

УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

Басманов Олексій Євгенович

УДК 621.3

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ КАСКАДНОГО
РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПОЖЕЖІ В РЕЗЕРВУАРНИХ ПАРКАХ З
НАФТОПРОДУКТАМИ І ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЇЇ ЛІКВІДАЦІЇ**

Спеціальність 21.06.02 – Пожежна безпека

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Харків – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Університеті цивільного захисту України, МНС України, м. Харків

Науковий консультант

доктор технічних наук, професор
Абрамов Юрій Олексійович,
Університет цивільного захисту України,
головний науковий співробітник.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Беліков Анатолій Серафимович,
Придніпровська державна академія будівництва і
архітектури,
професор кафедри безпеки життєдіяльності;

доктор технічних наук, професор
Фомін Станіслав Леонідович,
Харківський державний технічний університет будівництва
і архітектури,
професор кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій;

доктор технічних наук, професор
Пузач Сергій Вікторович,
Академія державної протипожежної служби МНС
Російської Федерації,
начальник кафедри теплофізики і гідравліки.

Провідна установа

Севастопольський військово-морський інститут
ім. П.С. Нахімова,
Міністерство оборони України, м. Севастополь.

Захист відбудеться " ____ " _____ 2006 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.707.01 в Університеті цивільного захисту України за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевського, 94.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Університету цивільного захисту України за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевського, 94.

Автореферат розіслано " ____ " _____ 2006 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Чуб І.А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Резервуарні парки є основним місцем зберігання нафти і нафтопродуктів в процесі їх переробки і транспортування. Велике скупчення легкозаймистих і горючих рідин на порівняно невеликій площі призводить до високого рівня пожежної небезпеки. У разі виникнення пожежі її тепловий вплив може призвести до займання або вибуху сусідніх резервуарів, тобто призвести до каскадного розвитку аварійної ситуації. Такі групові пожежі причиняють значні матеріальні втрати, наносять серйозний удар екологічній системі району, що прилягає до місця пожежі, і призводять до загибелі людей.

Враховуючи збільшення об'ємів споживання нафтопродуктів як в Україні, так і в світі, можна очікувати подальшого ускладнення ситуації. Небезпека збільшується і у зв'язку з ростом резервуарних парків і збільшенням об'ємів резервуарів.

Проектування резервуарних парків, їх протипожежний захист, дії пожежних підрозділів по захисту резервуарів регламентується рядом нормативних документів. Але, не зважаючи на заходи, що вживаються, кількість пожеж в резервуарних парках залишається практично незмінною протягом останніх 30 років. В середньому в резервуарних парках на території СНД відбувається близько 12 великих пожеж на рік. З них в Україні відбувається 2 пожежі кожні 3 роки. При цьому кожна четверта пожежа має затяжний характер і закінчується повним вигоранням нафтопродукту. Це означає як недостатність сил та засобів або неефективне їх використання, так і недостатнє врахування різноманітних факторів, що впливають на розвиток пожежі.

Розв'язання цієї проблеми потребує побудови комплексу математичних моделей, що адекватно описують тепловий вплив пожежі на резервуар з нафтопродуктом, визначення кількості сил та засобів, достатніх для локалізації і ліквідації пожежі, розробки рекомендацій пожежним підрозділам.

Процеси горіння рідин досліджувались В.І. Бліновим, Г.М. Худяковим, В.Ч. Реуттом, І.І. Петровим, пожежна безпека резервуарів з нафтопродуктами розглядалася в роботах О.М. Волкова, О.О. Абросімова, М.Г. Топольського, А.Ф. Федорова, Ю.О. Абрамова, D. Burgess, G. Markstein, форма факела і теплове випромінювання від нього вивчалися в роботах D. Drysdale, Л.М. Куценко, О.П. Созніка, питання тепломасообміну досліджувалися Х.І. Ісхаковим, Р.Ш. Хабібুলіним, Є.М. Логачевим, С.В. Пузачем, поведінка водного струменя проаналізована в роботах Г.Н. Абрамовича, В.П. Ольшанського, застосування піни для гасіння пожежі нафтопродуктів вивчалось А.Ф. Шароварніковим, В.П. Молчановим, С.С. Воеводіним, С.А. Шароварніковим.

Традиційні методи розрахунку небезпеки теплового впливу пожежі на резервуари з нафтопродуктом ґрунтуються на спрощених моделях нагріву резервуару під тепловим випромінюванням полум'я. В них, як правило, нагрів частини резервуара, зверненої у бік факелу, вважається рівномірним. В той же час, різний кут

падіння теплового випромінювання на поверхню, що нагрівається, здатний призводити до дуже нерівномірного нагріву, а значить, і до похибок при розрахунку небезпеки займання або вибуху. Існуючі моделі відносяться до детермінованого типу. Вони не враховують випадковостей, притаманних розвитку пожежі. Зокрема, не зважаючи на турбулентний характер горіння і викликані цим сильні пульсації полум'я, існуючі моделі розглядають ту або іншу форму факелу, вважаючи її незмінною у часі, а також стали температуру полум'я.

З іншого боку, сучасний розвиток обчислювальної техніки дозволяє виробити нові підходи до аналізу пожежної ситуації в резервуарному парку нафтопродуктів, врахувати випадковий характер розвитку пожежі, побудувати математичні моделі, що точніше описують нагрів резервуара під тепловим впливом пожежі. Такі моделі дають можливість оцінити можливі шляхи каскадного розповсюдження пожежі, виділити першочергові завдання, що постають перед пожежними підрозділами, і розробити план локалізації і ліквідації пожежі.

Таким чином, мінімізація збитків від пожеж на таких стратегічно важливих об'єктах як резервуарні парки є актуальною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до плану науково-дослідних робіт Університету цивільного захисту України в рамках науково-дослідних робіт: „Підвищення ефективності протипожежного захисту резервуарних парків” (№ ДР 0105U007378, відповідальний виконавець); „Розробка рекомендацій по розрахунку сил та засобів при організації гасіння пожеж на об'єктах підвищеної пожежної небезпеки” (№ ДР 0102U005932, відповідальний виконавець); „Гелеутворюючі вогнегасні склади на основі неорганічних сполук” (№ ДР 0104U004050, виконавець); „Вибір раціональних параметрів розміщення пожежно-технічного озброєння при проектуванні кузовів пожежних автомобілів” (№ ДР 0104U000678, виконавець).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка теоретичних основ попередження каскадного розповсюдження пожежі в резервуарних парках з нафтопродуктами і підвищення ефективності її ліквідації шляхом побудови і використання комплексу математичних моделей комбінованого типу.

Досягнення цієї мети потребує вирішення наступних задач.

1. Розробка математичної моделі теплової взаємодії резервуара з факелом пожежі і навколишнім середовищем, що враховує передачу тепла випромінюванням і конвекцією.

2. Теоретична розробка стохастичної моделі теплового випромінювання від полум'я нафтопродуктів і ідентифікація її параметрів.

3. Побудова стохастичної моделі нагріву резервуара з нафтопродуктом під тепловим впливом пожежі, що дозволяє знайти розподіл ймовірностей для його температури в довільний момент часу.

4. Розробка метода визначення ймовірності досягнення резервуаром температури самоспалахування парів нафтопродукту для оцінки ймовірності вибуху пароповітряної суміші в газовому просторі резервуара або виникнення факельного горіння на дихальних клапанах.

5. Побудова і ідентифікація параметрів моделі поведінки сталевих конструкцій резервуара, що горить, для оцінки ймовірності його деформації в умовах підвищених температур.

6. Аналіз детермінованої і стохастичної моделей нагріву резервуара під впливом пожежі, і з'ясування умов, при яких вони дають суттєво різні результати, тобто умов, за яких не можна нехтувати впливом випадкових факторів.

7. Побудова моделі взаємодії струменя води з нагрітою стінкою резервуара для розрахунку її охолоджувальної дії.

8. Розробка підходів по оцінюванню ефективності дій пожежних підрозділів по локалізації пожежі, заснованих на оцінці очікуваних втрат, в т.ч. і втрат, викликаних каскадним розповсюдженням пожежі.

9. Розробка метода і алгоритму оптимального розміщення сил та засобів для охолодження резервуарів, що горять, та сусідніх з ними, виявлення першочергових задач по охолодженню в умовах недостатності сил та засобів.

Об'єктом дослідження є нафта і нафтопродукти в вертикальних сталевих резервуарах (РВС) зі стаціонарною покрівлею.

Предметом дослідження є процеси, які відбуваються в резервуарах, що горять та не горять; оптимізація дій пожежних підрозділів.

Методи дослідження. У роботі використовуються аналітичні, статистичні і чисельні методи досліджень. Моделювання нагріву резервуара з нафтопродуктом під тепловим впливом пожежі проводилося на основі теорії тепломасообміну. Розрахунок коефіцієнтів конвективної тепловіддачі від сталевих конструкцій в газове або рідке середовище виконувався із застосуванням методів теорії подібності. Чисельні методи застосовувалися для розв'язання систем диференціальних рівнянь і обчислення інтегралів, що виникають при знаходженні площ взаємного опромінювання. Для експериментального визначення ймовірнісних характеристик полум'я використовувалися методи математичної статистики. При побудові стохастичної моделі нагріву резервуара і розв'язання задачі про ймовірність досягнення резервуаром критичної температури застосовувалися методи теорії випадкових процесів. Для розв'язання задачі оптимального розміщення сил та засобів при локалізації пожежі в резервуарному парку використовувалися методи математичного програмування.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Подальший розвиток отримала детермінована модель нагріву резервуара з нафтопродуктом під тепловим впливом пожежі. Побудована модель більш точно описує процес нагріву резервуара завдяки врахуванню нерівномірного нагріву його

різних частин. Модель враховує променистий і конвективний теплообмін сталевих конструкцій резервуара.

2. Вперше запропоновано стохастичний підхід до прогнозування каскадного розвитку пожежі. Підхід базується на використанні теорії випадкових функцій для опису теплових процесів, що відбуваються у резервуарах, що горять та сусідніх з ними. Ідентифікацію законів і параметрів розподілів проведено на основі експериментальних даних. Побудовано імовірнісну оцінку розповсюдження пожежі на сусідні резервуари, що спирається на розрахунок ймовірності досягнення температури самоспалахування сталевими конструкціями резервуара протягом заданого проміжку часу.

3. Подальший розвиток отримали методи оцінки міцності сталевих конструкцій резервуарів, що горять. Побудовано імовірнісну оцінку часу деформації сухої стінки резервуара в умовах підвищених температур.

4. Вперше проведено порівняння стохастичного і детермінованого підходів до прогнозування розвитку пожежної ситуації в резервуарному парку. Виявлено умови, при яких обидва підходи дають результати, еквівалентні з точки зору часу досягнення температури самоспалахування резервуарами, що не горять, і умови, при яких впливом випадкових факторів не можна нехтувати.

5. Вперше сформульовано задачу оптимального розміщення сил та засобів для охолодження резервуарів при пожежі в резервуарному парку. Задача має детерміновану або стохастичну постановку в залежності від методу прогнозування розвитку пожежі. Побудовано алгоритм її розв'язання, що враховує обидві випадки.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені моделі, методи, алгоритми є основою для синтезу системи попередження, локалізації, ліквідації надзвичайних ситуацій в резервуарних парках нафтопродуктів. Використання комплексу моделей, методів, алгоритмів є найбільш ефективним на етапі проектування резервуарних парків і для оцінки пожежної небезпеки вже існуючих об'єктів.

Методи розрахунку теплового впливу пожежі на резервуари з нафтопродуктами, алгоритми розміщення сил та засобів для локалізації і гасіння пожежі було впроваджено на Кременчуцькому НПЗ. Виявлення найбільш пожежонебезпечних напрямків і варіантів розвитку пожежі призвело до внесення коректив в плани пожежегасіння і скорочення використання спецтехніки на 28%, розробки додаткових профілактичних заходів і зниження рівня пожежної небезпеки на 14%.

Впровадження автоматизованого програмного комплексу на ООТ „Торговий Будинок Харків нафтопродукт” дозволило виявити найбільш небезпечні аварійні ситуації. Було з'ясовано, що в найгіршому випадку розповсюдження пожежі від резервуару РВС-10000 до сусіднього станеться через 9 хвилин після її початку. Використання захисного екрану із сталевих листів дозволило зменшити тепловий

потік на 42%, внаслідок чого ймовірність самоспалахування парів нафти протягом перших 25 хвилин зменшилася до 10^{-3} . Такий час є достатнім для розгортання сил та засобів і початку охолодження резервуарів.

Моделі каскадного розповсюдження пожежі, програмне забезпечення по аналізу впливу теплового потоку пожежі на резервуари з нафтопродуктом було використано при розробці сценарію проведення комплексних навчань підрозділами ГУ МНС України в Харківській області на полігоні в с. Солоніцевка. Використання розроблених моделей дозволило скоротити час гасіння пожежі на 18% у порівнянні з нормативним.

Програмний комплекс моделювання пожежі в резервуарному парку використовується в учбовому процесі Університету цивільного захисту України і Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобильців. Перевірка знань курсантів засвідчила підвищення якості засвоєння знань на 30-40%.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є результатом самостійної роботи автора. Особистий внесок здобувача в працях, написаних у співавторстві, полягає в наступному. В монографії [1] розроблено детерміновану і стохастичну моделі процесів в резервуарах, що горять та не горять, сформульовано і розв'язано задачу оптимального розташування сил та засобів для локалізації пожежі в резервуарному парку. В [2] сформульовано задачу оптимального розташування стволів для охолодження резервуарів і побудовано алгоритм її розв'язання. В [3, 27] автором запропоновано математичну модель нагріву резервуара з нафтопродуктом, що враховує конвективний і променистий теплообмін. В роботі [28] запропоновано імовірнісну модель факела. В [4] побудовано систему диференціальних рівнянь для знаходження математичного сподівання температури резервуара, що нагрівається під впливом пожежі. В [5] знайдено оцінки математичного сподівання і дисперсії швидкості зміни температури резервуара. В роботі [6] знайдено стаціонарний розподіл температур резервуара, що нагрівається від факелу іншого резервуара. В [7, 25] побудовано математичну модель охолодження резервуара з нафтопродуктом водою, яка дозволяє оцінити достатність охолодження і знайти час досягнення резервуаром критичної температури. В [8, 30] на основі теорії подібності побудовано оцінку конвективної тепловіддачі від сталеві стінки і покрівлі резервуара в навколишнє повітря і пароповітряну суміш в газовому просторі резервуара. В [9] побудовано систему диференціальних рівнянь для знаходження дисперсії температури резервуара, що нагрівається під впливом випадкового теплового потоку. В роботах [10, 26] дано оцінку часу досягнення сухою стінкою резервуара температури самоспалахування нафтопродукту. В [11, 14] побудовано математичну модель нагріву поверхневого шару нафтопродукту під впливом теплового потоку від сталевих конструкцій резервуара, що нагрілися. В [12] побудовано оцінки ймовірності деформації сухої стінки резервуара, що горить, і ймовірності досягнення температури самоспалахування резервуаром, що не горить. В роботі [15] побудовано

алгоритм обчислення площі поперечного перерізу факела. В [13] запропоновано метод оцінки невідомих теплових параметрів резервуара, що базується на лінійному наближенні залежності температури від цих параметрів. В [21, 22, 31, 32] проведено розрахунок сил та засобів, необхідних для гасіння пожежі в резервуарному парку. В [29, 33] розраховано тепловий потік, під який підпадають сили та засоби при локалізації і ліквідації пожежі. В роботі [23] проаналізовано вплив виду і параметрів кореляційної функції теплового потоку на температуру нагріву сухої стінки резервуара. В [24] запропоновано метод розрахунку імовірності досягнення критичної температури сухою стінкою резервуара у припущенні про лінійну залежність математичного сподівання температури від часу.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися й обговорювалися на шостій науково-практичній конференції „Пожежна безпека” (Харків, 2003); другій міжнародній науково-практичній конференції „Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация” (Мінськ, 2004); вісімнадцятій науково-практичній конференції „Снижение риска гибели людей на пожарах” (Москва, 2003); тринадцятій науково-практичній конференції „Системы безопасности” (Москва, 2004); другій міжнародній науково-практичній конференції „Шляхи автоматизації, інформатизації та комп’ютеризації діяльності МНС України” (Харків, 2005); міжнародній науково-практичній конференції „Пожежна і техногенна безпека” (Черкаси, 2005); третій міжнародній науково-практичній конференції „Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация” (Мінськ, 2005); сьомій Всеукраїнській науково-практичній конференції „Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи” (Київ, 2005).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 1 монографії, 23 наукових статтях, що включені до переліку ВАК, 9 тезах доповідей і матеріалах науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків та 5 додатків на 31 сторінці. Загальний обсяг роботи – 371 сторінка. Дисертація містить 91 ілюстрацію, 14 таблиць, список використаних джерел із 311 найменувань на 30 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В першому розділі розглянуто сучасний стан проблеми пожежної безпеки резервуарних парків нафтопродуктів і попередження каскадного розповсюдження пожежі. Наведено класифікацію резервуарів для зберігання нафтопродуктів і класифікацію резервуарних парків, розглянуто статистику пожеж в резервуарних парках, проаналізовано існуючі моделі горіння нафтопродукту, теплового випромінювання від факела, нагріву резервуара з нафтопродуктом.

Характер можливого поширення пожежі в резервуарному парку визначається концентрацією парів нафтопродукту в газовому просторі резервуара і на виході з його дихальних пристроїв. Якщо концентрація парів лежить між нижньою і верхньою концентраційними межами розповсюдження полум'я (НКМРП і ВКМРП), то поява джерела запалювання (іскри або нагрітих до температури самоспалахування сталевих конструкцій) здатна призвести до вибуху резервуара або виникненню факельного горіння на дихальних пристроях.

Тип резервуара суттєво впливає на його пожежну небезпеку. Найбільш поширеним типом резервуара є вертикальний сталевий резервуар (РВС) із стаціонарною покрівлею (з понтоном, або без понтона).

Резервуари без понтону характеризуються найбільшими втратами нафтопродукту шляхом його випаровування. Це пов'язано з великою площею вільної поверхні нафтопродукту. Групові пожежі викликані, як правило, загальною загазованістю і часто обмежуються стабільним горінням на дихальних пристроях. У разі зберігання бензину поширенню вогню на поверхню рідини заважає те, що концентрація парів в газовому просторі перевищує ВКМРП. При зберіганні сирової нафти концентрація її парів в газовому просторі резервуара лежить в концентраційних межах розповсюдження полум'я. В такому випадку існує загроза вибуху резервуара.

Понтон зменшує втрати нафтопродукту випаровуванням, а значить і загальну загазованість території парку. Але його використання має і негативні наслідки: концентрація парів в газовому просторі виявляється нижчою за ВКМРП, і як бензин, так і сира нафта утворюють вибухонебезпечні суміші. Крім того, понтон може стати джерелом запалювання при ударі о покрівлю або при перекосі і падінні.

Дослідження теплового впливу пожежі на резервуар потребує моделювання факелу над нафтопродуктом, що горить, і моделювання впливу теплового потоку на резервуар з нафтопродуктом. Існуючі моделі факелу над нафтопродуктом, що горить, відносяться до класу детермінованих. Вони ґрунтуються на припущенні про незмінність форми факелу – вона розглядається у вигляді конуса, циліндра, сфери тощо. При цьому не враховуються випадкові пульсації полум'я, пов'язані з турбулентним характером горіння. Внаслідок цього тепловий потік від факелу є не сталим, як його розглядають більшість моделей, а випадковою функцією часу. Випадковою буде і температура резервуара, що нагрівається під впливом теплового потоку. Стохастичні моделі, що здатні на імовірнісному рівні описати нагрів резервуара з нафтопродуктом, відсутні.

При дослідженні впливу теплового потоку від пожежі на резервуар з нафтопродуктом, як правило, стінка резервуара умовно розділяється на дві частини: обернену в бік факела і обернену в протилежний бік. При цьому вважається, що тепловий потік рівномірно розподілений по стінці резервуара, оберненої в бік пожежі, а її температура однакова. Насправді тепловий потік не є рівномірним – на

конкретному прикладі показано, що його максимальна величина може в 3,5 рази перевищувати середнє значення (рис. 1). Експерименти показують, що нерівномірний розподіл температур не може виправити і теплопровідність сталі. Ігнорування нерівномірного нагріву резервуару призводить до того, що прогноз часу досягнення резервуаром критичної температури суттєво відрізняється від реальності.

Основним засобом захисту резервуара від перегріву є його охолодження водою. Основне навантаження по охолодженню лягає на пересувну техніку.

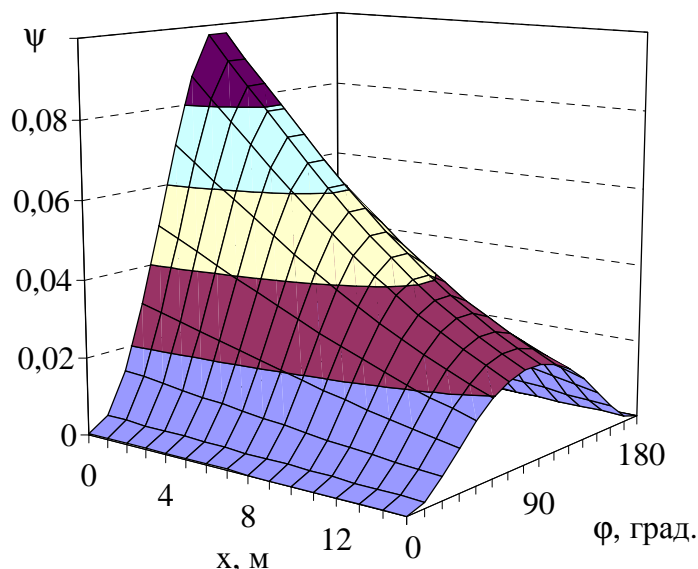


Рис. 1. Розподіл коефіцієнта взаємного опромінення ψ по стінці резервуара РВС-10000, зверненої в бік факела, в залежності від відстані x до верхнього краю стінки і кута φ , відкладеного вздовж периметра резервуара

Незважаючи на детально розроблені моделі поведінки водяного струменя в повітрі, його траєкторії, максимальної дальності тощо, на сьогоднішній день відсутні моделі, які б враховували охолоджуючий вплив водних струменів на нагріті сталеві конструкції резервуару. В рекомендаціях щодо гасіння пожеж в резервуарних парках наводяться рекомендовані інтенсивності подачі води на охолодження резервуара, що горить, та сусідніх з ним. Але без відповіді залишається питання про наслідки недостатньої інтенсивності охолодження. Це питання є особливо актуальним на початковій стадії пожежі, коли спостерігається недостатня кількість сил та засобів. Це призводить до задачі оптимального розташування сил та засобів для локалізації пожежі і розподілу бойових завдань між ними.

В **другому розділі** побудовано детерміновану модель нагріву резервуара з нафтопродуктом під тепловим впливом пожежі. Особливістю моделі є врахування нерівномірного нагріву резервуара.

Показано, що при розгляді теплового потоку від резервуара, що горить, до сусіднього теплопередача випромінюванням на чотири порядки більша порівняно з теплопередачею теплопровідністю. Конвекційний переніс також не має суттєвого впливу, оскільки продукти горіння і розігріте повітря підіймаються вгору, а збоку до зони горіння надходить повітря. Наявність вітру не змінює картини, оскільки

характерна швидкість висхідного потоку в полум'ї складає 10-15 м/с. Виключенням є лише ураганний вітер, здатний нахилити полум'я майже горизонтально.

В роботі сформульовано і обґрунтовано припущення, на яких базується математична модель нагріву РВС з нафтопродуктом і стаціонарною покрівлею.

Для врахування нерівномірного нагріву резервуар розбито на n сегментів з кутом $\Delta\phi$ вертикальними площинами, що проходять через вісь резервуара. Додатково покрівлю резервуара і поверхню нафтопродукту розбито на m_1 кілець рівної товщини Δr , а стіну резервуара на m_2 частин рівної висоти Δh (рис. 2). Загалом це дає $N_1 = n(m_1 + m_2)$ областей, на які поділено поверхню резервуара і $N_2 = nm_1$ областей, на які поділено поверхню нафтопродукту.

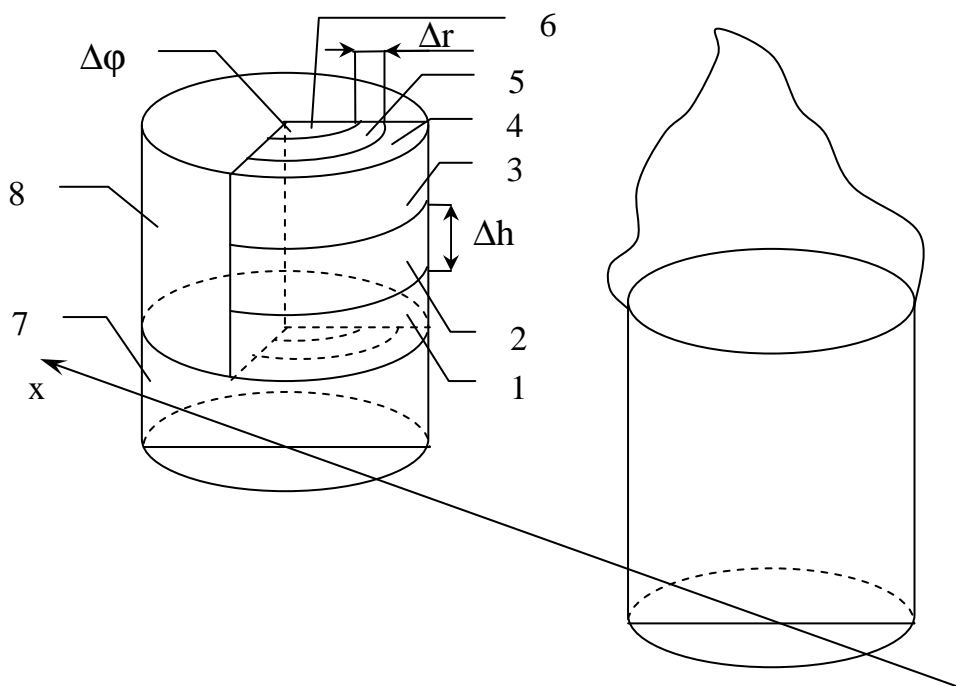


Рис. 2. Розбиття поверхні резервуара, що нагрівається, на окремі області; 1-3 – суха стінка; 3-6 – покрівля; 7 – нафтопродукт; 8 – газовий простір резервуара

Для кожної з N_1 областей сталеві поверхні резервуара рівняння балансу енергії має вигляд:

$$\frac{dT_k}{dt} = \frac{\epsilon_c c_0}{S_k \delta \rho_c c_c} \left[\epsilon_\phi H_k^+ \left(\left(\frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \epsilon_c \sum_{i=1}^{N_1+N_2} H_{ik} \left(\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \left(\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) (S_k - H_k^+) \right] + \frac{\alpha_r (T_r - T_k)}{\delta \rho_c c_c} + \frac{\alpha_b (T_0 - T_k)}{\delta \rho_c c_c}, \quad k = 1, 2, \dots, N_1, \quad (1)$$

де ϵ_c , ρ_c , c_c – ступінь чорноти, щільність, теплоємність сталі; δ – товщина сталевих листів резервуара; S_k – площа поверхні області k ; ϵ_ϕ , T_ϕ – ступінь чорноти і

температура факела; T_k – температура області k ; H_{ik} – площа взаємного опромінення між областями i , k ; H_k^+ – площа взаємного опромінення між областю k і факелом; T_0 , T_r – температура навколишнього середовища і пароповітряної суміші в газовому просторі резервуара; α_b , α_r – коефіцієнт конвективної тепловіддачі від сталевих конструкцій резервуара в навколишнє повітря і пароповітряну суміш; $c_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$.

Прогрів нафтопродукту в глибину розглядається як нагрів напівнескінченого стержню:

$$\frac{\partial T_k}{\partial t} = \frac{\lambda_n}{c_n \rho_n} \frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2}, \quad t > 0, \quad 0 < x < \infty, \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial T_k}{\partial x} \right|_{x=0} = -\frac{1}{\lambda_n S_k} q_k(t), \quad T_k|_{t=0} = T_0, \quad k = N_1 + 1, \dots, N_1 + N_2, \quad (3)$$

де $T_k(x, t)$ – температура нафтопродукту в області k на глибині x в момент часу t ; λ_n , c_n , ρ_n – теплопровідність, теплоємність та щільність нафтопродукту; $q_k(t)$ – тепловий потік, що отримує поверхня нафтопродукту за рахунок променистого теплообміну з стінками і покрівлю резервуара і конвективного теплообміну з пароповітряною сумішшю:

$$q_k(t) = c_0 \varepsilon_n \varepsilon_c \sum_{i=1}^{N_1} H_{ik} \left(\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \alpha_r (T_r - T_k) S_k, \quad k = N_1 + 1, \dots, N_2, \quad (4)$$

де ε_n – ступінь чорноти нафтопродукту.

Рівняння балансу енергії для пароповітряної суміші в газовому просторі:

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{\alpha_r}{V_r \rho_r c_p} \sum_{k=1}^{N_1+N_2} (T_k - T_r) S_k, \quad (5)$$

де V_r – об'єм газового простору резервуара; ρ_r , c_p – щільність пароповітряної суміші і її теплоємність при сталому тиску.

Система рівнянь (1)-(5) дозволяє знайти розподіл температур по резервуару в довільний момент часу t . Для її розв'язання можуть бути використані чисельні методи. Коефіцієнти конвективної тепловіддачі в навколишнє повітря і пароповітряну суміш резервуара визначаються за допомогою теорії подібності. Для вертикальної поверхні:

$$\alpha = 0,135\lambda \left(\frac{\Delta T g Pr}{T \nu^2} \right)^{1/3}, \quad (6)$$

де λ , ν – теплопровідність і в'язкість середовища (повітря або пароповітряної суміші) при температурі T – середній між температурами середи і поверхні; ΔT – різниця між температурами середовища і поверхні; Pr – число Прандтля; g – прискорення вільного падіння. Для знаходження коефіцієнта конвекційної тепловіддачі від горизонтальної поверхні в холодне середовище над поверхнею або в гаряче середовище під поверхнею, необхідно збільшити вираз (6) на 30%, в протилежному випадку – зменшити на 30%. Значення α , отримані за допомогою формули (6), узгоджуються з результатами експериментів, описаних в літературі.

На рис. 3, 4 наведено результати моделювання нагріву резервуара РВС-10000 (діаметром 28,5 м, висотою 18 м), заповненого нафтою до рівня 12 м від факела такого ж резервуара, що знаходиться на відстані 21 м. При цьому резервуар розбито на $n = 16$ сегментів ($\Delta\phi = \pi/8$), $m_1 = m_2 = 3$ ($\Delta h = 2$ м, $\Delta r = 4,75$ м) – рис. 2.

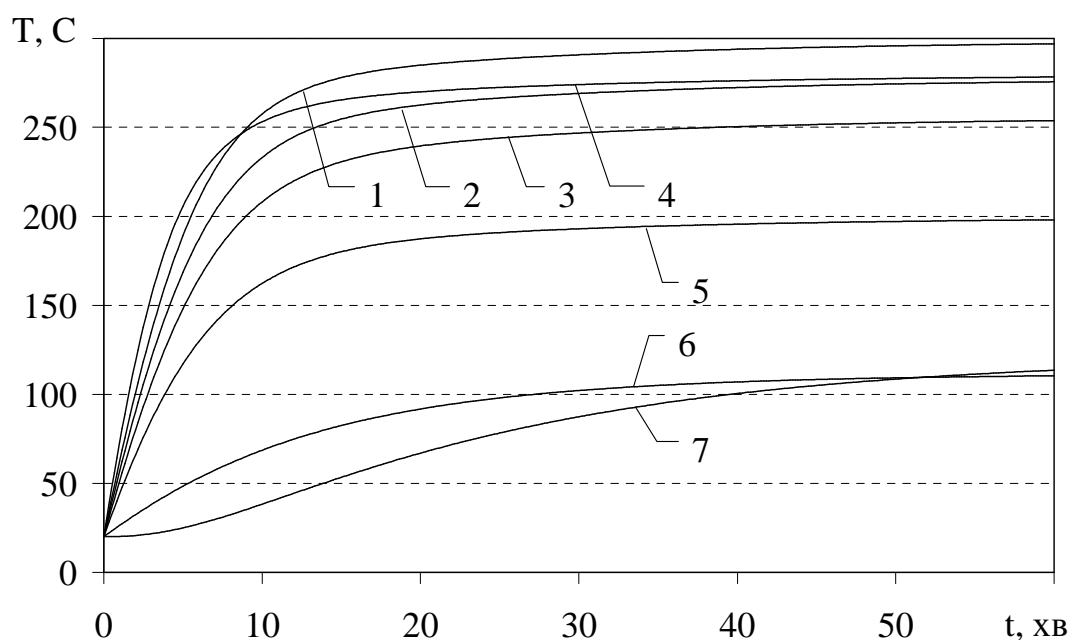


Рис. 3. Динаміка зміни температури частини резервуара з нафтопродуктом, оберненої в бік пожежі (рис. 2): 1-3 – суха стіна; 4-6 – покрівля; 7 – пароповітряна суміш; 8 – поверхня нафтопродукту

Рисунок 4 ілюструє нерівномірний нагрів стінки (різниця між температурами областей 1 і 3 одного сегменту складає біля 15%) і покрівлі резервуара (різниця між температурами областей 4 і 6 складає близько 60%). Нагрів резервуара вздовж півпериметра, оберненого в бік факелу ($90 < \phi < 270$), також дуже нерівномірний. Розрахунки показують, що ігнорування нерівномірного нагріву (що еквівалентно вибору параметрів $n = 4$, $m_1 = m_2 = 1$) призводить до помилок в прогнозуванні температури близько 30%.

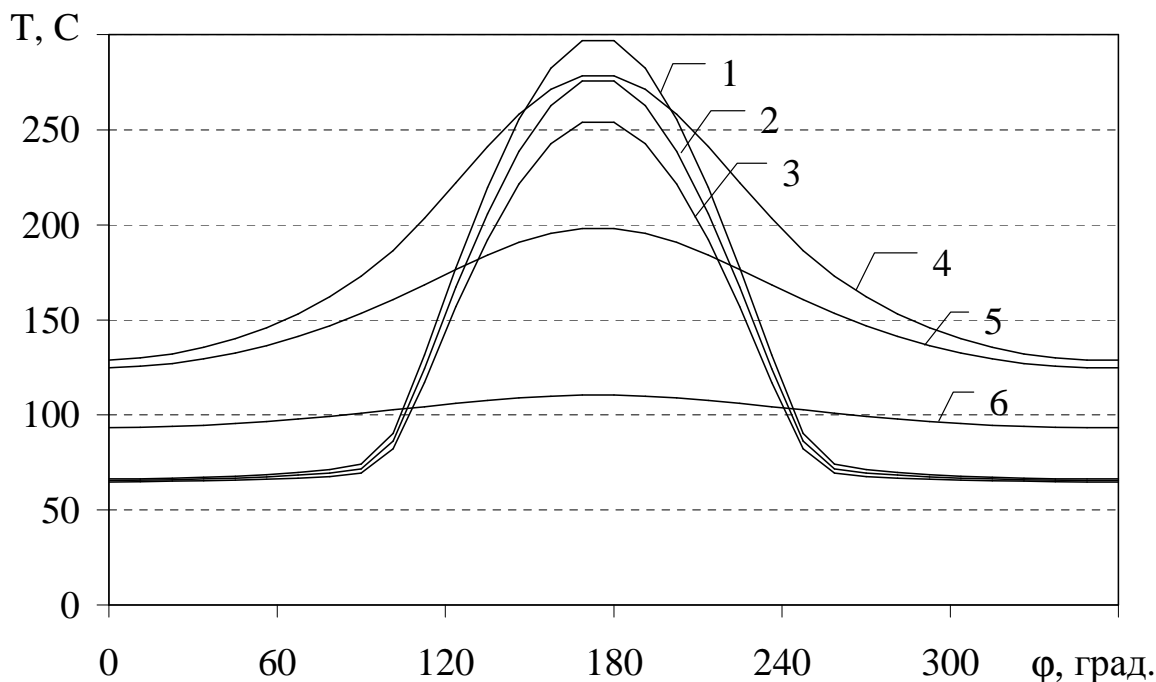


Рис. 4. Розподіл температури по поверхні резервуара через 60 хвилин: 1-3 – суха стіна (рис. 2); 4-6 – покрівля (рис. 2)

В третьому розділі побудовано стохастичну модель нагріву РВС з нафтопродуктом, яка враховує випадковість теплового потоку від пожежі, викликану випадковими пульсаціями форми факелу і його температури. В цьому випадку температура факела і площі взаємного опромінення між факелом і резервуаром, що входять до формули (1), будуть випадковими функціями.

Наслідком пульсацій форми полум'я є випадкові зміни площі поперечного перерізу факела $\zeta(t)$ і площі взаємного опромінення між областями резервуара і факелом $\eta_k(t)$. При побудові моделі припускається, що:

$$\eta_k(t) = \xi(t)H_k^+, \quad \zeta(t) = \xi(t)S,$$

де $\xi(t)$ – випадковий процес, стаціонарний в широкому розумінні, $M\xi(t) = 1$. Це дозволяє визначити характеристики випадкових процесів $\eta_k(t)$ (закон і параметри розподілу, кореляційну функцію) через характеристики випадкового процесу $\zeta(t)$. Для визначення імовірнісних характеристик випадкових пульсацій площі поперечного перерізу факела $\zeta(t)$ і його температури $\theta(t)$ була проведена серія експериментів, в яких проводилася відео-зйомка горіння мазуту в моделі резервуара, розливу гасу. На кожному кадрі визначалася площа поперечного перерізу, що дозволило оцінити дисперсію пульсацій σ_ξ та кореляційну функцію $K_\xi(\tau)$. Зв'язок між температурою абсолютно чорного тіла і його кольором дозволяє оцінити дисперсію середньої температури факела і її кореляційну функцію, також виходячи з відеозапису процесу горіння.

Проведені експерименти дозволяють зробити висновок про сумісний нормальний закон розподілу стаціонарного процесу (ξ, θ) з кореляційними функціями виду $K_\xi(\tau) = \sigma_\xi^2 e^{-\alpha_\xi |\tau|}$, $K_\theta(\tau) = \sigma_\theta^2 e^{-\alpha_\theta |\tau|}$ і взаємною кореляційною функцією $K_{\xi\theta}(\tau) = r \sigma_\xi \sigma_\theta e^{-\alpha_{\xi\theta} |\tau|}$, де σ_ξ^2 , σ_θ^2 – дисперсії випадкових процесів ξ , θ ; r – коефіцієнт кореляції між ними, $r \sim 0,6 \div 0,7$. Діапазони зміни параметрів кореляційних функцій наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри кореляційних функцій

Кореляційна функція	Середньоквадратичне відхилення, в долях від середнього значення	α , c^{-1}
Площа поперечного перерізу факела	0,1 ÷ 0,3	0,1 ÷ 0,5
Температура поверхні факела	0,03 ÷ 0,06	0,3 ÷ 3
Взаємна	-	0,3 ÷ 1

Із врахуванням випадкових змін температури факела і площ взаємного опромінення рівняння теплового балансу (1) для області k поверхні резервуара набуває вигляду

$$\frac{dT_k}{dt} = \frac{\varepsilon_c c_0}{S_k \delta \rho_c c_c} \left[\varepsilon_\phi \xi(t) H_k^+ \left(\left(\frac{\theta(t)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \varepsilon_c \sum_{i=1}^{N_1+N_2} H_{ik} \left(\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \left(\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) (S_k - \xi(t) H_k^+) \right] + \frac{\alpha_r (T_r - T_k)}{\delta \rho_c c_c} + \frac{\alpha_b (T_0 - T_k)}{\delta \rho_c c_c}, \quad k = 1, 2, \dots, N_1. \quad (7)$$

В цьому випадку температури $T_k(t)$ будуть випадковими функціями. Визначити аналітично закон їх розподілу є неможливим внаслідок їх складної залежності від випадкових процесів $\xi(t)$ і $\theta(t)$. Для визначення закону розподілу $T_k(t)$ була проведена серія чисельних експериментів, в ході яких генерувалися реалізації процесів $\xi(t)$, $\theta(t)$ і розв'язувалася система рівнянь теплового балансу резервуара з нафтопродуктом. На основі експериментальних даних було висунуто і перевірено гіпотезу про нормальний закон розподілу випадкових функцій $T_k(t)$.

Нормальність закону розподілу для $T_k(t)$ дозволяє знайти його параметри (математичне сподівання $\bar{T}_k(t)$ і дисперсію σ_k^2) з рівнянь балансу енергії. Застосування оператора математичного сподівання до лівої і правої частини (7) дозволяє перейти до диференціальних рівнянь відносно математичних сподівань:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{T}_k}{dt} = & \frac{\varepsilon_c c_0}{S_k \delta \rho_c c_c} \left[\varepsilon_\phi H_k^+ \left(\left(\frac{\tilde{T}_\phi}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_k}{100} \right)^4 \right) + \varepsilon_c \sum_{i=1}^{N_1+N_2} H_{ik} \left(\left(\frac{\bar{T}_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_k}{100} \right)^4 \right) + \right. \\ & \left. + \left(\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_k}{100} \right)^4 \right) (S_k - H_k^+) \right] + \frac{\alpha_r (\bar{T}_r - \bar{T}_k)}{\delta \rho_c c_c} + \frac{\alpha_b (T_0 - \bar{T}_k)}{\delta \rho_c c_c}, \quad k=1,2,\dots,N_1, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{де } \tilde{T}_\phi = \sqrt[4]{\bar{T}_\phi^4 + 4r\bar{T}_\phi^3 \sigma_\xi \sigma_\theta + 6\bar{T}_\phi^2 \sigma_\theta^2 + 12r\bar{T}_\phi \sigma_\xi \sigma_\theta^3 + 3\sigma_\theta^4}.$$

Рівняння (7) також дозволяє перейти до рівнянь для дисперсій $\sigma_k^2(t)$ і кореляційних функцій $K_{\xi k}(t)$, $K_{\theta k}(t)$ випадкових процесів $T_k(t)$ і $\xi(t)$ та $T_k(t)$ і $\theta(t)$ відповідно:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_k^2}{dt} = & \frac{2\varepsilon_c c_0}{S_k \delta \rho_c c_c} \left[\varepsilon_\phi H_k^+ \left(\frac{A}{100^4} - \frac{\bar{T}_k^4 K_{\xi k} + 4\bar{T}_k^3 \sigma_k^2}{100^4} \right) + 4\varepsilon_c \sum_{i=1}^{N_1+N_2} H_{ik} \left(\frac{\bar{T}_i^3 \sigma_i \sigma_k}{100^4} - \frac{\bar{T}_i^3 \sigma_k^2}{100^4} \right) - \right. \\ & \left. - H_k^+ \left(\frac{K_{\xi k} T_0^4}{100^4} - \frac{\bar{T}_k^4 K_{\xi k} + 4\bar{T}_k^3 \sigma_k^2}{100^4} \right) - \frac{4\bar{T}_k^3 \sigma_k^2}{100^4} S_k \right] - 2\sigma_k^2 \frac{\alpha_r + \alpha_b}{\delta \rho_c c_c}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{dK_{\xi k}}{dt} = & \frac{\varepsilon_c c_0}{S_k \delta \rho_c c_c} \left[\varepsilon_\phi H_k^+ \left(\frac{B_\phi}{100^4} - \frac{B_k}{100^4} \right) + 4\varepsilon_c \sum_{i=1}^{N_1+N_2} H_{ik} \left(\frac{\bar{T}_i^3 K_{\xi i}}{100^4} - \frac{\bar{T}_i^3 K_{\xi k}}{100^4} \right) - \right. \\ & \left. - H_k^+ \left(\sigma_\xi^2 \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \frac{B_k}{100^4} \right) - \frac{4\bar{T}_k^3 K_{\xi k}}{100^4} S_k \right] - K_{\xi k} \frac{\alpha_r + \alpha_b}{\delta \rho_c c_c} - \alpha_\xi K_{\xi k}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{dK_{\theta k}}{dt} = & \frac{\varepsilon_c c_0}{S_k \delta \rho_c c_c} \left[\varepsilon_\phi H_k^+ \left(\frac{C_\phi}{100^4} - \frac{C_k}{100^4} \right) + 4\varepsilon_c \sum_{i=1}^{N_1+N_2} H_{ik} \left(\frac{\bar{T}_i^3 K_{\theta i}}{100^4} - \frac{\bar{T}_i^3 K_{\theta k}}{100^4} \right) - \right. \\ & \left. - H_k^+ \left(K_{\xi \theta} \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \frac{C_k}{100^4} \right) - \frac{4\bar{T}_k^3 K_{\theta k}}{100^4} S_k \right] - K_{\theta k} \frac{\alpha_r + \alpha_b}{\delta \rho_c c_c} - \alpha_\theta K_{\theta k}, \quad k=1,2,\dots,N_1, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{де } B_\phi = \bar{T}_\phi^4 \sigma_\xi^2 + 4\bar{T}_\phi^3 K_{\xi \theta} + 6\bar{T}_\phi^2 (\sigma_\xi^2 \sigma_\theta^2 + 2K_{\xi \theta}^2) + 3\sigma_\theta^2 (4\bar{T}_\phi K_{\xi \theta} + \sigma_\xi^2 \sigma_\theta^2 + 4K_{\xi \theta}^2);$$

$$B_k = \bar{T}_k^4 \sigma_\xi^2 + 4\bar{T}_k^3 K_{\xi k} + 6\bar{T}_k^2 (\sigma_\xi^2 \sigma_k^2 + 2K_{\xi k}^2) + 3\sigma_k^2 (4\bar{T}_k K_{\xi k} + \sigma_\xi^2 \sigma_k^2 + 4K_{\xi k}^2);$$

$$C_\phi = \bar{T}_\phi^4 K_{\xi \theta} + 4\bar{T}_\phi^3 \sigma_\theta^2 + 18\bar{T}_\phi^2 K_{\xi \theta} \sigma_\theta^2 + 12\bar{T}_\phi \sigma_\theta^4 + 15K_{\xi \theta} \sigma_\theta^4;$$

$$C_k = \bar{T}_k^4 K_{\xi \theta} + 4\bar{T}_k^3 K_{\theta k} + 12\bar{T}_k^2 K_{\xi k} K_{\theta k} + 3\sigma_k^2 (\sigma_\theta^2 K_{\xi \theta} + 4K_{\xi k} K_{\theta k});$$

$$A = \bar{T}_\phi^4 K_{\xi k} + 4\bar{T}_\phi^3 K_{\theta k} + 6\bar{T}_\phi^2 (\sigma_\theta^2 K_{\xi k} + 2K_{\xi \theta} K_{\theta k}) + 12\bar{T}_\phi \sigma_\theta^2 K_{\theta k} + 3\sigma_\theta^2 (\sigma_\theta^2 K_{\xi k} + 4K_{\xi \theta} K_{\theta k}).$$

Сумісне розв'язання системи рівнянь (2)-(5), (8)-(11) дозволяє визначити математичне сподівання і дисперсію температури резервуара з нафтопродуктом (рис. 5). Разом з законом розподілу температур це повністю визначає поведінку резервуара в рамках стохастичної моделі. Швидкість зміни температури $V_k(t) = dT_k/dt$ також має нормальний розподіл, а параметри визначаються рівнянням (7) (рис. 6).

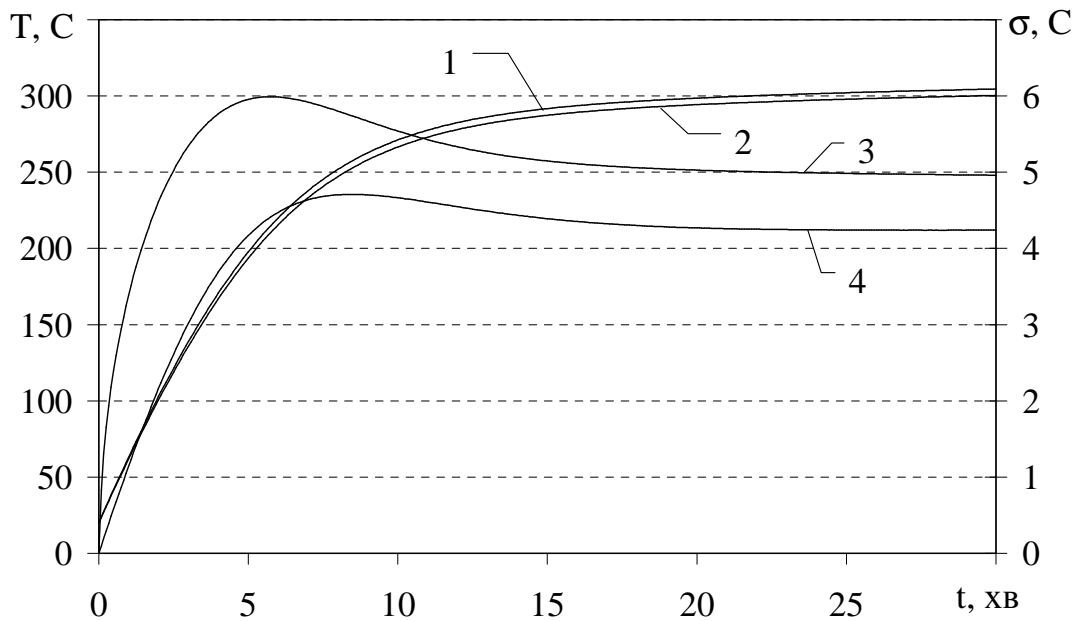


Рис. 5. Температура стінки резервуара, оберненої в бік факела: 1 – математичне сподівання; 2 – детермінований розв'язок; 3 – середньоквадратичне відхилення; 4 – різниця між математичним сподіванням і детермінованим розв'язком (права вісь)

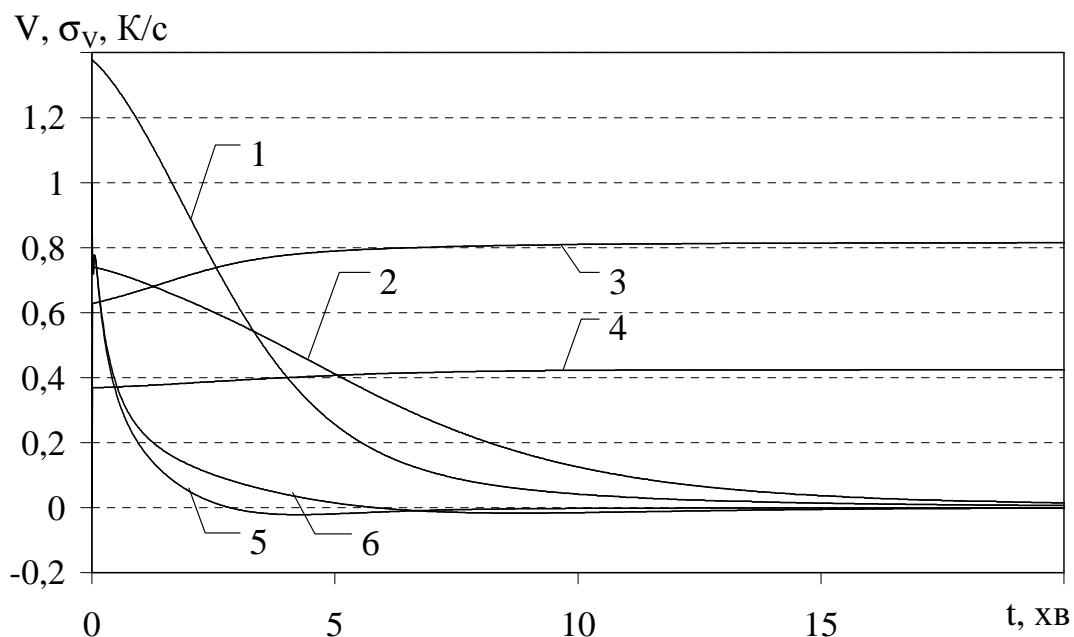


Рис. 6. Параметри швидкості зміни температури частини резервуара, оберненої в бік факела: 1, 2 – математичне сподівання \bar{V} для покрівлі і стінки відповідно; 3, 4 – середньоквадратичне відхилення σ_v ; 5, 6 – коефіцієнт кореляції між температурою і швидкістю її зміни

Коефіцієнт кореляції між температурою і швидкістю її зміни залишається істотним лише в перші хвилини (рис. 6). Далі він швидко зменшується, температура і швидкість її зміни стають некорельованими випадковими процесами. Внаслідок їх нормальності, із некорельованості випливає їх незалежність.

В четвертому розділі побудовано модель горіння неповного резервуара з нафтопродуктом, а також модель охолоджувальної дії водних струменів на резервуар, що горить, або нагрівається під впливом пожежі.

При горінні неповного резервуара з нафтопродуктом зона горіння знаходиться над резервуаром, де пари нафтопродукту змішуються з киснем повітря. В самому резервуарі горіння не відбувається внаслідок надлишку парів нафтопродукту і недостатку кисню. Теплове випромінювання від факела нагріває вільну стінку резервуара і поверхню нафтопродукту, випаровуючи нові пари нафтопродукту. З метою врахування нерівномірного нагріву сухої стінки резервуара по висоті, вона розбита на N рівних циліндричних областей, висотою Δh . Рівняння балансу енергії для області k ($k = 1, 2, \dots, N$) має вигляд:

$$\frac{dT_k}{dt} = \frac{\epsilon_c c_0}{S \delta \rho_c c_c} \left[\epsilon_\phi H_k^+ \left(\left(\frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \epsilon_c \sum_{i=1}^N H_{ik} \left(\left(\frac{T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) + \left(\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) S + \epsilon_H H_k^- \left(\left(\frac{T_{\text{кип}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right) \right] + \frac{\alpha_r (T_{\text{кип}} - T_k)}{\delta \rho_c c_c} + \frac{\alpha_v (T_0 - T_k)}{\delta \rho_c c_c}, \quad (12)$$

де $S = \pi D \Delta h$ – площа поверхні області, на які поділена вільна стінка; H_k^+ , H_k^- – площі взаємного опромінення між областю k та, відповідно, факелом і нафтопродуктом; $T_{\text{кип}}$ – температура кипіння нафтопродукту.

Система диференціальних рівнянь (12) з початковою умовою $T_k(0) = T_0$ визначає розподіл температур по стінці резервуара в довільний момент часу (рис. 7). На основі рівнянь балансу енергії проведено оцінку кількості нафтопродукту, що випаровується, і висоти факела:

$$k = \sqrt{\left(\psi_\phi + \frac{\epsilon_c \sum_{j=1}^n \psi_j^- (T_k^4 - T_{\text{кип}}^4)}{\epsilon_\phi (T_\phi^4 - T_{\text{кип}}^4)} \right)^2 \left(k_0^2 + \frac{1}{4} \right) - \frac{1}{4}} \quad (13)$$

де $k_0 = L_0/D$, $k = L/D$ – відношення висоти факела при відсутності вільної стінки та за її наявності до діаметру резервуара; ψ_ϕ , ψ_j^- – коефіцієнт взаємного опромінення

між поверхнею нафтопродукту і факелом та областю j . Формула (13) може бути апроксимована (с відносною похибкою не більше 1%) квадратним тричленом:

$$\frac{h}{D} = 1,4 - 1,52 \frac{h_0}{D} + 0,57 \left(\frac{h_0}{D} \right)^2 \quad (\text{ЛЗР}),$$

$$\frac{h}{D} = 1,2 - 1,35 \frac{h_0}{D} + 0,47 \left(\frac{h_0}{D} \right)^2 \quad (\text{ГР}),$$

де h_0 – висота сухої стінки; h – висота факела над резервуаром. Зменшення видимої висоти факела компенсується тепловим випромінюванням від нагрітої сухої стінки резервуара. Внаслідок чого, тепловий потік від пожежі до сусідніх резервуарів залишається майже незмінним. Цей факт підтверджується експериментально.

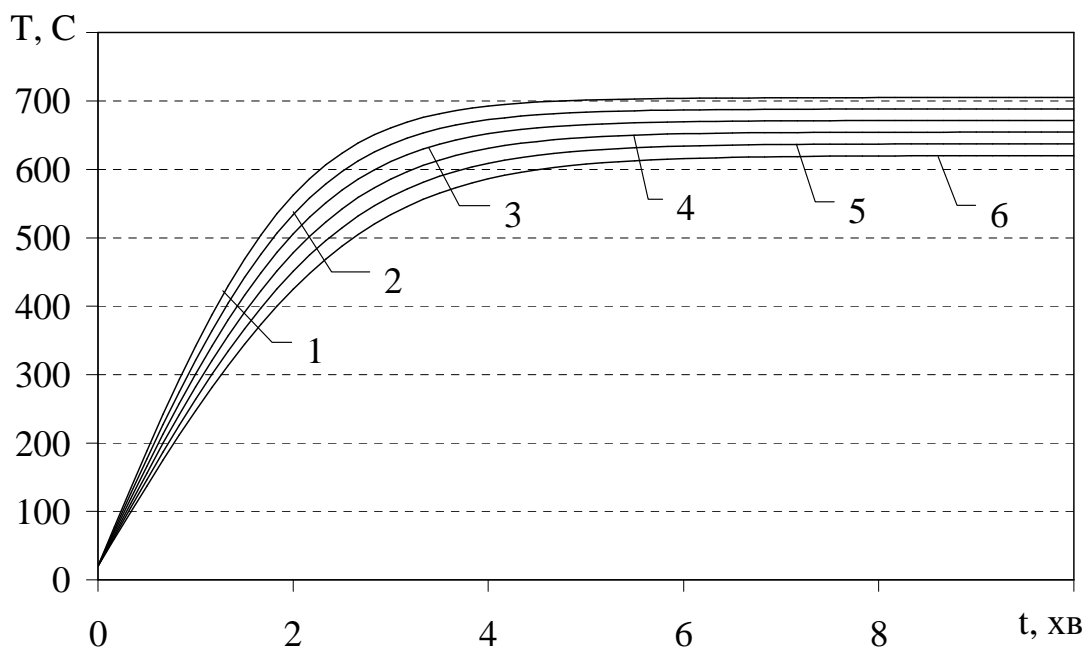


Рис. 7. Динаміка зміни температури сухої стінки резервуара, що горить, на різній відстані s від краю стінки: 1 – $s=0$; 2 – $s=1$ м; 3 – $s=2$ м; 4 – $s=3$ м; 5 – $s=4$ м; 6 – $s=5$ м

Модель охолодження резервуара водними струменями базується на наступних припущеннях.

1. При охолодженні стінки резервуара з пожежного ствола частина води відскакує, не маючи охолоджувальної дії, інша стікає, утворюючи плівку.

2. Стікання плівки відбувається під дією сили гравітації. Вплив початкової швидкості є занадто малим.

3. При досягненні плівкою температури кипіння води, процес кипіння має пухлякий характер.

В рамках побудованих моделей (1), (7), (12) нагріву резервуара під впливом пожежі наявність охолодження означає зміну коефіцієнта конвективної тепловіддачі

α_b в навколишню середу. В тих місцях, де сталеві конструкції не мають контакту з водною плівкою, він залишається незмінним, в місцях контакту він дорівнює коефіцієнту конвективної тепловіддачі у водну плівку α_{ox} . Стікання водної плівки носить турбулентний характер, а коефіцієнт α_{ox} може бути знайдений за допомогою теорії подібності і теорії водних плівок, що гравітаційно стікають по вертикальній поверхні. Для плівки, що не кипить, α_{ox} визначається виразом:

$$\alpha_{ox} = 0,0946\lambda \left(\frac{g}{\nu^2} \right)^{1/3} Re^{0,2} Pr^{0,4},$$

де λ , ν , Pr – коефіцієнт теплопровідності, в'язкість та число Прандтля води; Re – число Рейнольдса для водної плівки: $Re = \frac{V_s k_s}{a_{ox} \nu}$, V_s – витрати води (m^3/c); a_{ox} – ширина смуги стікання води по стінці; k_s – відносна кількість води, що після удару струменя о стінку, стікає по ній, а не відлітає від неї.

Коефіцієнт тепловіддачі в водну плівку, що кипить, дорівнює

$$\alpha_{ox} = \lambda \left(\frac{g}{\nu^2} \right)^{1/3} \frac{Pr \eta_T^{1/3}}{5Pr + 5\ln(1 + 5Pr) + 2,5\ln(1 - Pr + 0,4Pr\eta_T) - 2,5\ln(1 + 11Pr)},$$

де η_T – корінь рівняння $Re + 64 = 3\eta_T + 2,5\eta_T \ln \eta_T$.

З моделі випливає, що при відсутності охолодження тепловий потік до сусідніх резервуарів майже не залежить від рівня нафтопродукту в резервуарі, що горить, – скорочення довжини факела компенсується випромінюванням від розігрітої стінки. Охолодження стінки резервуара, що горить, дозволяє зменшити загальний тепловий потік до 40% в залежності від рівня нафтопродукту, що горить. Цей висновок співпадає з експериментальними фактами, що наводяться в літературі, про скорочення теплового потоку на 20% при середній наповненості резервуара і на 50% при мінімальній.

Для оцінки відносної кількості води, що у вигляді плівки стікає по стінці резервуара (коефіцієнта ефективності k_s), була проведена серія експериментів, в ході яких водний струмінь ударявся о вертикальну стінку під різними кутами. Швидкість струменю варіювалася в межах 5-25 м/с, що відповідає швидкості води у струмені після виходу з пожежного ствола і підйомі на висоту 10-18 метрів. Експеримент засвідчив, що коефіцієнт ефективності k_s зменшується зі збільшенням нормальної до стінки складової швидкості. Залежність апроксимується поліномом:

$$k_s = 0,0008w_n^2 - 0,0456w_n + 1,1371, \quad 5 \leq w_n \leq 25 \text{ м/с},$$

де w_n – нормальна до охолоджувальної поверхні складова швидкості водного струменя. Середнім значенням відносної кількості води, що йде на охолодження резервуара, є $k_s \approx 0,6$.

В п'ятому розділі проводиться моделювання дій пожежних підрозділів по локалізації пожежі в резервуарному парку.

Першочерговою задачею пожежних підрозділів є охолодження резервуарів, що горять, та сусідніх з ними. Існує багато можливих позицій для розташування пожежних стволів і вибору для них бойових задач. В зв'язку з цим виникає питання про їх найкраще розміщення. На оцінку того або іншого варіанта розміщення стволів впливають наступні фактори.

1. Ефективність охолодження.
2. Безпека відносно можливого вибуху або розливу нафтопродукту.
3. Досяжність резервуара водним струменем.
4. Безпечний рівень теплового потоку від пожежі.
5. Відсутність перешкод (резервуарів або інших споруд) між стволом та резервуаром.

6. Інші обмеження, пов'язані з ТТХ стволів або правилами техніки безпеки.

Фактори 2-6 є обмеженнями, 1 – критерієм задачі оптимального розміщення стволів для охолодження резервуарів. В основі задачі оптимізації лежать наступні припущення.

- В розпорядженні є m стволів з часом бойового розгортання t_1, t_2, \dots, t_m , $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_m$. Кожному стволу притаманні свої обмеження, що впливають із 2-6.
- Розміри стволів малі порівняно з розмірами резервуарів; два стволи можуть бути як завгодно близько розташовані один до одного або до інших об'єктів резервуарного парку.
- В ході розгортання сил та засобів бойова обстановка на пожежі не змінюється: не відбувається нових займань, вибухів, розливів нафтопродукту.
- Задача, поставлена перед стволом, залишається незмінною протягом всього проміжку часу, що розглядається.

Для резервуара, що горить, критичною є температура, при якій його сталеві конструкції втрачають міцність. Для резервуарів, що не горять, критичною є температура самоспалахування парів нафтопродукту. Отже, мета охолодження полягає в недопущенні того, щоб температури резервуарів досягли критичних значень. Для детермінованої постановки задачі введено штрафну функцію:

$$H(T) = \begin{cases} 0, & T < T_{кр} \\ (T - T_{кр})^2, & T \geq T_{кр}, \end{cases}$$

де $T_{кр}$ – критична температура. Кожний з N резервуарів розділено на n областей. Цільова функція описує штраф за перевищення температурою критичних значень на відрізку часу $[0, t_0]$, $t_0 > t_m$:

$$H = \int_0^{t_0} \sum_{r=1}^N \sum_{j=1}^n H(T_{rj}(t)) dt \rightarrow \min_{\Omega}, \quad (14)$$

де T_{rj} – температура області j резервуара r ; Ω – множина можливих рішень задачі (множина можливих розташувань стволів, для яких виконані обмеження 2-6).

В стохастичній постановці задачі оптимізації цільова функція означає намагання максимізувати ймовірність того, що температура жодного з резервуарів не вийде за критичний рівень:

$$H_p = \prod_{r=1}^N \prod_{j=1}^n P(T_{rj} < T_{кр}) \rightarrow \max_{\Omega}, \quad (15)$$

де $P(T_{rj} < T_{кр})$ – ймовірність того, що на всьому проміжку часу $[0, t_0]$ температура області j резервуара r буде залишатися нижче критичного значення $T_{кр}$.

Внаслідок того, що цільова функція не є опуклою, а область припустимих рішень може бути незв'язною, то застосування класичних методів оптимізації до задачі (14) або (15) є неможливим. В роботі наведено алгоритм пошуку рішення задачі, який зводиться до послідовного вибору оптимальної позиції і бойової задачі для кожного з стволів в порядку часу їх бойового розгортання. Суть алгоритму не залежить від конкретного вигляду цільової функції та обмежень, тому аналогічний підхід може бути застосований для оптимізації розміщення сил та засобів не лише в резервуарних парках, але й на інших об'єктах.

Досягнення критичної температури резервуаром, що горить, призводить до деформації його сухих стінок, що ускладнює подачу піни на його гасіння і збільшує тривалість пожежі. Статистика показує, що у 80% випадків руйнування резервуарів відбувається вздовж зварних швів, якими з'єднані сталеві листи. Це означає, що поведінка зварного шва при пожежі суттєво відрізняється від поведінки елементів, які він з'єднує. Отже, застосування методів дослідження вогнестійкості суцільних металевих конструкцій є малоефективним. Надійність зварного шва залежить від ряду факторів (техніки зварювання, дотримання технології, кваліфікації зварювальника тощо), і його поведінка визначається імовірнісними законами. З підвищенням температури до 600-700 °C міцність сталі різко знижується (до 10 разів). Тому для резервуара, що горить, в якості критичної температури обрано

$T_{кр} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$. Після досягнення цієї температури ймовірність деформації сухої стінки описується показниковим законом:

$$p_{гор} = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (16)$$

де t – час, протягом якого стінка знаходиться при температурі вище критичної: $T > T_{кр}$.

Нагрів сталевих конструкцій резервуара, що не горить, до температури самоспалахування може призвести до вибуху парів нафтопродукту. Нехай поверхня резервуара розбита на n областей. Побудована в третьому розділі стохастична модель нагріву резервуара з нафтопродуктом дозволяє знайти закон і параметри розподілу температури $T_k(t)$ області k в довільний момент часу t . Для знаходження ймовірності $p_k(t)$ досягнення такою областю критичної температури $T_{кр}$ на відрізку часу $[0, t]$, часовий проміжок розбивається системою точок t_1, t_2, \dots, t_f на рівні відрізки з малим шагом Δt . Для того, щоб температура не досягла критичного значення на відрізку $[0, t]$, необхідно, щоб вона не досягала його на кожному з часткових відрізків:

$$1 - p_k(t) = \prod_{i=1}^f \left(1 - \frac{p_k(t, t + \Delta t)}{P(T_k(t) < T_{кр})} \right), \quad (17)$$

де $p_k(t, t + \Delta t)$ – ймовірність того, область k , маючи в момент часу t температуру нижче критичної, в момент часу $t + \Delta t$ перевищить критичне значення. Знаменник $P(T_k(t) < T_{кр})$ означає ймовірність того, що в момент часу t температура нижче критичної, і визначається з умови нормального розподілу температури:

$$P(T_k < T_{кр}) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{T_{кр} - \bar{T}_k}{\sigma_k \sqrt{2}} \right).$$

Виконання граничного переходу $\Delta t \rightarrow 0$ у виразі (17) і застосування теорії викидів випадкового процесу за граничний рівень на нескінченно малому відрізку призводить до формули

$$p_k(t) = 1 - \exp \left\{ - \frac{1}{\pi_0} \int_0^t \frac{\sigma_v \exp(-y^2)}{\sigma_T (1 + \operatorname{erf}(y))} (z \sqrt{\pi} (1 + \operatorname{erf}(z)) + \exp(-z^2)) dt \right\}, \quad (18)$$

де $y(t) = \frac{T_{кр} - \bar{T}}{\sigma_T \sqrt{2}}$; $z(t) = \frac{\bar{V}}{\sigma_V \sqrt{2}}$; $\bar{T}(t)$, $\sigma_T^2(t)$ – математичне сподівання і дисперсія температури області k в момент часу t ; $\bar{V}(t)$, $\sigma_V^2(t)$ – математичне сподівання і дисперсія швидкості зміни температури.

Небезпеки, пов'язані з виникненням факельного горіння, вибуху резервуара, деформації стінок резервуара, що горить, не є рівноцінними. В зв'язку з цим виникає необхідність введення єдиного числового показника, що характеризує очікувані втрати від пожежі. Втрати U , спричинені горінням одного резервуара, пропорційні тривалості пожежі. У випадку горіння кількох резервуарів загальні втрати пропорційні сумі тривалостей пожеж в кожному з резервуарів: $U \sim \sum_{k=1}^n t_k$, де t_k – тривалість пожежі в резервуарі k .

Для характеристики того або іншого варіанту розміщення стволів запропоновано використовувати безрозмірну величину u , що пропорційна математичному сподіванню сумарного часу тривалості пожеж в усіх резервуарах, з урахуванням можливої деформації стінок резервуара, що горить, або вибуху (спалахування) сусіднього резервуара:

$$u = (1 + \delta p_0) \left(1 + (1 - p_0) \sum_{k=1}^{n-1} p_k(\bar{t}) + p_0 \sum_{k=1}^{n-1} p_k(\bar{t}(1 + \delta)) \right),$$

де $\delta = \Delta t / \bar{t}$ – відносне збільшення тривалості пожежі, викликане деформацією стінок резервуара і виникненням ізольованих зон горіння з ускладненим поданням піни; \bar{t} – середній час гасіння пожежі в резервуарі даного типу при даних погодних умовах; p_0 – ймовірність деформації стінок резервуара, що горить; $p_k(t)$ – ймовірність досягнення резервуаром k температури самоспалахування протягом часу t . Ймовірності p_0 і $p_k(t)$ можуть бути знайдені за формулами (16), (18), параметри \bar{t} і δ визначаються за статистичними даними. Проведений аналіз статистики гасіння пожеж дає оцінку $\delta \approx 0,2 \div 0,25$.

Для порівняння ефективностей варіантів розміщення стволів достатньо порівняти безрозмірні втрати, що відповідають ним. Реальні втрати U від пожежі будуть пропорційні безрозмірним втратам u . При цьому має значення не сама величина безрозмірних втрат u або її зміна Δu при переході від одного варіанта до іншого, а відносна зміна $\Delta u / u$.

В шостому розділі розроблені математичні моделі прогнозування каскадного розповсюдження пожежі і методи побудови оптимального плану локалізації пожежі використовуються для аналізу конкретних пожежних ситуацій в резервуарних групах з різними видами нафтопродуктів.

Побудова плану локалізації і ліквідації пожежі в резервуарному парку, розрахунок сил та засобів неможливі без прогнозування каскадного розповсюдження пожежі. Для такого прогнозу можуть бути використані наступні методи: стохастичний, детермінований, Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах з нафтою і нафтопродуктами, експертний. Перший та другий методи спираються на побудовані в роботі математичні моделі і алгоритм оптимального розміщення стволів для охолодження резервуарів. Третій метод ґрунтується на методиці прогнозування розвитку пожежі в резервуарній групі від променистої енергії факела, наведеної в Інструкції щодо гасіння пожеж у резервуарах з нафтою і нафтопродуктами. Експертний метод також базується на цій інструкції, але експерти вносять корективи з урахуванням напрямку та швидкості вітру, виду нафтопродукту тощо.

Для обґрунтування вибору одного з методів проведено теоретичне порівняння детермінованого і стохастичного підходів, а потім на кількох практичних прикладах порівняно всі чотири методи.

Стохастична модель є узагальненням детермінованої моделі. Її недоліком є складність і значний об'єм обчислень. Тому виникає питання, чи дійсно істотно відрізняються результати, отримані із застосуванням детермінованого і стохастичного підходів. Для визначення відносної різниці між моделями введено величину

$$\delta = \frac{\max\{|t_{0,95} - t|, |t_{0,05} - t|\}}{t},$$

де $t_{0,05}$, $t_{0,95}$ – час, протягом якого з імовірностями 0,05 і 0,95 буде досягнута критична температура в стохастичній моделі; t – час досягнення критичної температури в детермінованій моделі. Чим коротше інтервал $(t_{0,05}; t_{0,95})$ і чим ближче до нього знаходиться точка t , тим меншою буде різниця між моделями.

В роботі проаналізовано залежність різниці між моделями δ від властивостей нафтопродукту (температури T_{ϕ} , ступеня чорноти ϵ_{ϕ} і відносної висоти факела $k = h_{\phi}/D$, температури самоспалахування T_c). З перерахованих параметрів три перших визначають тепловий потік від факела $q = c_0 \epsilon_{\phi} \epsilon_c \left((T_{\phi}/100)^4 - (T/100)^4 \right) \psi$, де $\epsilon_c = 0,8$ – ступінь чорноти стінки резервуара; ψ – площа взаємного опромінення, що залежить від відносної висоти факела k . Це дозволяє ввести параметр z , що характеризує теплове випромінювання від факела: $z = \epsilon_{\phi} (T_{\phi}/100)^4 k$. В цьому випадку задача зводиться до побудови залежності $\delta(z, T_c)$ (рис. 8). В області 1 різниця між моделями перевищує 40%, в області 2 – 20%. В областях 3 і 4 різниця між стохастичною і детермінованою моделями несуттєва: від 10% до 20% і від 0% до

10% відповідно. Область, що не заштрихована, відповідає повному збігу моделей ($\delta = 0$).

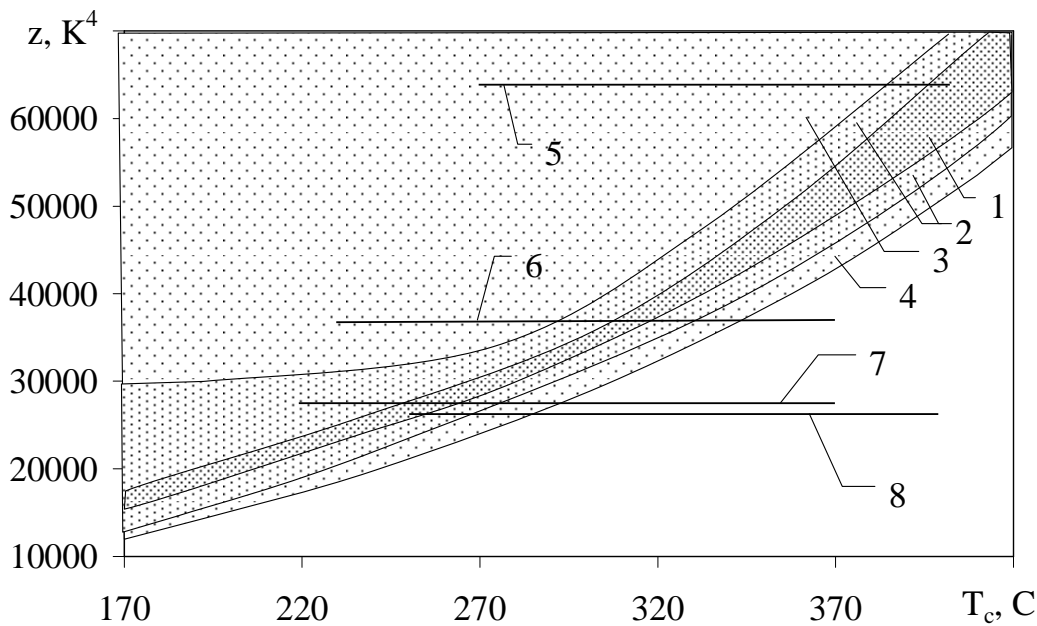


Рис. 8. Вплив властивостей нафтопродукту (характеристики теплового потоку z і температури самоспалахування T_c) на різницю δ між стохастичною і детермінованою моделями: 1 – область значень $\delta > 0,4$; 2 – $0,2 < \delta < 0,4$; 3 – $0,1 < \delta < 0,2$; 4 – $0 < \delta < 0,2$; 5 – діапазон температур самоспалахування бензину; 6 – нафти; 7 – дизельного палива; 8 – мазуту

З наближенням до лівого верхнього (малі критичні температури і великі теплові потоки) і правого нижнього (великі критичні температури і малі теплові потоки) кутів різниця між моделями зменшується. При цьому лівий верхній кут відповідає ситуації, коли швидкість зміни температури велика порівняно з її випадковими пульсаціями, і тому обидві моделі дають майже однаковий результат. Правий нижній кут, навпаки, описує ситуацію, коли критична температура виявляється недосяжною. Цим і пояснюється тотожність результатів в цій області.

Всі чотири перерахованих методи застосовувалися для аналізу типових пожежних ситуацій і побудови плану локалізації пожежі в резервуарних групах з бензином, нафтою та мазутом при наявності вітру і його відсутності. Найкращі результати дає застосування стохастичного підходу до прогнозування розвитку пожежі і розробка на його основі плану локалізації пожежі з використанням алгоритму оптимального розміщення стволів для охолодження резервуарів (рис. 9). Такий метод виявився найкращим в кожній із розглянутих ситуацій.

Недоліки, що обумовили гірші показники інших методів полягають в наступному. Застосування детермінованого підходу призводить у ряді випадків до недооцінки небезпеки, яку являє собою тепловий потік від пожежі. Внаслідок цього при його використанні очікувані збитки від пожежі в резервуарних групах з

бензином і мазутом на 30% перевищують очікувані збитки при використанні стохастичного підходу, а при пожежі в резервуарних групах з нафтою – до 100%.

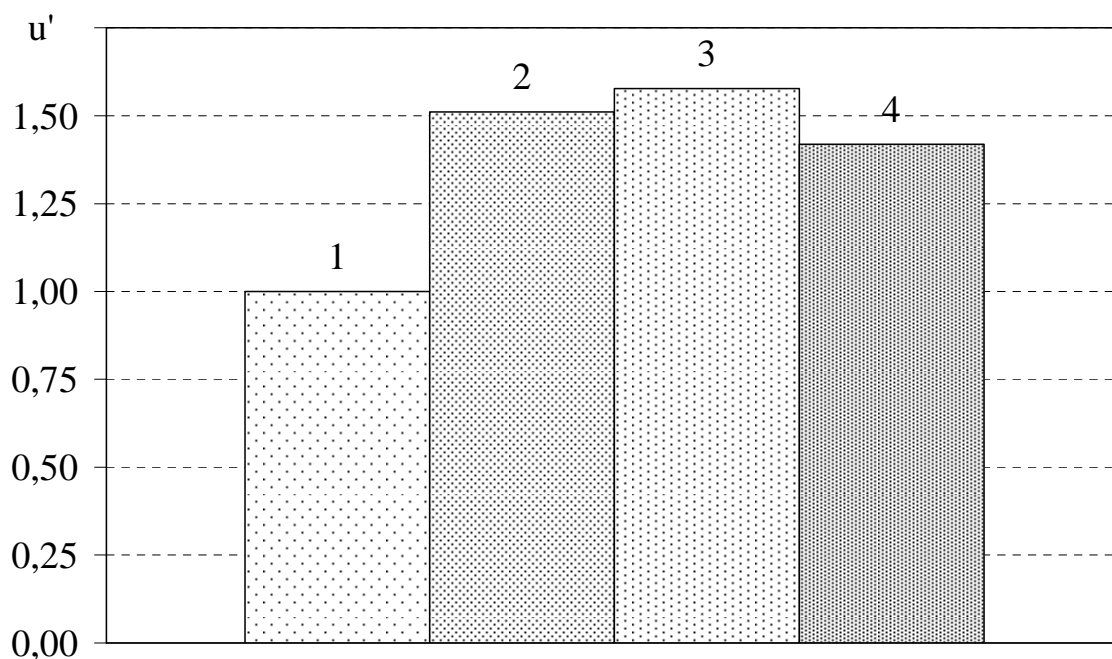


Рис. 9. Відносна величина очікуваних збитків від пожежі при використанні різних методів прогнозування її розвитку при виборі плану локалізації: 1 – стохастичний; 2 – детермінований; 3 – Інструкція...; 4 – експертний

Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах з нафтою і нафтопродуктами не враховує різниці в тепловому потоці від факелів різних нафтопродуктів і нахилу факела вітром. Як наслідок, час досягнення критичної температури в ряді випадків виявляється завищеним (в 3-7 разів у ситуації з бензином і в 2 рази в ситуації з нафтою). В інших випадках вплив теплового потоку може бути завищеним (резервуарна група з мазутом). Останнє не впливає на ефективність локалізації пожежі, але при недостатній кількості сил та засобів керівник гасіння пожежі (КГП) може неправильно обрати пріоритети при охолодженні резервуарів. Застосування номограм, наведеної в Інструкції, не дає відповіді на питання, яка саме частина резервуара нагрівається, і рішення про охолодження лягає на КГП. Експертний метод показує, що відхилення факела вітром призводить до неточностей при розв'язанні даної задачі експертом.

Експерти часто переоцінюють загрозу, яку становить тепловий потік для сусідніх резервуарів. Намагаючись зменшити ризик розповсюдження пожежі, вони віддають перевагу охолодженню сусідніх резервуарів на шкоду резервуару, що горить. Для експертів являє складність визначення того, яка саме частина резервуара нагрівається, якщо факел нахилено вітром. В підсумку, охолодження може виявитися недостатнім.

Таким чином, для прогнозування шляхів каскадного розповсюдження пожежі необхідно застосовувати стохастичний метод прогнозування. Детермінований підхід, як більш простий, може бути застосований в тому випадку, якщо параметри

нафтопродукту попадають в область 3 або 5 (рис. 8). Зокрема, детермінована модель може бути застосована для бензинів і мазутів при стандартній відстані між резервуарами $0,75D$ і відсутності вітру. Використання номограми, наведеної в Інструкції, не дає адекватної оцінки пожежної ситуації і можливостей її каскадного розповсюдження. В особливо складних випадках може бути застосований експертний метод. Як правило, він дає „обережну” стратегію з мінімальною ймовірністю каскадного розповсюдження пожежі, але не оптимальну в сенсі середніх втрат і необхідних сил та засобів.

Викладені вище моделі і алгоритми було реалізовано у вигляді програмного комплексу (рис. 10).

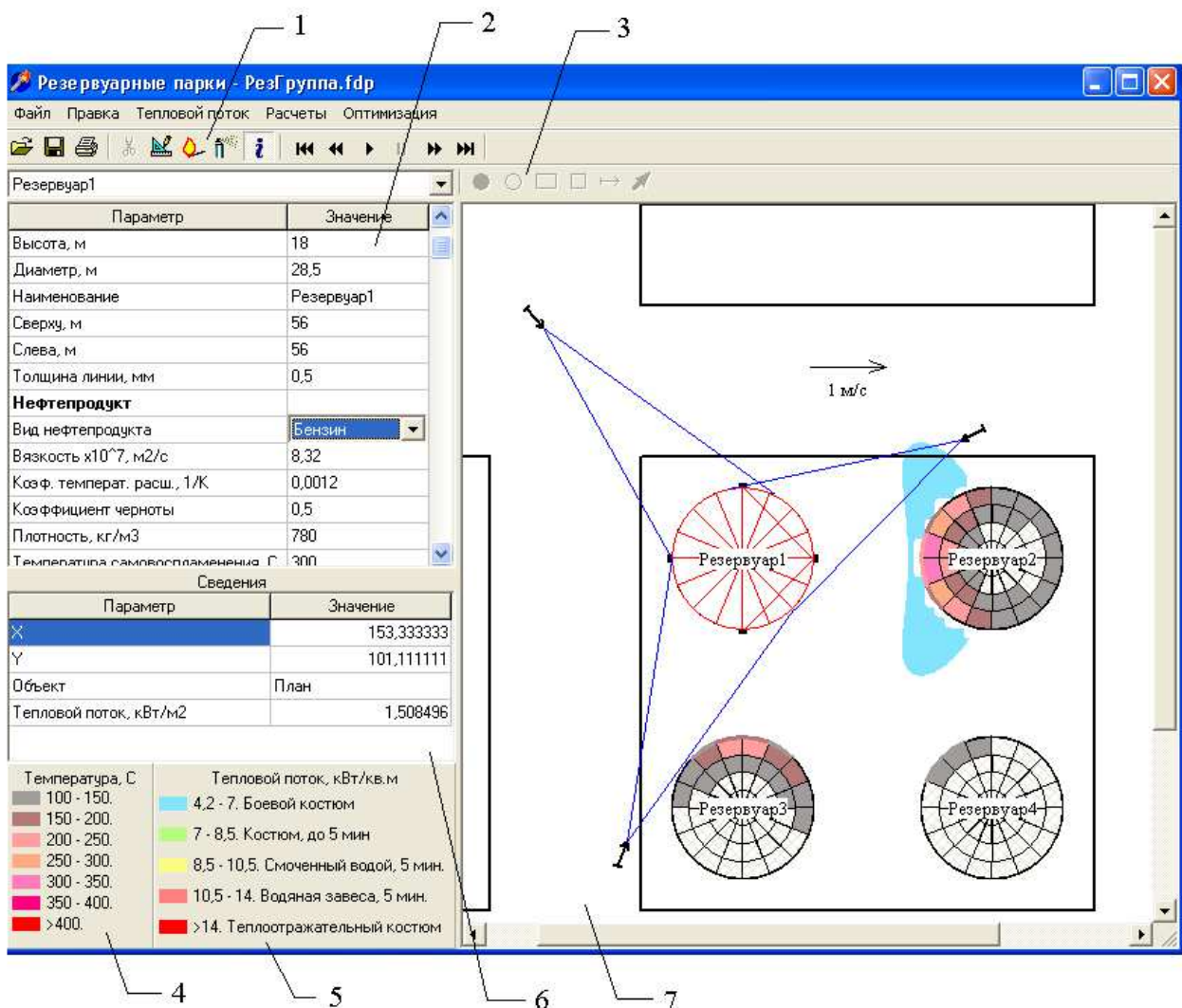


Рис. 10. Зовнішній вигляд програмного комплексу: 1 – панель команд; 2 – редактор об’єктів; 3 – панель інструментів; 4 – відповідність кольорів діапазнам температур; 5 – відповідність кольорів діапазнам теплового потоку; 6 – інформаційне вікно; 7 – графічне відображення схеми резервуарного парку

Програмний комплекс дозволяє автоматизувати роботу по виявленню найбільш пожежонебезпечних напрямків і варіантів розвитку пожежі, прийняттю заходів по її локалізації і ліквідації.

ВИСНОВКИ

В роботі одержано нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності забезпечують вирішення науково-практичної проблеми щодо розробки теоретичних основ попередження каскадного розповсюдження пожежі в резервуарних парках з нафтопродуктами і підвищення ефективності її ліквідації.

1. Вдосконалено математичну модель нагріву резервуара з нафтопродуктом під тепловим впливом пожежі. Особливістю моделі є розбиття резервуара на окремі області і врахування конвективного та променистого теплообміну кожної області однією з іншою, факелом та навколишнім середовищем. Побудована модель точніше описує процес нагріву резервуара завдяки врахуванню нерівномірного нагріву його різних частин. Показано, що застосування моделей, що припускають рівномірний нагрів стінки і покрівлі, звернених в бік пожежі, призводить до відносної похибки до 40%. Розроблена модель дозволяє оцінити граничний час початку охолодження резервуара, що нагрівається під впливом пожежі.

2. Вперше побудовано стохастичну модель теплового випромінювання від полум'я нафтопродуктів. Особливістю моделі є врахування випадкових пульсацій форми полум'я та його температури. Ідентифікацію параметрів моделі проведено на основі експериментальних даних.

3. Вперше запропоновано і теоретично обґрунтовано імовірнісний підхід до моделювання пожежних ситуацій в резервуарному парку нафтопродуктів. Підхід базується на використанні теорії випадкових функцій для опису теплових процесів, що відбуваються в резервуарах, що горять, та сусідніх з ними. Вихідними даними для моделі є випадкові процеси, що характеризують факел, результатом – закон і параметри розподілів випадкових процесів, що описують температури резервуарів.

4. Вперше запропоновано метод оцінювання імовірності досягнення резервуаром, що не горить, температури самоспалахування парів нафтопродукту протягом заданого проміжку часу. Метод ґрунтується на розрахунку імовірності викиду випадкового процесу за критичний рівень. Розроблений метод дозволяє прогнозувати каскадне розповсюдження пожежі в резервуарному парку і приймати рішення про необхідність охолодження даного резервуара.

5. Подальший розвиток отримали методи оцінки міцності сталевих конструкцій в умовах підвищених температур. На основі статистичних даних про деформацію сухої стінки резервуара, що горить, запропоновано імовірнісний підхід до визначення часу її вогнестійкості. Даний підхід використовується для прогнозування деформації сухої стінки резервуара, що горить, і прийняття рішення про необхідність її охолодження.

6. Проведено теоретичне узагальнення детермінованого і стохастичного підходів до моделювання пожежі в резервуарному парку. Стохастична модель прогнозування каскадного розповсюдження аварійної ситуації в резервуарному парку

є узагальненням детермінованої моделі. Вона дозволяє більш адекватно описати пожежну ситуацію шляхом врахування випадкових факторів. Виявлено умови, за яких обидві моделі дають еквівалентні результати, і умови, за яких вплив випадкових факторів є суттєвим, і нехтувати ними не можна. Показано, що в ряді випадків наявність цих випадкових факторів призводить до відносної різниці між моделями понад 50%. Метод порівняння стохастичної і детермінованої моделей ґрунтується на порівнянні прогнозованого часу досягнення критичної температури резервуаром, що не горить.

7. Подальшого розвитку набули методи розрахунку охолоджувальної дії водного струменя на нагріту поверхню. Розроблені методи ґрунтуються на теорії тепловіддачі в рідку плівку, що гравітаційно стікає по вертикальній поверхні. Побудована модель дозволяє розв'язати задачу про необхідну інтенсивність подачі води на охолодження.

8. Вперше запропоновано метод оцінювання ефективності дій пожежних підрозділів по локалізації пожежі в резервуарному парку. Особливістю метода є врахування очікуваних втрат, викликаних можливим розповсюдженням пожежі на сусідні резервуари. В основі метода лежать розроблені стохастичні моделі розвитку пожежі. Розроблений метод дозволяє на етапі розробки плану пожежегасіння порівняти наслідки тих або інших дій пожежних підрозділів і допомагає у прийнятті рішення керівником гасіння пожежі.

9. Вперше запропоновано метод і алгоритм оптимальної розстановки сил та засобів для локалізації пожежі в резервуарному парку. Запропонований метод ґрунтується на стохастичній моделі розвитку пожежі. Його застосування для розробки плану локалізації пожежі дозволяє зменшити втрати від пожежі на 40 % у порівнянні з загальноприйнятим підходом. Виграш досягається за рахунок більш точного прогнозу впливу пожежі на сусідні резервуари, вибору першочергових задач і оптимального розподілу бойових задач між стволами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в резервуарных парках с нефтепродуктами. – Харьков: АГЗУ, 2006. – 251 с.
2. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Алгоритм оптимального расположения сил и средств для тушения пожара в резервуарном парке // Проблемы надзвичайних ситуацій. Зб. наук. пр. АЦЗ України.– Харків: Фоліо, 2006. – Вип. 3. – С. 26-32.
3. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Влияние пожара на резервуар с нефтепродуктом // Вестник национального автомобильно-дорожного университета. Сб. научных трудов. – Харьков: ХНАДУ, 2005. – Вип. 29. – С. 131-133.

4. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Влияние случайных пульсаций пламени на нагрев резервуара при пожаре // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: Фолио, 2005. – Вып. 18. – С. 3-8.
5. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Скорость изменения температуры резервуара при пожаре в резервуарном парке // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: АГЗУ, 2006. – Вып. 19. – С. 3-9.
6. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Моделирование нагрева резервуара под действием излучения пожара // Вісник міжнародного слов'янського університету. – Харків: ТОВ ПКФ „Яна”, 2004. – Т. 7. – №2. – С. 7-9.
7. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Моделирование охлаждения нагревающегося резервуара с нефтепродуктом // Автомобильный транспорт. Сб. научн. тр. – Харьков: ХНАДУ, 2005. – Вып. 17. – С. 96-98.
8. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Оценка коэффициента конвективной теплоотдачи резервуара с нефтепродуктом // Науковий вісник будівництва. Збірник наукових праць. – Харків: ХДТУБА, 2005. – Вип. 31. – С. 206-210.
9. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Оценка параметров распределения температуры сухой стенки резервуара при пожаре // Науковий вісник будівництва. Збірник наукових праць. – Харків: ХДТУБА, 2005. – Вип. 34. – С. 167-172.
10. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Оценка пожарной опасности резервуара с нефтепродуктом при его нагреве от пламени соседнего горящего резервуара // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков: ХНУРЭ, 2005. – №2. – С. 110-112.
11. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Тепловые процессы в нагреваемом резервуаре // Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник. – Киев: Техника, 2006. – Вып. 67. – С. 357-362.
12. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Оценка риска деформации или взрыва резервуара при пожаре в резервуарном парке // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. Сб. научных трудов. – Харьков: ХНАДУ, 2006. – Вып. 32. – С. 90-92.
13. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Экспериментальное определение тепловых параметров резервуара // Вісник міжнародного слов'янського університету. – Харків: ТОВ ПКФ „Яна”, 2005. – Т. 8. – №1-2. – С. 32-34.
14. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е., Туркин И.Б. Нагрев поверхностного слоя нефтепродукта в резервуаре от факела горящего резервуара // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: Фолио, 2004. – Вып. 16. – С. 3-7.
15. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Оценка пульсаций пламени при горении нефтепродуктов // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков: ХНУРЭ, 2006. – № 1 (32). – С. 40-42.
16. Басманов А.Е. Моделирование нагрева стенки резервуара, соприкасающейся с нефтепродуктом // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: Фолио, 2005. – Вып. 17. – С. 13-18.

17. Басманов А.Е. Моделирование струйного охлаждения резервуара // Науковий вісник будівництва. Збірник наукових праць. – Харків: ХДТУБА, 2006. – Вип. 35. – С. 205-209.
18. Басманов А.Е. Применение моделей нагрева резервуара с нефтепродуктом для анализа пожарной ситуации // Науковий вісник будівництва. Збірник наукових праць. – Харків: ХДТУБА, 2006. – Вип. 36. – С. 195-198.
19. Басманов А.Е. Сравнение стохастического и детерминированного подходов при моделировании пожарной ситуации в резервуарном парке // Вісник міжнародного слов'янського університету. – Харків: ТОВ ПКФ „Яна”, 2006. – Т. 9. – № 1. – С. 14-17.
20. Басманов А.Е. Регрессионная модель нагрева стенки резервуара при пожаре в резервуарном парке // Інтегровані технології та енергозбереження // Харків: НТУ „ХПІ”, 2005. – № 3. – С. 47-52.
21. Басманов А.Е., Говаленков С.В. Математическое моделирование сил и средств при тушении пожаров в резервуарных парках // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: Фолио, 2004. – Вып. 13. – С. 34-38.
22. Басманов А.Е., Говаленков С.В. Математическая модель расчета сил и средств при тушении пожаров резервуаров в нефтехранилищах // Вестник Херсонского государственного технического университета. – Херсон: ХГТУ, 2003. – Вып. 3(19). – С.94-97.
23. Басманов О.Є., Говаленков С.В., Горбенко М.О. Вплив випадкових чинників на спалахування резервуарів з нафтопродуктами // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. – Мелітополь: ТДАТА, 2004. – Вип. 4. – Т. 26. – С. 24-28.
24. Горбенко Н.А., Говаленков С.В., Басманов А.Е. Влияние случайных факторов на воспламенение соседних резервуаров при пожаре в резервуарном парке // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: Фолио, 2004. – Вып. 15. – С. 59-64.
25. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Моделирование охлаждения резервуара с нефтепродуктом, нагревающегося во время пожара // Пожежна та техногенна безпека. Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції // Черкаси: ЧПБ, 2005. – С. 199-202.
26. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Моделирование тепловых процессов при пожаре в резервуарном парке // Шляхи автоматизації, інформатизації, та комп'ютеризації діяльності МНС України. Тези доповідей II міжнародної науково-технічної конференції // Харків: АЦЗУ, 2005. – С. 6-8.
27. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Теплообменные процессы в резервуаре с нефтепродуктом // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. Сб. тезисов докладов III Международной научно-практической конференции // Минск: МЧС Беларуси, 2005. – С. 191-193.
28. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Форма факела как случайный процесс // Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи.

Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників // Київ: УкрНДПБ, 2005. – С. 65-67.

29. Андриенко В.Н., Басманов А.Е., Говаленков С.В., Горбенко Н.А., Созник А.П. Зоны безопасности при ликвидации пожаров в резервуарных парках // Материалы тринадцатой научно-технической конференции «Системы безопасности» – СБ-2004. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2004. – С. 249-251.

30. Басманов А.Е. Конвективный теплообмен нагревающегося резервуара // Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи. Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників // Київ: УкрНДПБ, 2005. – С. 70-71.

31. Басманов А.Е., Говаленков С.В. Определение рационального количества сил и средств при тушении пожаров в резервуарных парках // II Международная научно-практическая конференция «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация». Минск: МЧС Беларуси, 2003. – С. 279-280.

32. Басманов А.Е., Говаленков С.В. Программное обеспечение для моделирования пожарных ситуаций в резервуарных парках // Пожарная безопасность. Материалы VI научно-практической конференции. Харьков: АПБУ, 2003. – С. 9-12.

33. Басманов А.Е., Говаленков С.В., Горбенко Н.А. Автоматизация моделирования пожарных ситуаций в резервуарных парках // Снижение риска гибели людей на пожарах. Материалы XVIII научно-практической конференции. – М.: ВНИИПО, 2003. – С. 312-313.

АНОТАЦІЯ

Басманов О.Є. Теоретичні основи попередження каскадного розповсюдження пожежі в резервуарних парках з нафтопродуктами і підвищення ефективності її ліквідації. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – «Пожежна безпека». Університет цивільного захисту України, Харків, 2006.

У дисертаційній роботі запропоновано і обґрунтовано імовірнісний підхід до моделювання пожежних ситуацій в резервуарному парку нафтопродуктів. Підхід базується на використанні теорії випадкових функцій для опису теплових процесів, що відбуваються в резервуарах, що горять, та сусідніх з ними. Вихідними даними для моделі є випадкові процеси, що характеризують факел, результатом – закон і параметри розподілів випадкових процесів, що описують температури резервуарів. Побудовано модель нагріву резервуара з нафтопродуктом під тепловим впливом пожежі. Особливістю моделі є врахування нерівномірного нагріву різних частин резервуара і їх взаємного впливу. Запропоновано метод оцінювання імовірності

досягнення резервуаром, що не горить, температури самоспалахування парів нафтопродукту протягом заданого проміжку часу. Запропоновано метод розрахунку охолоджувальної дії водного струменя на нагріту поверхню резервуара. Розроблені методи дозволяють прогнозувати каскадне розповсюдження пожежі в резервуарному парку і приймати рішення про необхідність охолодження даного резервуара. Показано, що стохастична модель порівняно з детермінованою дозволяє більш адекватно описати пожежну ситуацію шляхом врахування випадкових факторів. Виявлено умови, за яких обидві моделі дають еквівалентні результати, і умови, за яких вплив випадкових факторів є суттєвим, і нехтувати ними не можна. Запропоновано і обґрунтовано метод оцінювання ефективності дій пожежних підрозділів по локалізації пожежі в резервуарному парку. Запропоновано метод і алгоритм оптимального розташування сил та засобів для локалізації пожежі в резервуарному парку. Такий алгоритм може бути використаний на етапі розробки плану пожежегасіння для аналізу пожежних ситуацій, прогнозування можливостей каскадного розповсюдження пожежі, виявлення найбільш небезпечних сценаріїв її розвитку, визначення першочергових задач для пожежних підрозділів.

Ключові слова: резервуарний парк, каскадне розповсюдження пожежі, тепловий потік, нагрів резервуара з нафтопродуктом, стохастична модель, локалізація пожежі, ліквідація пожежі, оптимальне розташування сил та засобів.

АННОТАЦІЯ

Басманов А.Е. Теоретические основы предупреждения каскадного распространения пожара в резервуарных парках с нефтепродуктами и повышение эффективности его ликвидации. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 21.06.02. – «Пожарная безопасность». Университет гражданской защиты Украины, Харьков, 2006.

В диссертационной работе предложен и обоснован стохастический подход к моделированию пожарных ситуаций в резервуарных парках нефти и нефтепродуктов. На его основе проводится прогнозирование каскадного распространения пожара, и вырабатываются меры по его локализации. Сформулирована и решена задача оптимального размещения сил и средств для локализации пожара в резервуарном парке.

В первом разделе рассмотрено состояние проблемы пожарной безопасности резервуарных парков нефтепродуктов и предупреждения каскадного распространения пожара. Приведена классификация резервуаров для хранения нефтепродуктов и классификация резервуарных парков, рассмотрена статистика пожаров в резервуарных парках, проанализированы существующие модели горения нефтепродуктов, теплового излучения от факела, нагрева резервуара с

нефтепродуктом. Основными недостатками существующих моделей являются предположения о равномерном нагреве резервуара под действием теплового потока, постоянстве теплового потока, отсутствии его случайных пульсаций. Отсутствуют модели, учитывающие охлаждающее действие водных струй на резервуар.

Во втором разделе построена детерминированная модель нагрева вертикального стального резервуара (РВС) со стационарной крышей с нефтепродуктом под тепловым воздействием пожара. Особенностью модели является учет неравномерного нагрева различных частей резервуара. Модель учитывает теплообмен, как излучением, так и конвекцией. Построенная система уравнений баланса энергии позволяет определить распределение температур по резервуару в произвольный момент времени. Модель используется для прогнозирования времени достижения резервуаром температуры самовоспламенения нефтепродукта. Показано, что игнорирование неравномерности нагрева резервуара приводит к ошибке в прогнозировании температуры до 40%.

В третьем разделе построена стохастическая модель нагрева РВС, которая учитывает случайность теплового потока от пожара, вызванную случайными пульсациями формы факела и его температуры. В этом случае температура и площади взаимного облучения между факелом и резервуаром описываются случайными функциями. На основании серии экспериментов сделан вывод о стационарности и нормальности распределения указанных случайных процессов, оценены параметры распределения. Показано, что температура нагреваемого резервуара также будет подчиняться нормальному закону, построена система дифференциальных уравнений, позволяющая определить ее математическое ожидание и дисперсию.

В четвертом разделе построена модель горения неполного резервуара с нефтепродуктом. Модель учитывает теплопередачу между факелом, сухой стенкой резервуара и поверхностью нефтепродукта. Ее особенностью является учет неравномерного нагрева сухой стенки. Модель позволяет оценить длину факела, выступающего над резервуаром и определить распределение температур по сухой стенке резервуара. Построена модель охлаждения резервуара (горящего или негорящего) струями воды, опирающаяся на теорию жидких пленок, гравитационно стекающих по вертикальным поверхностям. На основании проведенных экспериментов оценено относительное количество воды, отскакивающее при ударе струи от стенки и не участвующее в ее охлаждении. Построенная модель позволяет оценить достаточность охлаждения резервуара.

В пятом разделе сформулирована задача оптимального расположения и выбора боевых задач для пожарных стволов при локализации пожара в резервуарном парке. Рассмотрена детерминированная и стохастическая постановки задачи. Предложен метод и алгоритм ее решения, охватывающий оба случая. Построены оценки вероятностей достижения температуры самовоспламенения негорящим резервуаром

и вероятности деформации сухих стенок горящего резервуара. Для характеристики того или иного варианта размещения стволов предложено использовать безразмерную величину, пропорциональную математическому ожиданию суммарного времени тушения пожара во всех резервуарах, с учетом возможной деформации стенок горящего резервуара и взрыва (воспламенения) соседних резервуаров.

В шестом разделе разработанные модели применяются для анализа типовых пожарных ситуаций в резервуарных группах с различными видами нефтепродуктов. Показано, что стохастическая модель, являясь обобщением детерминированной модели, более адекватно описывает пожарную ситуацию и возможные опасности. Выявлены условия, при которых обе модели дают эквивалентные результаты, и условия, при которых влиянием случайных факторов пренебрегать нельзя. Показано, что стохастический подход к прогнозированию каскадного развития пожара и алгоритм оптимального размещения сил и средств является более эффективным в смысле ожидаемого ущерба от пожара по сравнению с методикой, приводимой в Инструкции по тушению пожаров нефти и нефтепродуктов (на 60%), и решением, предлагаемым экспертами (на 40%).

Ключевые слова: резервуарный парк, каскадное распространение пожара, тепловой поток, нагрев резервуара с нефтепродуктом, стохастическая модель, локализация пожара, ликвидация пожара, оптимальное размещение сил и средств.

ABSTRACT

Basmanov A.E. Fundamental theory of prevention of chain fire spread at the fuel tank stores and raise of efficiency of its liquidation. – Manuscript.

Thesis for the doctor degree of the technical sciences on the specialty 21.06.02 – “Fire safety”. Civil defence university of Ukraine, Kharkov, 2006.

The stochastic approach to simulation of fire situations at the fuel tank store is proposed and justified in this thesis. The approach is based on usage of stochastic processes for the describing of heating processes in burning tanks and next ones. The input data for model are the stochastic processes in the burning tank, the outcome data is a law of temperature distribution in the next tanks and its parameters. The model of heating of the fuel tank under thermal influence of a fire is constructed. The unique feature of model is irregular heating of the tank and interaction between its parts. The method of an estimation of probability of the loss of hardness by steelworks for burning tank and probability of achieving the self-ignition point by the neighbour tank is proposed. The method of computation of cooling effect of high-pressure fire fighting hose units is proposed. The designed methods allow to forecast the chain fire spread at the fuel tank store and to make a decision about necessity of cooling the giving tank. It is approved, that the stochastic model in matching with determined model allows describe the fire situation more adequately

because it considers the random factors. It is found the conditions, for which one both models give equivalent results, and the conditions, for which one influencing of random factors is essential. The method of an estimation of efficiency of operating of fire-brigades for fire localization at fuel tank store is proposed. The method and algorithm of optimal disposition of man-power and technical facilities for fire localization at the fuel tank store is proposed. This algorithm can be used for the development of the fire response plan, forecasting the chain fire spread, finding the urgent tasks.

Keywords: fuel tank store, chain fire spread, heat flow, heating of the fuel tank, stochastic model, fire localization, fire fighter action, optimal disposition of man-power and technical facilities.

Підписано до друку 30.10.2006 р.

Формат 60x84 1/16.

Умов. друк. арк. 1,8.

Облік. вид. арк. 2,2.

Зам. № _____ Тираж 100 прим.

Надруковано в типографії Університету цивільного захисту України.

61023, м. Харків, вул. Чернишевського 94