 219.
37. Hottel H.C. Certain laws governing the diffusion burning of liquids. Research abstracts and reviews. Vol. 1. P. 41-44.
38. Moorhouse J. Scaling criteria for pool fires derived from large-scale experiments. I. Chem. Sym., 1982. P. 1982.
39. Munoz M. Analysis of the geometric and radiative characteristics of hydrocarbon pool fires. Combust. Flame. 2004. Vol. 139. P. 263.
40. Pritchard M.J. A new approach for predicting thermal radiation levels from hydrocarbon pool fires. Symp. on Major Hazards Onshore and Offshore. Manchester. 1992. P. 491.
41. Schalike S. Flame Heights of Di-tert-butyl Peroxide Pool Fires – Experimental Study and Modeling. Chemical Engineering Transactions. 2012. Vol. 26. P. 363-368.
42. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. 1990. 420 с.
43. Клепоносов Н.Н. Пожарная защита объектов нефтяной и газовой промышленности. 1983. 192 с.
44. Zhang Z., Zong R., Tao C., Ren J., Lu S. Experimental study on flame height of two oil tank fires under different lip heights and distances. Process Safety and Environmental Protection. 2020. Vol. 139. P. 182–190. doi: 10.1016/j.psep.2020.04.019.
45. Mukunda H. S., Shivakumar A., Bhaskar Dixit C. S. Modelling of unsteady pool fires – fuel depth and pan wall effects. Combustion Theory and Modelling. 2021. doi: 10.1080/13647830.2021.1980229.
46. Elhelw M., El-Shobaky A., Attia A, El-Maghlany W. M. Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks. Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 146. P. 670–685. doi: 10.1016/j.psep.2020.12.002.

47. Zhang X., Hu L., Wu L., Kostiuk L. W. Flame radiation emission from pool fires under the influence of cross airflow and ambient pressure. *Combustion and Flame*. 2019. Vol. 202. P. 243–251. Doi: 10.1016/j.combustflame.2019.01.015

48. Shi C., Liu W., Hong W., Zhong M., Zhang X. A modified thermal radiation model with multiple factors for investigating temperature rise around pool fire. *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 379. P. 120801. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120801>

49. Zhou J., Reniers G., Cozzani V. Improved probit models to assess equipment failure caused by domino effect accounting for dynamic and synergistic effects of multiple fires. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 154. P. 306–314. Doi: 10.1016/j.psep.2021.08.020

50. Ovidi F., Zhang L., Landucci G., Reniers G. Agent-based model and simulation of mitigated domino scenarios in chemical tank farms. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. Vol. 209. P. 107476. Doi: 10.1016/j.ress.2021.107476

51. Tamascelli N., Scarponi G. E., Amin M. T., Sajid Z., Paltrinieri N., Khan F., Cozzani V. A neural network approach to predict the time-to-failure of atmospheric tanks exposed to external fire. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 245. P. 109974. Doi: 10.1016/j.ress.2024.109974

52. Men J., Chen G., Yang Y., Reniers G. An event-driven probabilistic methodology for modeling the spatial-temporal evolution of natural hazard-induced domino chain in chemical industrial parks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 226. P. 108723. Doi: 10.1016/j.ress.2022.108723

53. Khan F., Amin M. T., Cozzani V., Reniers G. Domino effect: Its prediction and prevention – An overview. *Methods in Chemical Process Safety*. 2021. P. 1–35. Doi: 10.1016/bs.mcps.2021.05.001

54. Iannaccone T., Scarponi G. E., Landucci G., Cozzani V. Numerical simulation of LNG tanks exposed to fire. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 149. P. 735–749. Doi: 10.1016/j.psep.2021.03.027

55. Yi H., Feng Y., Wang Q. Computational fluid dynamics (CFD) study of heat radiation from large liquefied petroleum gas (LPG) pool fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 61. P. 262–274. Doi: 10.1016/j.jlp.2019.06.015

56. Yang J., Zhang M., Zuo Y., Cui X., Liang C. Improved models of failure time for atmospheric tanks under the coupling effect of multiple pool fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2023. Vol. 81. P. 104957. Doi: 10.1016/j.jlp.2022.104957

57. Семерак М. М., Глова Т. Я., Чернецький В. В., Байтала В. М. Напружено-деформований стан стінки та днища вертикальних сталевих резервуарів при їх нагріві. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2015. № 12. С. 228-235. Available online: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/Visnuk/article/view/436/429>

58. Semerak M., Pozdeev S., Yakovchuk R., Nekora O., Sviatkevich O. Mathematical modeling of thermal fire effect on tanks with oil products // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 247 (00040). doi: 10.1051/mateconf/201824700040.

59. Espinosa S. N., Jaca R. C., Godoy L. A. Thermal effects of fire on a nearby fuel storage tank. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 62 (103990). doi:10.1016/j.jlp.2019.103990.

60. Li Y., Jiang J., Zhang Q., Yu Y., Wang Z., Liu H., Shu C.-M. Static and dynamic flame model effects on thermal buckling: Fixed-roof tanks adjacent to an ethanol pool-fire. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019. Vol. 127. P. 23–35. doi: 10.1016/j.psep.2019.05.001

61. Ahmadi O., Mortazavi S. B., Pasdarsahri H., Mohabadi H. A. Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational fluid dynamic (CFD). *Process Safety and Environmental Protection*. 2019. Vol. 123. P. 379-389. doi: 10.1016/j.psep.2019.01.006.



62. Abramov, Y. A., Basmanov, O. E., Mikhayluk, A. A., Salamov, J. Model of thermal effect of fire within a dike on the oil tank. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2018. № 2. P. 95-100. doi: 10.29202/nvngu/2018-2/12.

63. Lackman T., Hallberg M. A dynamic heat transfer model to predict the thermal response of a tank exposed to a pool fire. *Chemical engineering transactions*. 2016. Vol. 48. P. 157-162. Doi: 10.3303/CET1648027.

64. Басманов А. Е., Михайлюк А. А. Локалізація пожегор в резервуарах с нефтепродуктами. Харьков: НУГЗУ. 2011. 108 с.

65. Basmanov O., Kulik Y. Estimation of the convection heat exchange rate for tank shells covered with falling water film. *East journal of security studies*. 2017. Vol. 1. P. 145–154. Available online: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6121>

66. Саламов Д. О., Абрамов Ю. О., Басманов О. Є. Алгоритм розрахунку охолоджувальної дії водної плівки, що стікає по стінці резервуара. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. № 46. С. 174–178. Available online: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11119>

67. Abramov Y., Basmanov O., Salamov J., Mikhayluk A., Yashchenko O. Developing a model of tank cooling by water jets from hydraulic monitors under conditions of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Ecology*. 2019. 1/10 (97). P. 14–20. Doi: 10.15587/1729-4061.2019.154669

68. Басманов О. Є., Максименко М. В., Олійник В. В. Моделювання теплового впливу пожежі в резервуарі з нафтопродуктом на сусідній резервуар. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2021. № 2(34). С. 4–20. Doi: 10.52363/2524-0226-2021-34-1

69. Басманов О.Є., Максименко М.В. Моделювання впливу пожежі на сусідній резервуар з нафтопродуктом в умовах вітру. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. № 1(35). С. 239-253. Doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-18

70. Максименко М. В. Модель нагріву покрівлі резервуара під впливом пожежі в сусідньому резервуарі. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. № 2 (36). С. 233-247. Doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-18

71. Максименко М.В. Локалізація надзвичайних ситуацій техногенного характеру, пов'язаних зі зберіганням нафтопродуктів. Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених "Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту". НУЦЗУ. 2021. С. 114.

72. Басманов О. Є., Максименко М. В. Модель нагріву стінки резервуара під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі. Проблеми пожежної безпеки. НУЦЗУ. 2022. С. 239–241. Available online: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/16008>

73. Басманов О. Є., Максименко М. В. Оцінка коефіцієнта взаємного опромінення між резервуаром і факелом над сусіднім резервуаром. Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2022. С. 9–11. Available online: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/16017>

74. Басманов О. Є., Максименко М. В. Тепловий вплив пожежі на покрівлю резервуара з нафтопродуктом. Міжнародна науково-практична конференція «Problems of Emergency Situations». 2023. С. 217–218. Available online: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17634>

75. Басманов О. Є., Максименко М. В. Моделювання теплового впливу пожежі в резервуарі на покрівлю сусіднього резервуара. III Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми та перспективи розвитку фундаментальних, прикладних, загальнотехнічних та безпекових наук». 2023. С. 8–12. Available online: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18034>

76. Басманов О. Є., Максименко М. В. Нагрів покрівлі резервуара під тепловим впливом пожежі. Проблеми і перспективи розвитку системи

життєдіяльності. XVIII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів. Львів. 2023. С. 163–166.

77. Саламов Д. О., Абрамов Ю. О., Басманов О. Є. Оцінка коефіцієнта конвекційного теплообміну між стінкою резервуара і пароповітряною сумішшю в газовому просторі резервуара. Проблеми пожежної безпеки. 2020. № 47. С. 99–104. Available online: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11117>.

78. Теплотехника / Луканин В.Н., Шатров М.Г., Камфер Г.М. и др.; под ред. В.Н. Луканина. 2002. 671 с.

79. Churchill V. T., Bernstein M. A. Correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in crossflow. J. Heat Transfer. 1977. V. 99. P. 300–306.

80. Basmanov O., Kulik Y. Identifying the heat transfer coefficient of the tank wall in the case of dike fire // Problems of Fire Safety. 2017. Vol. 41, 31-37. Available online: [http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/1023/1/Basmanov\\_Kulik.pdf](http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/1023/1/Basmanov_Kulik.pdf)

81. Максименко М. В. Модель охолодження стінки резервуара водою при пожежі в сусідньому резервуарі. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 1 (37). С. 156-170. Doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-11

82. Басманов О. Є., Максименко М. В. Моделювання охолодження покрівлі вертикального сталевого резервуара. Міжнародна науково-практична конференція «Problems of Emergency Situations – 2024». 2024. С. 170-171. Available online: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20107>

83. Басманов О. Є., Максименко М. В. Оптимізація сил та засобів для охолодження резервуарів при пожежі в резервуарній групі. XV Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». 2024. С. 9-10. Available online: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20105>

84. Keller J. M., Simmons C. S. The Influence of Selected Liquid and Soil Properties on the Propagation of Spills over Flat Permeable Surfaces. United States: N. p., 2005. Doi: 10.2172/15011818

85. Basmanov O., Maksymenko M. Model for choosing optimal water flow rate for tank wall cooling. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. Vol. 2 (38). P. 4–16. Doi: 10.52363/2524-0226-2023-38-1

86. Басманов О. Є., Максименко М. В., Олійник В. В. Оптимальний вибір сил та засобів для охолодження резервуара при пожежі в резервуарній групі. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2024. № 1 (39). С. 55–65. Available online: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20266>

87. Пат. 146808 Україна, МПК А62С 3/06, А62С 35/00, А62С 31/05. Пожежний монітор / Абрамов Ю.О., Басманов О.Є., Максименко М.В.; заявник і патентовласник Національний університет цивільного захисту України. – заявл. 18.11.2020; опубл. 17.03.2021. Державний реєстр патентів України на корисні моделі. Бюл. № 11.

88. Пат. 122938 Україна, МПК А62С 1/02. Пожежний монітор / Абрамов Ю.О., Басманов О.Є., Саламов Д.О., Тищенко Є.О.; заявник і патентовласник Національний університет цивільного захисту України. – заявл. 18.12.2017; опубл. 25.01.2018. Державний реєстр патентів України на корисні моделі.

## ДОДАТОК А

### Список публікацій за темою дисертації

**Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

**Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:**

1. Басманов О. Є., Максименко М. В., Олійник В. В. Моделювання теплового впливу пожежі в резервуарі з нафтопродуктом на сусідній резервуар. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. № 2 (34). С. 4–20. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat).

*Здобувачу особисто належить побудова рівняння теплового балансу для стінки резервуара і його чисельне розв'язання.*

2. Басманов О. Є., Максименко М. В. Моделювання впливу пожежі на сусідній резервуар з нафтопродуктом в умовах вітру. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. № 1 (35). С. 239–253. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat)

*Здобувачу особисто належить оцінка теплового потоку від пожежі до стінки резервуара, а також розв'язання рівняння теплопровідності у стінці резервуара.*

3. Максименко М. В. Модель нагріву покрівлі резервуара під впливом пожежі в сусідньому резервуарі. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. № 2 (36). С. 233–247. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat).

4. **Максименко М. В.** Модель охолодження стінки резервуара водою при пожежі в сусідньому резервуарі. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 1 (37). С. 156–170. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat).

5. Basmanov O., **Maksymenko M.** Model for choosing optimal water flow rate for tank wall cooling. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. Vol. 2 (38). P. 4–16. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat).

*Здобувачу особисто належить постановка задачі вибору оптимальної інтенсивності подачі води на охолодження резервуара та розробка алгоритму її розв'язання.*

6. Басманов О. Є., **Максименко М. В.**, Олійник В. В. Оптимальний вибір сил та засобів для охолодження резервуара при пожежі в резервуарній групі. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2024. № 1 (39). С. 55–65. (Включено до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Road, Crossref, Fatcat).

*Здобувачу особисто належить розрахунок сил та засобів, необхідних для локалізації пожежі в залежності від обраного критерію оптимізації.*

### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

7. **Максименко М.В.** Локалізація надзвичайних ситуацій техногенного характеру, пов'язаних зі зберіганням нафтопродуктів. Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених "Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту". НУЦЗУ. 2021. С. 114. (Форма участі – очна).

8. Басманов О. Є., **Максименко М. В.** Модель нагріву стінки резервуара під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі. Проблеми пожежної безпеки. НУЦЗУ. 2022. С. 239–241. (Форма участі – очна).

*Здобувачу особисто належить побудова моделі теплового впливу пожежі горючої рідини на стінку резервуара .*

9. Басманов О. Є., **Максименко М. В.** Оцінка коефіцієнта взаємного опромінення між резервуаром і факелом над сусіднім резервуаром. Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2022. С. 9–11. (Форма участі – заочна).

*Здобувачу особисто належить розрахунок коефіцієнта взаємного опромінення між факелом у формі конуса і циліндричною стінкою.*

10. Басманов О. Є., **Максименко М. В.** Тепловий вплив пожежі на покрівлю резервуара з нафтопродуктом. Міжнародна науково-практична конференція «Problems of Emergency Situations». 2023. С. 217–218. (Форма участі – очна).

*Здобувачу особисто належить розробка моделі теплового балансу для покрівлі вертикального сталевго резервуара в умовах пожежі нафтопродукту в сусідньому резервуарі.*

11. Басманов О. Є., **Максименко М. В.** Нагрів покрівлі резервуара під тепловим впливом пожежі. Проблеми і перспективи розвитку системи життєдіяльності. XVIII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів. Львів. 2023. С. 163–166. (Форма участі – заочна).

*Здобувачу особисто належить визначення коефіцієнта взаємного опромінення між покрівлею вертикального сталевго резервуара і полум'ям пожежі горючої рідини в сусідньому резервуарі.*

12. Басманов О. Є., **Максименко М. В.** Моделювання теплового впливу пожежі в резервуарі на покрівлю сусіднього резервуара. III Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми та перспективи розвитку фундаментальних, прикладних, загальнотехнічних та безпекових наук». Київ. 2023. С. 8–12. (Форма участі – заочна).

*Здобувачу особисто належить розв'язання рівняння теплопровідності для покрівлі резервуара в умовах теплового впливу пожежі. Визначено динаміку зміни і розподіл температур по покрівлі вертикального сталевго резервуара.*

13. Басманов О. Є., **Максименко М. В.** Оптимізація сил та засобів для охолодження резервуарів при пожежі в резервуарній групі. XV Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». НУЦЗУ. 2024. С. 9-10. (Форма участі – очна).

*Здобувачем особисто проведено визначення сил та засобів для подачі води на охолодження резервуара в умовах пожежі, при якій досягається охолодження його сталевих конструкцій до безпечних значень температури..*

14. Басманов О. Є., **Максименко М. В.** Моделювання охолодження покрівлі вертикального сталевго резервуара. Міжнародна науково-практична конференція «Problems of Emergency Situations – 2024». НУЦЗУ. 2024. С. 170-171. (Форма участі – очна).

*Здобувачем особисто побудовано модель охолоджувальної дії водної плівки на покрівлю резервуара в умовах теплового впливу пожежі в сусідньому резервуарі.*

## **Патенти**

15. Пат. 146808 Україна, МПК А62С 3/06, А62С 35/00, А62С 31/05. Пожежний монітор / Абрамов Ю.О., Басманов О.Є., **Максименко М.В.**; заявник і патентовласник Національний університет цивільного захисту України. – заявл. 18.11.2020; опубл. 17.03.2021. Державний реєстр патентів України на корисні моделі. Бюл. № 11.

*Здобувачем особисто проведено патентний пошук, визначено кут встановлення насадка в вертикальній площині і кут розпилу води в горизонтальній площині.*



**ДОДАТОК Б**  
**Акти впровадження результатів досліджень**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Начальник 6 державного пожежно-рятувального загону ГУ ДСНС України у Луганській області

Ігор КАРПУНІН

« 15 » лютого 2024 р.

**АКТ**

про впровадження результатів дисертаційної роботи Максименка Максима Володимировича у 6 державному пожежно-рятувальному загоні ГУ ДСНС України у Луганській області

Комісія у складі: начальника 6 державного пожежно-рятувального загону ГУ ДСНС України у Луганській області Ігора КАРПУНІНА, заступника начальника 22 державної пожежно-рятувальної частини 6 державного пожежно-рятувального загону ГУ ДСНС України у Луганській області Руслана ЦИГАНКА, начальника караулу 6 державної пожежно-рятувальної частини 6 державного пожежно-рятувального загону ГУ ДСНС України у Луганській області Олександра ГРЕЧАНИКА склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи «Підвищення ефективності локалізації надзвичайних ситуацій техногенного характеру, пов'язаних зі зберіганням нафтопродуктів» у вигляді:

- моделей теплового впливу пожежі на резервуари з нафтопродуктом;
- методів розрахунку необхідної інтенсивності подачі води на охолодження покрівлі і стінок резервуарів

впроваджені для розробки планів пожежогасіння та організаційно-технічних заходів щодо попередження, локалізації та гасіння пожеж резервуарів «РВС». Використання цих результатів дозволило обґрунтовано сформувані можливі варіанти застосування сил і засобів в умовах їхнього дефіциту, підвищити ефективність проведення протипожежних заходів, спрямованих на локалізацію і гасіння пожеж резервуарів «РВС».

Члени комісії:



Ігор КАРПУНІН



Руслан ЦИГАНОК



Олександр ГРЕЧАНИК

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Начальник 8 державного пожежно-рятувального загону ГУ ДСНС України у Луганській області

Андрій ТОЧОНІЙ



« 6 жовтня » 2024 р.

**АКТ**

про впровадження результатів дисертаційної роботи Максименка Максима Володимировича «Підвищення ефективності локалізації надзвичайних ситуацій техногенного характеру, пов'язаних зі зберіганням нафтопродуктів» у 8 державному пожежно-рятувальному загоні ГУ ДСНС України у Луганській області

Складений комісією у складі:

Голова комісії: начальник 8 державного пожежно-рятувального загону ГУ ДСНС України у Луганській області Андрій ТОЧОНІЙ

Члени комісії:

начальник караулу 28 державної пожежно-рятувальної частини 8 державного пожежно-рятувального загону ГУ ДСНС України у Луганській області Артем КОВАЛЬОВ;

начальник караулу 29 державної пожежно-рятувальної частини 8 державного пожежно-рятувального загону ГУ ДСНС України у Луганській області Дмитро ВОРОБІЙОВ.

Комісія склала даний акт про те, що отримані в дисертаційній роботі моделі охолодження стінки і покрівлі резервуару, алгоритми розрахунку температури сухої стінки і покрівлі резервуару у вигляді програмного комплексу були використані для розробки планів пожежогасіння в резервуарних парках з нафтопродуктами. Застосування вказаних моделей, алгоритмів і програм виявило найбільш пожежонебезпечні напрямки. На їх підставі були розроблені вимоги до складання планів пожежогасіння на підприємствах і внесено корективи у вже існуючі плани. Навчання на складах з сировою нафтою, проведені на основі скорегованих планів, показали зменшення використання води для охолодження резервуарів на 23% у порівнянні з вже існуючими планами. При цьому було досягнуто необхідного ступеню охолодження стінки резервуара.

Голова комісії:

Андрій ТОЧОНІЙ

Члени комісії:

Артем КОВАЛЬОВ

Дмитро ВОРОБІЙОВ



**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Проректор з навчальної та методичної роботи Національного університету цивільного захисту України,  
докт. техн. наук, проф. Ірина ПЛОЧКА

«5» \_\_\_\_\_ 2024 р.


**АКТ**

про впровадження матеріалів  
дисертаційної роботи ад'юнкта Максима МАКСИМЕНКА  
у навчальний процес кафедри пожежної та рятувальної підготовки  
факультету оперативно-рятувальних сил  
Національного університету цивільного захисту України

Комісія у складі: начальника кафедри пожежної та рятувальної підготовки НУЦЗ України канд. техн. наук, доцента Павла КОВАЛЬОВА, доцента кафедри пожежної та рятувальної підготовки НУЦЗ України докт. техн. наук, професора Руслана МЕЛЕЩЕНКА, доцента кафедри пожежної та рятувальної підготовки НУЦЗ України канд. техн. наук, доцента Павла БОРОДИЧА склала цей акт про впровадження результатів дисертаційної роботи «Підвищення ефективності локалізації надзвичайних ситуацій техногенного характеру, пов'язаних зі зберіганням нафтопродуктів» у навчальний процес і стверджує, що матеріали даної роботи використовуються при викладанні дисциплін:

- «Засоби індивідуального та колективного захисту», в темі «Робота в АСП в теплодимокамері розвідка в промисловій зоні в умовах воєнного стану» освітньо-наукових програм «Пожежна безпека» та «Пожежогасіння та аварійнорятувальні роботи» для підготовки фахівців першого (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, ступеня вищої освіти «Бакалавра» зі спеціальності 261 «Пожежна безпека» галузі знань 26 «Цивільна безпека».

- «Пожежно-рятувальна та загальна фізична підготовка», в темі «Робота в АСП в ТДК (розвідка в промисловій зоні)» освітньо-наукових програм «Пожежна безпека» та «Пожежогасіння та аварійнорятувальні роботи» для підготовки фахівців першого (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, ступеня вищої освіти «Бакалавра» зі спеціальності 261 «Пожежна безпека» галузі знань 26 «Цивільна безпека».

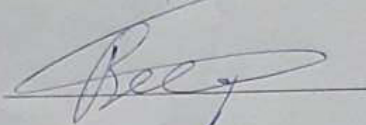
- «Засоби індивідуального захисту людини», в темі «Робота в АСП в теплодимокамері (виконання оперативних завдань в промисловій зоні)» освітньо-наукової програми «Цивільний захист» для підготовки фахівців першого (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, ступеня вищої освіти

«Бакалавра» зі спеціальності 263 «Цивільна безпека» галузі знань 26 «Цивільна безпека».

- «Засоби індивідуального захисту людини», в темі «Робота в АСП в теплдимокамері (розвідка в промисловій зоні)» освітньо-наукової програми «Інженерне забезпечення саперних, піротехнічних та вибухових робіт» для підготовки фахівців першого (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, ступеня вищої освіти «Бакалавра» зі спеціальності 263 «Цивільна безпека» галузі знань 26 «Цивільна безпека».

Члени комісії:

  
Павло КОВАЛЬОВ

  
Руслан МЕЛЕЩЕНКО

  
Павло БОРОДИЧ