

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ  
УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ ЦИВІЛЬНОГО  
ЗАХИСТУ**

**НІЖНИК ВАДИМ ВАСИЛЬОВИЧ**



УДК 614.841.334.1

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ОЦІНЮВАННЯ НЕБЕЗПЕКИ  
ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ НА СУМІЖНІ БУДІВЕЛЬНІ ОБ'ЄКТИ**

Спеціальність 21.06.02 — Пожежна безпека

**АВТОРЕФЕРАТ**

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Українському науково-дослідному інституті цивільного захисту, м. Київ.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Поздєєв Сергій Валерійович**  
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв  
Чорнобиля Національного університету цивільного  
захисту України,  
головний науковий співробітник

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Ковалишин Василь Васильович**  
Львівський державний університет безпеки  
життєдіяльності,  
завідувач кафедри ліквідації наслідків надзвичайних  
ситуацій

доктор технічних наук, професор  
**Беліков Анатолій Серафимович**  
Придніпровська державна академія будівництва й  
архітектури,  
завідувач кафедри безпеки життєдіяльності

доктор технічних наук, професор  
**Костенко Віктор Климентович**  
Донецький національний технічний університет МОН  
України,  
завідувач кафедри природоохоронної діяльності

Захист відбудеться «23» квітня 2020 р. об 11.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.707.01 Національного університету цивільного захисту України за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету цивільного захисту України за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94 та на сайті спеціалізованої вченої ради Д 64.707.01 за електронною адресою: <http://nuczu.edu.ua>

Автореферат розісланий «19» березня 2020 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д 64.707.01



А.О. Михайлюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Згідно із статистичними даними про пожежі встановлено, що кожного року в Україні від загальної кількості пожеж близько у 2000 мають місце випадки, коли відбувається поширення пожежі між суміжними будівельними об'єктів унаслідок теплового впливу. Одним із превентивних заходів щодо недопущення поширення вогню між будівельними об'єктами є встановлення між ними протипожежних відстаней. При цьому, менша за необхідну протипожежна відстань, що не забезпечує умову безпеки щодо непоширення пожежі на суміжні об'єкти, приводить до того, що пожежа поступово охоплює велику площу забудови і веде до більших соціально-економічних втрат. З іншого боку необґрунтоване збільшення протипожежної відстані відносно необхідного значення сприяє нераціональному використанню земельних ресурсів. Зокрема, відомо, що 1 м<sup>2</sup> незабудованої території становить близько 20 % вартості такої ж площі забудованої території. Викладене підкреслює необхідність проведення наукових досліджень у напрямку створення методів обґрунтування необхідних протипожежних відстаней між будівельними об'єктами.

Дослідженнями щодо експериментального та розрахункового визначення протипожежних відстаней між будівельними об'єктами присвячені роботи: Грушевського Б.В., Гундаря С.В., Кривошеєва І.А., Ликова А.В., Лободи Е.А., Підгрушного А.В., Ройтмана М.Я., Романенка П.Н., Яковлева Л.І., Peter Collier. Під час дослідження процесів теплообміну між вогнищем пожежі та речовинами і будівельними матеріалами, на які впливає тепло від пожежі внесли значний вклад вітчизняні та закордонні вчені: Бакширцев М.П., Басманов А.Е., Беліков А.С., Кашмаров Ю.А., Ковалишин В.В., Костенко В.К., Новак С.В., Новіков І.Т., Нуянзін О.М., Поздєєв С.В., Тищенко О.М., Хасанов І.Р., E. Garlsson, P. Tofito та ін. Але при цьому поза увагою залишилися питання створення сучасного методу за допомогою якого можлива кількісна розрахункова оцінка можливості поширення пожежі від вогнища пожежі на суміжні будівельні об'єкти із урахуванням найбільш значущих параметрів, що впливають на процеси теплообміну під час пожежі.

Застосування існуючих підходів щодо оцінювання протипожежних відстаней за допомогою розпорядчого методу, який передбачає використання унормованих табличних значень не дає можливості врахування параметрів, що впливають на процеси теплообміну між об'єктами під час пожежі. Перспективним є розроблення та впровадження розрахункових (параметричних) методів, які дозволили б врахувати конкретні характеристики об'єктів з огляду на різні сценарії пожежі у випадку коли один з двох об'єктів може розглядатися як такий, що поширює пожежу на інший, або на який вона може бути поширена з боку іншого. Окрім цього, при розробці таких методів має бути врахована пожежна небезпека будівельним матеріалів, конструкцій, а також геометрія та величина пожежної навантаги, площа та кількість прорізів у будинку тощо. Для цього можна використовувати різні математичні моделі, які за складністю мають відповідну ієрархію, в основі якої лежать прості розрахунково-табличні методи або методи із використанням алгебраїчних

співвідношень, а на її вершині знаходяться польові моделі із використанням систем диференціальних рівнянь у часткових похідних у числовій реалізації із застосуванням потужних комп'ютерних комплексів.

Тож дослідження, спрямовані на розкриття закономірностей зміни параметрів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами, що є науковою основою для створення розрахункового методу оцінювання небезпеки поширення пожежі між такими об'єктами при їх проектуванні та експлуатуванні і слугують теоретичною базою для встановлення протипожежних відстаней від одного об'єкту до іншого є актуальною науковою задачею. Реалізація якої дозволить враховувати найбільш значущі фактори, що впливають на процеси можливого поширення пожежі, при цьому досягати максимального економічного ефекту під час встановлення мінімальних протипожежних відстаней між суміжними будівельними об'єктами.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана відповідно до основних напрямів наукової діяльності УкрНДЦЗ в рамках Переліку розробок на створення науково-технічної продукції з нормування у сферах будівництва та житлової політики на 2018 рік за бюджетною програмою КПКВК 2751030 затвердженого наказом Мінрегіону № 30 від 12.02.2018, Програми робіт з національної стандартизації на 2019 рік затвердженої наказом ДП «УкрНДНЦ» від 25 лютого 2019 року № 33, Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої» ратифікованої із заявою Законом № 1678-VII від 16.09.2014, Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2020 року затвердженої Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 № 844-р, замовленнями Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України на науково-дослідні роботи, які виконано в УкрНДЦЗ за участю здобувача у якості керівника роботи, результати яких використано в дисертації: «Провести дослідження та обґрунтувати вимоги до розрахункового методу визначення мінімальних протипожежних відстаней» (ДР № 0118U004739), «Провести дослідження та обґрунтувати загальні вимоги пожежної безпеки до об'єктів різного призначення» (ДР № 0117U001199), «Провести дослідження і розробити проект зміни № 2 до ДБН В.1.1.7-2002» (ДР № 0113U004932).

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи виявлення закономірностей зміни параметрів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами для розвитку наукових основ щодо розрахункових методів оцінювання небезпеки поширення пожежі з одного об'єкта на інший як наукового підґрунтя для встановлення протипожежних відстаней між такими об'єктами при їх проектуванні та експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- проаналізувати теоретичні дослідження та нормативну базу щодо оцінки безпечних відстаней між об'єктами промисловості та будівництва з точки зору пожежної безпеки та виявити шляхи їх удосконалення;

- обґрунтувати критеріальну базу, що характеризує небезпеку поширення пожежі на суміжні об'єкти та яка враховує їх конструктивні особливості, властивості матеріалів та сценарій пожежі;

- провести обґрунтування математичних моделей для описання теплообміну між об'єктом, на якому виникла пожежа та суміжним об'єктом з метою створення розрахункової бази із застосуванням комп'ютерних технологій;

- розробити методики експериментальних досліджень процесів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами;

- провести експериментальні дослідження за розробленими методиками та на основі отриманих експериментальних даних побудувати регресійні моделі температури нагріву поверхні суміжного об'єкту;

- порівнюючи результати експериментальних досліджень з відповідними їм газо-гідродинамічною моделлю, моделлю на основі рівняння теплообміну та регресійною моделлю довести їх адекватність і оцінити точність;

- використовуючи розроблені математичні моделі провести чисельний експеримент щодо визначення протипожежних відстаней в залежності від найбільш значущих факторів;

- на основі отриманих закономірностей розробити методичне забезпечення для розрахункової оцінки протипожежних відстаней між суміжними об'єктами;

- дослідити економічну ефективність розробленого методичного забезпечення щодо розрахункової оцінки протипожежних відстаней.

**Об'єкт дослідження** – процеси теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами, а також умови загорання матеріалів зовні чи всередині будівельних об'єктів унаслідок цих процесів.

**Предмет дослідження** – зв'язок параметрів суміжних будівельних об'єктів та параметрів процесів теплообміну при пожежі, а також можливість загорання матеріалів на даних об'єктах, що є причиною поширення пожежі між ними, як основа для розвитку розрахункових методів оцінювання протипожежних відстаней.

**Методи дослідження:** під час виконання дисертаційної роботи використано: комплексний аналіз і узагальнення раніше виконаних робіт щодо оцінювання протипожежних відстаней; математичне моделювання процесів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами шляхом використання методів стаціонарної і нестаціонарної теплопровідності та польових методів; методи кінцевих різниць за схемою «предиктор-коректор», кінцевих об'ємів для розв'язання диференціальних рівнянь; метод Ейлера для розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса під час моделювання процесів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами; методи вимірювання температури та вологості повітря, атмосферного тиску, швидкості вітру під час експериментальних досліджень; метод на наявність викидів та квазिवикидів у результатах досліджень (Грабса); метод перевірки належності дисперсій результатів досліджень до однієї генеральної сукупності (Фішера); метод дихотомії для обґрунтування розміру розрахункової сітки комп'ютерних

моделей; табличний метод, спрощений метод, розрахунковий метод із використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності, розрахунковий метод із використанням польових моделей для оцінювання протипожежних відстаней; метод визначення пожежної навантаги; метод планування експерименту; методи полігонних вогневих випробувань (за розробленими методиками) для дослідження процесів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами; методи математичної статистики для оброблення результатів експериментальних досліджень.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У роботі одержані нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності забезпечують вирішення актуальної проблеми розвитку наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти. Наукова новизна, яких полягає у розкритті закономірностей впливу параметрів теплообміну при пожежі суміжних будівельних об'єктів на величину протипожежних відстаней між ними.

У результаті **вперше** отримані наступні наукові результати:

1. Для визначення протипожежних відстаней обґрунтована критеріальна база, яка заснована на прямій індикації можливості утворення пожежі на суміжному будівельному об'єкті за величиною температури нагріву матеріалів даного будівельного об'єкту, якщо величина цієї температури перевищує 80 % від значення температури їх займання.

2. Показано, що врахування у математичних моделях газо-гідродинаміки та теплопереносу впливу параметрів, саме: теплоутворювальної здатності пожежної навантаги, коефіцієнту прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалості опромінювання на температурні показники поверхні елементів будівельних об'єктів, що опромінюються від факелу пожежі, дозволяє обґрунтувати безпечні протипожежні відстані для різних будівельних об'єктів.

3. Обґрунтовано розміри та конструкція експериментального зразка, що імітує фрагмент будинку для якого визначається протипожежна відстань, з метою дослідження найбільш несприятливих умов, при яких нагрівання поверхні суміжного будівельного об'єкту, що імітує зразок, буде максимальним.

4. Експериментальним шляхом виявлено і формалізовано у вигляді регресійної поліноміальної залежності третього порядку закономірності зміни температури на суміжному будівельному об'єкті в залежності від відстані між цим об'єктом і полум'ям пожежі.

5. Виявлені залежності величини протипожежних відстаней між будівельними об'єктами із горючим, негорючим фасадами, а також об'єктами промислових підприємств із використанням горючих рідин від теплоутворювальної здатності пожежної навантаги, коефіцієнту прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалості опромінювання, що мають вигляд лінійних (по кожному з факторів) регресійних залежностей.

6. Обґрунтовані довідникові таблиці для реалізації спрощеного метода визначення протипожежних відстаней за значеннями параметрів теплоутворювальної здатності пожежної навантаги, коефіцієнту прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалості опромінювання.



### **Набули подальшого розвитку:**

1. Експериментальне визначення параметрів теплообміну при пожежі у суміжних будівельних об'єктах із використанням зразків, що імітують їх частини, і які піддаються найбільшому тепловому впливу.

2. Застосування розрахункових інженерних методів обґрунтування протипожежних відстаней для будинків з горючим та негорючим фасадами, а також промислових підприємств з горючими рідинами з використанням довідникових таблиць за параметрами приміщень із пожежами.

### **Удосконалено:**

1. Науково-методичну базу забезпечення пожежної безпеки при розташуванні будівель і споруд для запобігання поширення пожежі між ними.

2. Методичну та експериментальну базу дослідження теплового впливу пожежі на суміжні будівельні об'єкти.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практична цінність досліджень полягає у створенні методичної бази щодо розрахункового обґрунтування протипожежних відстаней між суміжними об'єктами, що дозволяє більш раціонально використовувати територію забудови тим самим досягти суттєвого скорочення економічних витрат. Це може бути досягнуто за рахунок комплексного врахування найбільш значущих факторів, які можуть вплинути на теплообмін між пожежею та суміжними об'єктами будівництва.

Розроблена методична база є підґрунтям для створення нормативного забезпечення для оцінювання протипожежних відстаней між суміжними будівельними об'єктами і впроваджена при розробці національного стандарту ДСТУ «Пожежна безпека. Оцінювання протипожежних відстаней між суміжними будівельними об'єктами. Основні положення».

Результати проведених досліджень також впроваджені у навчальний процес Черкаського інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України при викладанні дисциплін «Пожежна профілактика в населених пунктах», «Будівлі і споруди та їх поведінка в умовах пожежі» (акт від 05.09.2019 року), у діяльність Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України (акт від 26.08.2019 року), ТОВ «Шілд-Фаер» (акт від 10.10.2019 року), ДП Український державний науково-дослідний інститут проектування міст «Діпромісто» ім. Ю.М. Білокозя (акт від 19.09.2019 року).

Результати дисертаційної роботи втілено в розробку одного патенту України на корисну модель.

**Особистий внесок здобувача** полягає в участі у формулюванні науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, самостійному визначенні мети і завдань досліджень, об'єкту та предмету досліджень, аналізі вітчизняних та закордонних джерел інформації, удосконаленні та розробленні методів і методик досліджень, проведенні експериментальних досліджень, а також в обробленні їх результатів, формуванні висновків. Дана дисертація є самостійною роботою автора. Всі положення, винесені на захист, та результати їх застосування приведені в роботах [1 – 38].

В наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у наступному. В роботі [1] проведено теоретичні дослідження

щодо небезпеки поширення пожежі між будинками наземного космічного ракетного комплексу «Циклон-4» в Федеративній Республіці Бразилія та встановлено вимоги щодо протипожежних відстаней. В роботі [2] на підставі аналітичних досліджень запропоновані вимоги щодо встановлення можливості доступу та безпечних відстаней від будинків до джерел протипожежного водопостачання. У роботі [3] проведені експериментальні дослідження процесів теплопередачі від вогнища пожежі до поверхонь конструкцій будівель та споруд і вплив на дані процеси автоматичних систем пожежогасіння на основі полігонних вогневих випробувань фрагментів таких конструкцій із вогнищами пожежі. У роботі [4] проведено аналіз ДБН В.1.1-7 з урахуванням сучасних підходів щодо нормування пожежної безпеки об'єктів будівництва, зокрема в частині щодо виконання основної вимоги «Пожежна безпека», а саме: поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти повинно бути обмежено. Визначено шляхи удосконалення будівельних норм щодо обмеження поширення пожежі на суміжні об'єкти, розглянуті критерії, що впливають на процеси теплообміну між суміжними об'єктами під час пожежі. В роботі [5] досліджені процеси теплообміну при пожежі з використанням методу кінцевих елементів у модулях сховища відпрацьованого ядерного палива як наукове підґрунтя щодо розрахункової оцінки небезпеки поширення пожежі між секціями та окремими будівельними об'єктами підприємств ядерної енергетики. В роботі [6] представлена феноменологічна модель зменшення горючості карбомідоформальдегідних смол пінопластів, що можуть використовуватися у фасадних системах будинків та споруд як елемент теоретичної бази щодо обґрунтування протипожежних відстаней із урахуванням реальних теплових процесів під час горіння. В роботі [7, 28] обґрунтовано нові методичні підходи для розрахунку значення ступеня ризику негативних наслідків від пожежі, що можуть враховувати в тому числі значення протипожежних відстаней між суміжними об'єктами, а також критерій наявності автоматичних систем пожежогасіння. В роботі [8] проведено аналіз літературних джерел та обґрунтуванні залежності, що описують закономірності зв'язку між параметрами людського потоку при русі на різних видах шляху при пожежі із урахуванням критеріїв пожежної навантаги на шляхах евакуації та теплової дії осередку пожежі залежно від наявності прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях. В роботах [9, 29] проведені розрахунки надлишкового тиску вибуху в залежності від кількості пожежної навантаги та фізико-хімічних характеристик речовин та матеріалів, що її складають. Зроблено висновки щодо можливого впливу зазначених критеріїв на небезпеку поширення пожежі на суміжні будинки. В роботах [10] проаналізовано чинну нормативну базу щодо вогнестійкості будівельних конструкцій залежно від типу матеріалів, з яких вони виготовлені та запропонована модель дослідного зразка для оцінювання протипожежних відстаней експериментальними методами. В роботі [11] розглянуто ідею використання табличних, спрощених та уточнених розрахункових методів під час оцінювання теплового впливу на будівельні конструкції та матеріали. В роботі [12] запропоновано схему розташування термопар в середині дослідного зразка, що забезпечує наближення ізотерм, які



відтворюють температурне поле у середині зразка та апробована модель дослідного зразка для оцінювання протипожежних відстаней експериментальними методами. В роботі [13] обґрунтовано місця дислокації пожежно-рятувальних підрозділів та встановлений взаємозв'язок їх логістичних характеристик із тривалістю прибуття даних підрозділів на пожежу, що використовується як елемент теоретичної бази щодо оцінювання протипожежних відстаней. В роботі [15] проведені розрахунки щодо обґрунтування безпечних протипожежних відстаней між житловим будинком та АЗС із використанням сучасних комп'ютерних комплексів та здійснена верифікація запропонованих математичних моделей щодо оцінювання протипожежних відстаней розрахунковими методами. В роботі [17] розглянутий вплив на процеси теплопередачі між суміжними будівельними об'єктами та їх секціями при пожежі наявності автоматичних систем водяного пожежогасіння. В роботі [18] проведено обґрунтування параметрів пожежного навантаження для закритих вогневих боксів в яких відбувається імітування пожежі в середині будинку. В роботі [19] досліджено геометрію і енергетичні параметри факелу пожежі над ферментатором та проведені розрахунки з використанням методів обчислювальної газогідродинаміки щодо обґрунтування величини безпечної протипожежної відстані між ферментаторами. В роботах [20] обґрунтовано методики експериментальних досліджень процесів теплопередачі між суміжними будинками із прорізами у зовнішніх будівельних конструкціях та обґрунтовано місця улаштування досліджуваних зразків по відношенню до джерела теплового випромінювання. В роботі [21, 30] здійснено апробацію методу інтерполяції температурних розподілів, який можна використати під час дослідження закономірностей зміни температури на суміжному будівельному об'єкті в залежності від відстані до цього об'єкту від полум'я, пожежі на прикладі фрагментів дерев'яних колон. В роботі [22, 35, 37] проведені експериментальних досліджень теплового впливу факелу модельного вогнища пожежі класу В на елементи суміжних об'єктів. Здійснено перевірку результатів дослідження на наявність викидів та квазивикидів за критерієм Граббса. Визначено залежність температури в модельному вогнищі пожежі класу 55 В на різних висотах від часу теплової дії. В роботі [23, 33] проведено повно факторний експеримент щодо прогнозування вогнестійкості дерев'яних колон та запропоновано використання зазначеного методу під час розроблення табличних даних щодо визначення протипожежних відстаней. В роботі [25] розроблено методику та проведено дослідження впливу густини теплового потоку на елементи суміжних будівельних об'єктів залежно від тривалості теплового впливу та відстані від вогнища пожежі. Запропонований новий підхід щодо критеріїв небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти, в якості критерію має використовуватись температура займання матеріалів, що піддаються тепловому впливу з боку факелу пожежі, на суміжному будинку. В роботі [26, 31] розроблено математичну модель процесів теплового впливу пожежі через віконний проріз будинку на елементи суміжних об'єктів за методами газодинаміки та проведено моделювання процесів теплового впливу пожежі на суміжний будинок та здійснено валідацію розробленої математичної

моделі із результатами експериментальних досліджень. В роботі [27] розроблено зразок для дослідження процесів теплопередачі між джерелом теплового випромінювання та суміжними об'єктами та запропоновано місце встановлення датчика вимірювання температури. В роботі [32, 34] обґрунтовано методики експериментальних досліджень процесів теплопередачі між промисловими спорудами, що не мають огорожувальних будівельних конструкцій та обґрунтовано місця улаштування досліджуваних зразків по відношенню до джерела теплового випромінювання. В роботі [36] отримано регресійні залежності зміни температури на поверхні фасаду будівлі від відстані розташування такої будівлі від осередку горіння та різної тривалості теплового впливу (12 хв., 21 хв., 30 хв.) В роботі [38] запропоновано використовувати критерій «температура займання матеріалів» як основний при визначенні протипожежних відстаней між суміжними будівельними об'єктами. На основі регресійної лінійної залежності обґрунтовано розрахунково-табличний метод визначення протипожежних відстаней для трьох різних об'єктів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень доповідались, обговорювались та отримали позитивне схвалення на міжнародних та національних науково-практичних конференціях: Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю Надзвичайні ситуації: безпека та захист (м. Черкаси, 2015 р.), VII Всеукраїнська науково-практичної конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2017 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Технології та інфраструктура транспорту» (м. Харків, 2018 р.); 20 Всеукраїнська науково-практична конференція «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку» (м. Київ, 2018 р.); VII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 2018 р.); VIII Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2018 р.); 7<sup>th</sup> International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings" (Kharkiv, 2018); X Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2019 р.); 21 Всеукраїнська науково-практична конференція (за міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах» (м. Київ, 2019 р.); XI Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2019 р.); VIII Международная научно-практическая конференция, посвященная 20-летию органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация» (г. Минск, 2019 г.).

**Публікації.** Основні положення і наукові результати дисертації увійшли до 38 опублікованих робіт, серед яких: 6 статей у закордонних фахових наукових виданнях; 16 статей у наукових фахових виданнях України, 4 статті в інших виданнях (індексуються міжнародними наукометричними базами даних);

11 доповідей і тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій; 1 патент на корисну модель.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 316 найменувань, містить 409 сторінок друкованого тексту (з них 399 сторінок основного тексту), 62 таблиці, 203 рисунки, 5 додатків.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, задачі, об'єкт і предмет досліджень, відображено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, дані щодо апробації, а також публікації її результатів.

У першому розділі «Аналіз сучасних теоретичних та експериментальних методів досліджень теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами будівництва» показані існуючі підходи щодо оцінювання протипожежних відстаней та можливі альтернативи, їх переваги та недоліки. Встановлено, що питання визначення протипожежних відстаней на сьогоднішній день реалізуються за допомогою розпорядчого методу нормування, який передбачає використання чітких табличних значень без можливих альтернатив. При цьому, такі табличні значення встановлювалися без відповідного наукового обґрунтування та визначалися, як правило, експертним шляхом. Зазначене має негативний вплив на статистичні дані про пожежі в наслідок яких має місце поширення пожежі від одного об'єкту на інший.

Критерії за якими обґрунтовуються протипожежні відстані, як вітчизняного так і зарубіжного досвіду, відрізняються. В переважній своїй більшості проведені на сьогодні дослідження ґрунтуються на критерії густини теплового потоку. Разом з цим, недоліком такого підходу є те, що на сьогоднішній день відсутня статистична база критичних значень по тепловому потоку для різних речовин і матеріалів. Крім того, тепловий потік не є прямою величиною, яка може бути асоційована із причинами поширення та охоплення пожежею суміжних будівель. Перспективним є використання критерію, який забезпечує умову прямої фіксації можливості утворення пожежі на суміжному будинку, враховуючи природу матеріалу, що в ньому використовується, а саме температурний критерій. При цьому, умову безпеки можна записати через допустиму температуру:

$$T_p \leq T_d = 0,8T_z \quad (1)$$

де  $T_p$  – розрахункова температура, °С,  $T_d$  – допустима температура, °С,  $T_z$  – температура займання, °С.

А оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти будівництва здійснюють за двома можливими проектними сценаріями пожежі ( $R_1$  – під час пожежі в одному із суміжних об'єктів будівництва та  $R_2$  – під час пожежі в іншому із суміжних об'єктів будівництва) далі приймають більше значення із двох розрахункових протипожежних відстаней ( $R$ ):

$$R=K_6 \cdot \max \{R_1, R_2\}, \quad (2)$$

де  $K_6$  - коефіцієнт безпеки.

Останнім часом спостерігається інтенсивний розвиток розрахункових методів, зокрема методи комп'ютерного моделювання під час дослідження процесів теплопередачі та теплообміну у різних сферах виробничої промисловості. Але використання таких методів потребує свого розвитку та апробування щодо дослідження та оцінювання протипожежних відстаней. Також без належного наукового обґрунтування залишаються такі питання: оцінювання протипожежних відстаней за температурним критерієм, розробка алгоритмів, систематизування та апробація розрахункових методів визначення протипожежних відстаней, узагальнення та розроблення процедур використання методів комп'ютерного моделювання, як такі, що залишаються не до кінця розкритими і потребують подальшого наукового розвитку.

Вирішення зазначених задач дасть змогу більш точно та обґрунтовано підходити до питання визначення протипожежних відстаней між суміжними об'єктами за рахунок уникнення необґрунтованих коефіцієнтів запасу та похибок, що мали місце під час складання табличних даних.

Отже, існуючі підходи не адаптовані та не апробовані для вирішення зазначених вище завдань та повинні отримати подальший розвиток під час використання, як складних уточнених математичних моделей, що реалізуються за допомогою сучасного комп'ютерного забезпечення, так і спрощених розрахункових методів та табличних методів. Для цього потрібно провести додаткові дослідження параметрів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами.

У другому розділі «Розроблення математичних моделей процесів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами» на основі аналізу літературних джерел визначено перелік параметрів, які характеризують тепловий вплив від пожежі на суміжну будівлю та запропоновано їх перелік, який використаємо в подальших дослідженнях, а саме: теплоутворювальна здатність пожежної навантаги, коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях, тривалість опромінювання. На підставі зазначеного визначено класифікацію будинків за чотирма рівнями безпеки із урахуванням величини пожежної навантаги табл. 1.

Таблиця 1

Класифікація будинків за величиною пожежної навантаги

Рівень небезпеки будинку	Пожежна навантага, МДж/м <sup>2</sup>
Безпечні	≤100
Малонебезпечні	від 100 до 400 включно
Небезпечні	від 400 до 1500 включно
Високонебезпечні	>1500

Також запропоновані найбільш характерні проектні сценарії пожежі та теплового впливу від пожежі на суміжний об'єкт будівництва, які доцільно

розглядати під час оцінювання протипожежних відстаней, а саме: через прорізи в огорожувальних конструкціях будинків, від фасадної частини будинку, від покрівлі будинку, від зовнішньої технологічної установки.

Під час вибору розрахункових методів, за ідею запропоновано можливість реалізації ієрархічного підходу від простих методів, які мають певні припущення, що впливають на умови отримання більш жорсткого результату до уточнених методів, які дозволяють враховувати найбільш значущі фактори, що впливають на процеси можливого поширення вогню між будинками.

Під час передачі тепла від факелу пожежі на поверхню конструкції, матеріалу або речовини суміжного об'єкту будівництва, який опромінюється теплом, має виконуватися умова теплового балансу із врахуванням втрат тепла через не обігрівну поверхню за рахунок конвекції та випромінювання:

$$q = q_{\text{пов}} = q_{\text{в.сеп.}} \quad (3)$$

де  $q$  – кількість тепла, що випромінюється факелом полум'я, Вт,  $q_{\text{пов}}$  – кількість тепла, що поглинута поверхню конструкції, матеріалу або речовини суміжного об'єкту будівництва, Вт,  $q_{\text{в.сеп.}}$  – кількість тепла, що передано конструкцією, матеріалом або речовиною суміжного об'єкту будівництва з боку не обігрівної поверхні, Вт.

Використовуючи закони Стефана-Больцмана, Фур'є та Ньютона-Рихмана та формулу (3) можна записати рівняння теплового балансу, яке має вигляд:

$$\left(1 - \frac{\lambda}{\alpha\delta + \lambda}\right) \frac{\lambda T_s}{\delta} - \frac{\alpha\lambda T_n}{\alpha\delta + \lambda} - \Phi\sigma\epsilon_m\epsilon_f \left( (T_s - 273)^4 - (T_f - 273)^4 \right) = 0 \quad (4)$$

де  $\Phi$  – кутовий коефіцієнт опромінювання,  $\epsilon_m$  – ступінь чорноти поверхні матеріалу,  $\epsilon_f$  – ступінь чорноти факелу полум'я,  $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>·°C<sup>4</sup>,  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·°C,  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>2</sup>·°C,  $T_0$  – температура матеріалу суміжного об'єкту, °C,  $T_f$  – температура факелу пожежі, °C,  $T_s$  – температура на поверхні суміжного об'єкту, °C,  $T_n$  – температура внутрішнього середовища, °C.

Рівняння (4) може бути використане для знаходження протипожежної відстані, що входить у вираз для визначення коефіцієнту кутового опромінювання  $\Phi$  (R):

- полум'я пожежі та поверхня, що опромінюється розташовані паралельно один відносно одного:

$$\Phi = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{a}{\sqrt{1+a^2}} \arctg\left(\frac{b}{\sqrt{1+b^2}}\right) + \frac{b}{\sqrt{1+b^2}} \arctg\left(\frac{a}{\sqrt{1+a^2}}\right) \right] \quad (5)$$

- полум'я пожежі та поверхня, що опромінюється розташовані перпендикулярні один відносно одного:

$$\Phi = \frac{1}{2\pi} \left[ \arctg(a) - \frac{b}{\sqrt{1+b^2}} \arctg\left(\frac{a}{\sqrt{1+a^2}}\right) \right] \quad (6)$$



- полум'я пожежі та поверхня, що опромінюється розташовані під кутом  $\theta$  один відносно одного:

$$\Phi = \frac{1}{2\pi} \left[ \operatorname{arctg}(a) - \frac{1-b \cos \theta}{\sqrt{1+b^2-2b \cos \theta}} \operatorname{arctg} \left( \frac{a}{\sqrt{1+b^2-2b \cos \theta}} \right) \right] + \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{a \cos \theta}{\sqrt{a^2+\sin^2 \theta}} \left( \operatorname{arctg} \left( \frac{b-\cos \theta}{\sqrt{a^2+\sin^2 \theta}} \right) \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{\cos \theta}{\sqrt{a^2+\sin^2 \theta}} \right) \right] \quad (7)$$

де  $a = L_L/R$ ,  $b = W/R$ ,  $L_L$  та  $W$  – висота та ширина, відповідно, поверхні, що випромінює тепло, м,  $R$  – розрахункова протипожежна відстань, м.

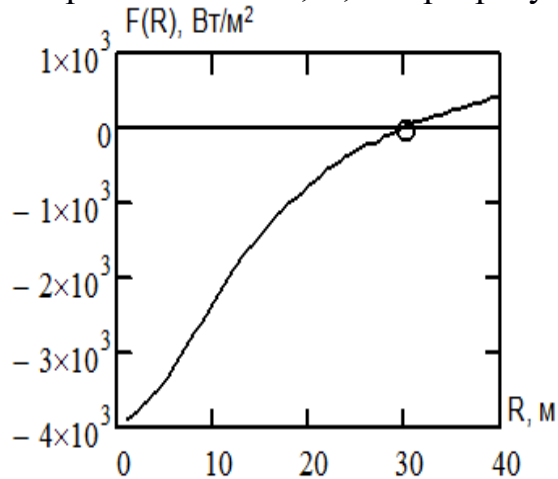


Рис. 1. Графік зміни теплового балансу залежно від відстані

Рівняння (4) має розв'язок відносно значення певної відстані, при якій температура поверхні конструкції, матеріалу або речовини суміжного об'єкту будівництва, який опромінюється теплом дорівнює допустимій температурі ( $T_d$ ). Для розв'язання рівняння (4) запропоновано графічний метод, суть якого полягає у побудові графіку функції, що представляє собою ліву частину рівняння в залежності від відстані. Після перетину кривої вісі абсцис, в якості протипожежної відстані береться найближче більше ціле значення ( $R$ ).

Для реалізації методу із використанням рівняння нестационарної теплопровідності:

$$c_p \rho \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T_p}{\partial z} \right) \quad (8)$$

де  $t$  – час теплового опромінювання, с,  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу або речовини, Вт/(м·°С),  $c_p$  – питома теплоємність матеріалу або речовини, Дж/(кг·°С),  $\rho$  – густина матеріалу або речовини, кг/м<sup>3</sup>.

Теплообмін між факелом пожежі та поверхнею визначають за рівнянням променистого тепло переносу:

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - \varphi_{ij}) \sigma T_j^4 = \sum_{j=1}^N \frac{1}{A_j} \left( \frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - \varphi_{ij} \frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_j} \right) q_j \quad (9)$$

де  $\delta_{ij}$  – параметр, який дорівнює 1 при, якщо  $i=j$ , та дорівнює 0, якщо  $i \neq j$ ,  $i, j$  – кількість елементів, на які розбивається поверхня, що випромінює тепло та опромінюється теплом відповідно,  $q_j$  – кількість теплоти, що передається від  $i$

поверхні, до  $j$  поверхні,  $\phi_{i,j}$  – кутовий коефіцієнт опромінювання.

За рівнянням (9) визначають тепловий потік на границі розрахункових областей та встановлюють граничні умови другого роду для вирішення нестационарного рівняння теплопровідності (8)

$$\lambda \left. \frac{\partial T_{pj}}{\partial r_j} \right|_{r_j} = Q_J \quad (10)$$

де  $r_j$  – відстань між центрами елементів  $i$  та  $j$ , м.

Для реалізації польового методу, що заснований на розв'язанні повної системи рівнянь Нав'є – Стокса, який включає:

- рівняння збереження маси:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = \dot{m}_b^m, \quad (11)$$

де  $t$  – час;  $\rho$  – густина;  $\vec{u}$  – вектор відносної швидкості,  $\dot{m}_b^m = \sum_a \dot{m}_{b,a}^m$  – швидкість утворення газових компонентів в наслідок випаровування,  $\vec{u}$  – двохелементний тензор, в матричній системі  $\vec{u} = [u, v, w]^T$ , що представлений тензорним добутком векторів  $u$  та  $u^T$ ;

- рівняння збереження імпульсу:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \nabla \cdot \rho u u + \nabla p = \rho g + f_b + \nabla \cdot \tau_{ij}, \quad (12)$$

де  $p$  – тиск,  $f_b$  – зовнішня сила, наприклад, такі як опір руху через краплі рідини,  $\tau_{ij}$  – тензор напруги;

- рівняння збереження енергії:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s u = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}^m - \dot{q}_b^m - \nabla \dot{q}^n - \varepsilon, \quad (13)$$

де  $h_s$  – ентальпія є функцією температури,  $h_s = \sum_a Y_a h_{s,a}$ ,  $h_{s,a}(T) =$

$\int_{T_0}^T C_{p,a}(T') dT'$ ,  $\frac{Dp}{Dt} = \frac{dp}{dt} + u \nabla p$ ,  $\dot{q}^m$  – швидкість виділення тепла на одиницю

об'єм із хімічної реакції,  $\dot{q}_b^m$  – витрачена енергія на випаровування крапель,

$\dot{q}^n$  – конвективні та радіаційні теплові потоки,  $\varepsilon$  – енергія розсіювання,

$\dot{q}^n = -k \nabla T - \sum_a h_{s,a} \rho D_a \nabla Y_a + \dot{q}_r^n$ ;

- рівняння стану газу, що встановлює зв'язок механічних параметрів та температури:

$$p = \frac{\rho RT}{W} \quad (14)$$

де  $R$  – універсальна газова стала.

Крім того, основні рівняння доповнюються математичними моделями, що мають враховувати супутні явища, а саме: модель конвективних та радіаційних потоків, модель горіння, модель турбулентності тощо.

У третьому розділі «Математичне моделювання процесів теплового впливу факела пожежі на елементи суміжних об'єктів» з метою перевірки (верифікації) відповідності запропонованих математичних моделей реальним процесам, проведено оцінювання протипожежних відстаней між висотним житловим будинком та автозаправним комплексом із використанням запропонованих математичних моделей та із урахуванням прийнятого на сьогоднішній день підходу.

Розглянуто два проектні сценарії пожежі:

- пожежа сталася на автозаправному комплексі в результаті аварії під час переливу палива (бензин А-95) із авто-бензовоза до підземних резервуарів через розгерметизацію, при цьому відбувся розлив палива загальним об'ємом 5000 л на всю площу ділянки зливу палива ( $S = 47,25 \text{ м}^2$ ) з подальшим загоранням палива;

- пожежа на першому поверсі висотного будинку в приміщенні, що найближче розташоване відносно дихальної арматури резервуарів, що розташовані на території автозаправного комплексу. Таке приміщення має площу  $102,1 \text{ м}^2$ .

Розрахункові схеми, що розроблені для моделі із використанням рівняння нестационарної теплопровідності та польової моделі наведені на рис. 2.

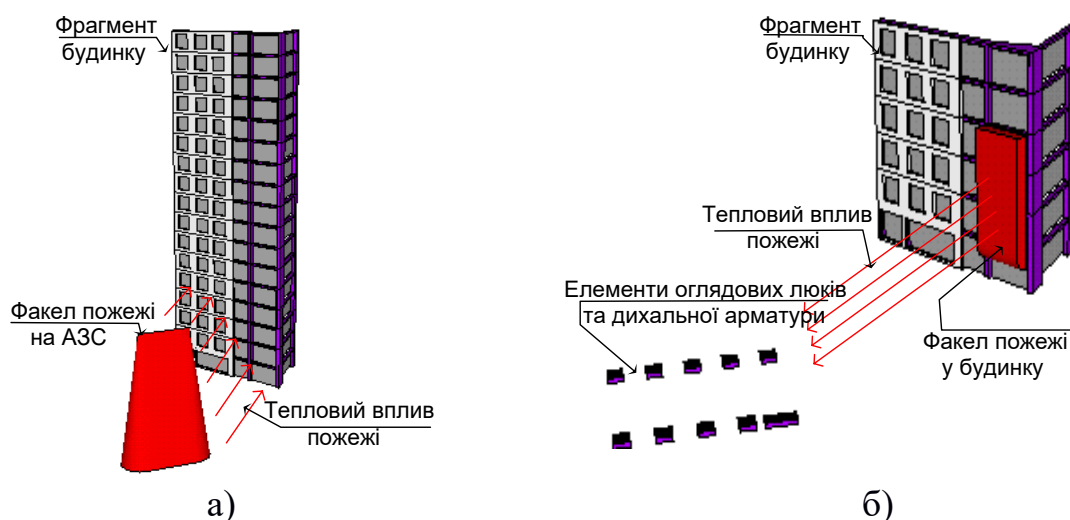


Рис. 2 – аркуш 1. Розрахункові схеми: а) – пожежа на АЗС; б) – пожежа у будинку (відповідно для моделі із використанням рівняння нестационарної теплопровідності та польової моделі)

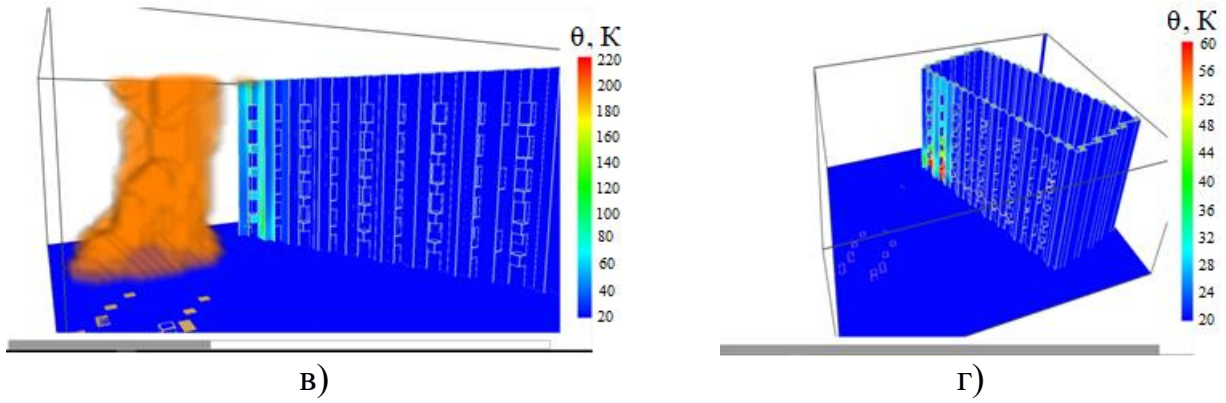


Рис. 2 – аркуш 2. Розрахункові схеми: в) – пожежа на АЗС; г) – пожежа у будинку (відповідно для моделі із використанням рівняння нестационарної теплопровідності та польової моделі)

Дані розрахунку наведені на рис. 3.

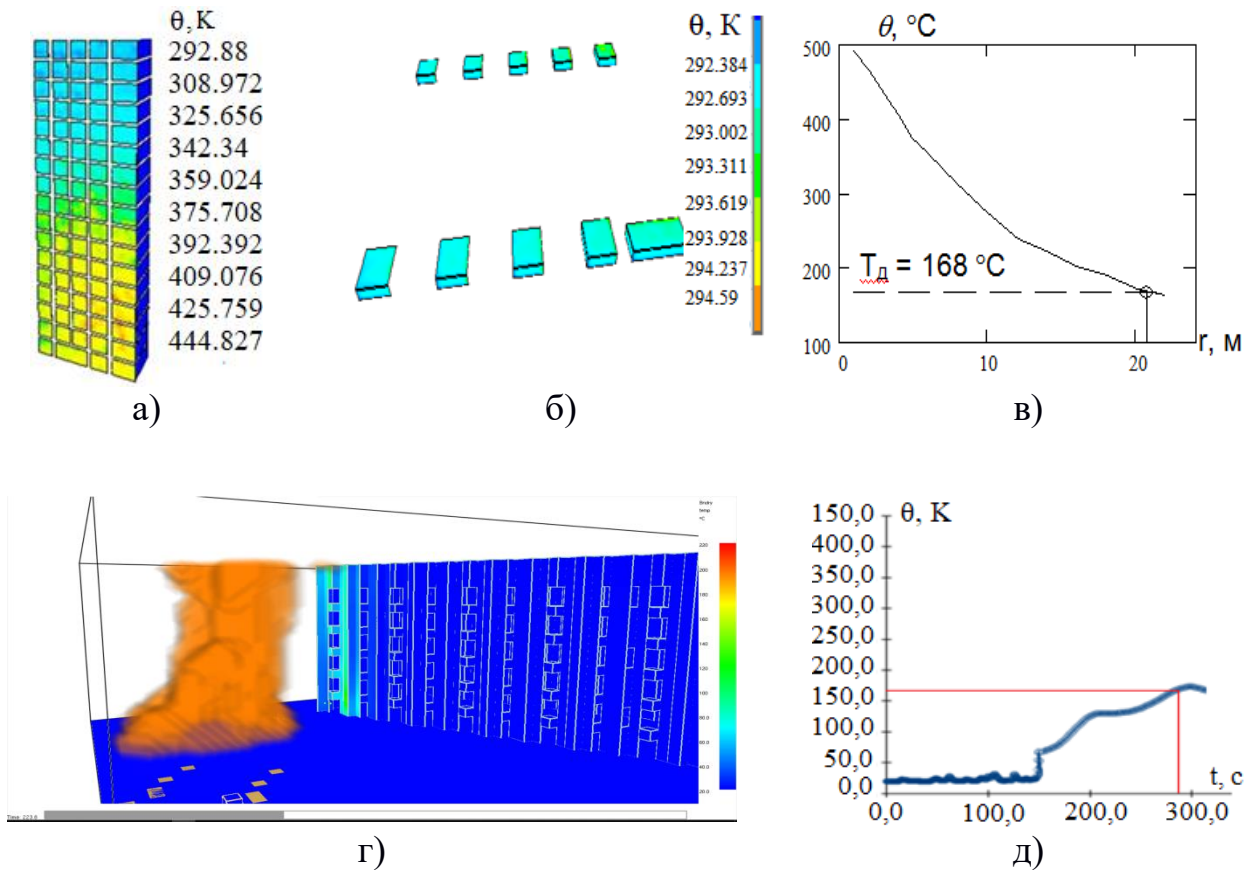


Рис. 3. Результати розрахунків: а) – пожежа на АЗС (відповідно для моделі із використанням рівняння нестационарної теплопровідності та польової моделі); б) – пожежа у будинку для моделі із використанням рівняння нестационарної теплопровідності; в) - залежність температури від відстані до факелу пожежі, що отримана за моделлю із використанням рівняння нестационарної теплопровідності; г) – пожежа на АЗС (відповідно для моделі із використанням рівняння нестационарної теплопровідності та польової моделі); д) - залежність температури від часу теплового впливу, що отримана за польовою моделлю

В даному випадку за критерій оцінювання протипожежної відстані прийнято температура займання штор, які наявні у віконних прорізах житлового будинку, що прийнята 210 °С. Із урахуванням коефіцієнту 0,8, допустиму температуру прийнято 168 °С. Узагальнені результати розрахунків наведені в табл. 2.

Таблиця 2

## Результати верифікації запропонованих математичних моделей

Математична модель	Результат щодо значення протипожежної відстані
Вимога державних будівельних норм	40 м
Спрощена модель	32 м
Модель із використанням рівняння нестационарної теплопровідності	24,7 м
Польова мотель	22,8 м

Таким чином, отримані результати підтверджують реалізацію запропонованої ідеї щодо створення ієрархічної структури розрахункових методів від простих, які дають результати з більшими коефіцієнтами запасу до складних, за допомогою яких можна отримати більш точні результати. При цьому, із використанням запропонованих математичних моделей отримані реальні дані, які забезпечують досить точні прогнози щодо мінімально необхідного значення протипожежної відстані між автозаправним комплексом та житловим будинком. Тобто, отримані дані відповідають очікуваним результатам.

Також показана гнучкість та універсальність математичних моделей таких як газо-гідродинамічна модель з урахуванням найбільш значущих факторів поширення пожежі, модель на основі рівняння променистого теплообміну, при цьому досягається максимальний економічний ефект під час встановлення мінімальних протипожежних відстаней.

**У четвертому розділі «Розроблення методик експериментальних досліджень процесів теплообміну»** наведені методи експериментальних досліджень, які необхідно провести для встановлення закономірностей зміни температури на поверхні конструкції, матеріалу або речовини суміжного об'єкту будівництва, який опромінюється теплом та для валідації запропонованих математичних моделей.

Методикою експериментальних досліджень передбачено проведення досліджень для трьох можливих проектних сценаріїв виникнення пожежі та опромінювання суміжного об'єкту будівництва, а саме:

- пожежа виникає в середині будинку. Опромінювання суміжного об'єкту будівництва відбувається через віконний проріз. Пожежна навантага розташовується лише в середині будинку;

- пожежа виникає в середині будинку. Опромінювання суміжного об'єкту будівництва відбувається через віконний проріз та від фасаду будинку. Пожежна навантага розташовується як в середині будинку та і в його фасадній частині;



- пожежа виникає в зовнішній технологічній установці. Факел пожежі не обмежений негорючими перешкодами.

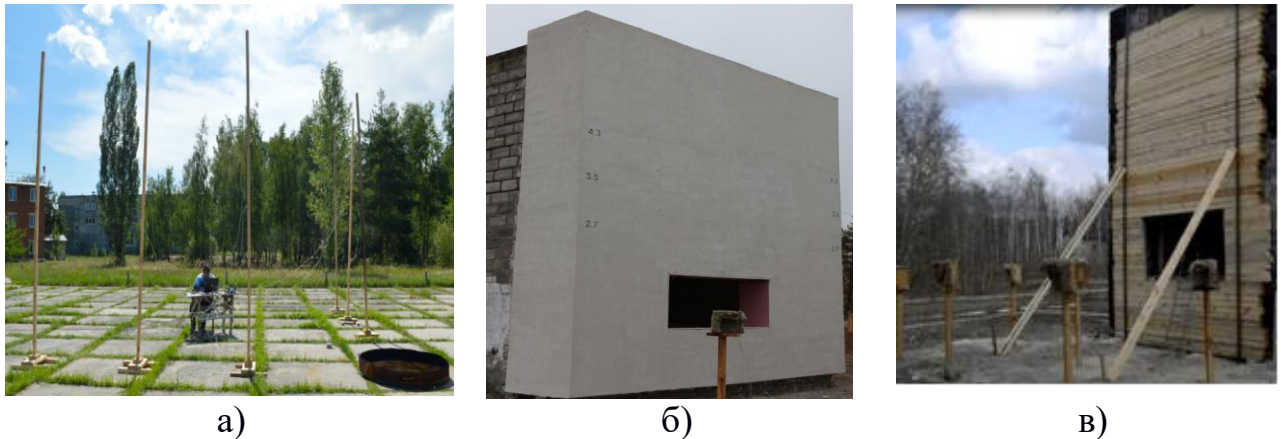


Рис. 4. Проектні сценарії впливу факелу пожежі на елементи суміжних об'єктів будівництва, що реалізовані в методиці експериментальних досліджень а) пожежа в зовнішній технологічній установці; б) пожежа в середині будинку; в) пожежа в середині будинку та на його фасадній частині

В якості модельних вогнищ пожежі прийнято стандартизоване вогнище пожежі класу 55В, що представляє собою металеве деко діаметром  $1480 \pm 15$  мм, висотою борта  $150 \pm 5$  мм та товщиною стінки борта  $2,5 \pm 0,5$  мм, у яке заливають 18 л води та 37 л дизельного палива рис. 5а та фрагмент будинку, що являє собою двоповерхову споруду розмірами в плані 4,5 м х 4,5 м х 5,6 м, в якій приміщення першого поверху є вогневою камерою і призначене для імітування у ньому пожежної навантаги, що створює продовж 30 хв. температурний режим близький до стандартного температурного режиму рис. 5б.

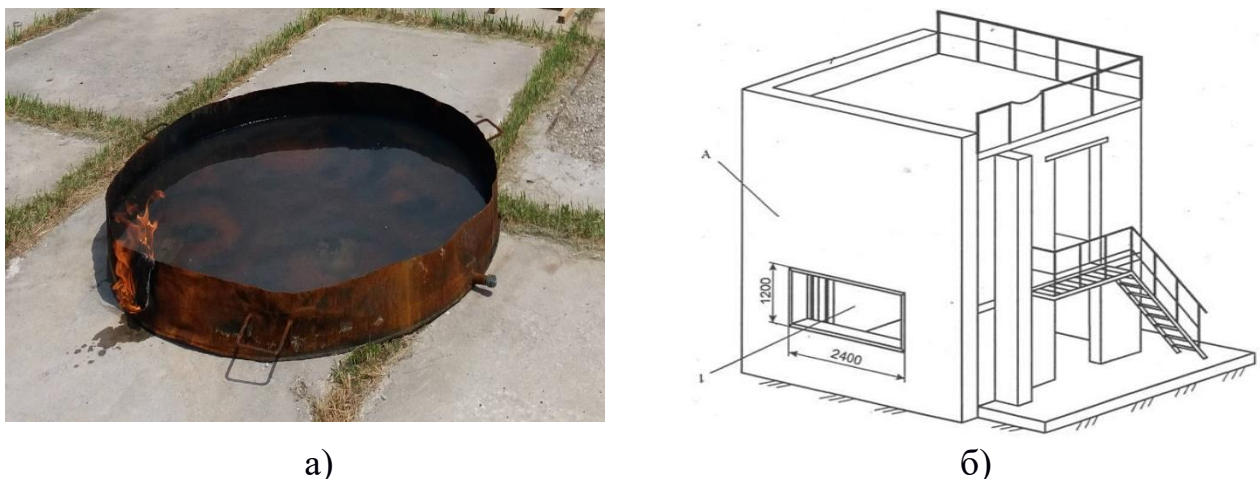


Рис. 5. Модельні вогнища пожежі, що використані в методиці експериментальних досліджень а) вогнище пожежі класу 55В; б) фрагмент будинку

На рис. 6 представлені дослідні зразки, що використані у методиці експериментальних досліджень. Запропонована форма досліджуваного зразка дозволяє імітувати частину будинку, що підпадає під вплив теплового випромінювання від пожежі. Така форма досліджуваного зразка є новою, на

відміну від існуючих прототипів та дозволяє імітувати об'ємно-планувальні особливості будинків та споруд, що підпадають під вплив теплового випромінювання від пожежі та врахувати найбільш несприятливі умови експериментальних досліджень, за рахунок орієнтування досліджуваного зразка по відношенню до джерела теплового випромінювання під кутом, коли дві його сторони підпадають під теплове випромінювання одночасно.

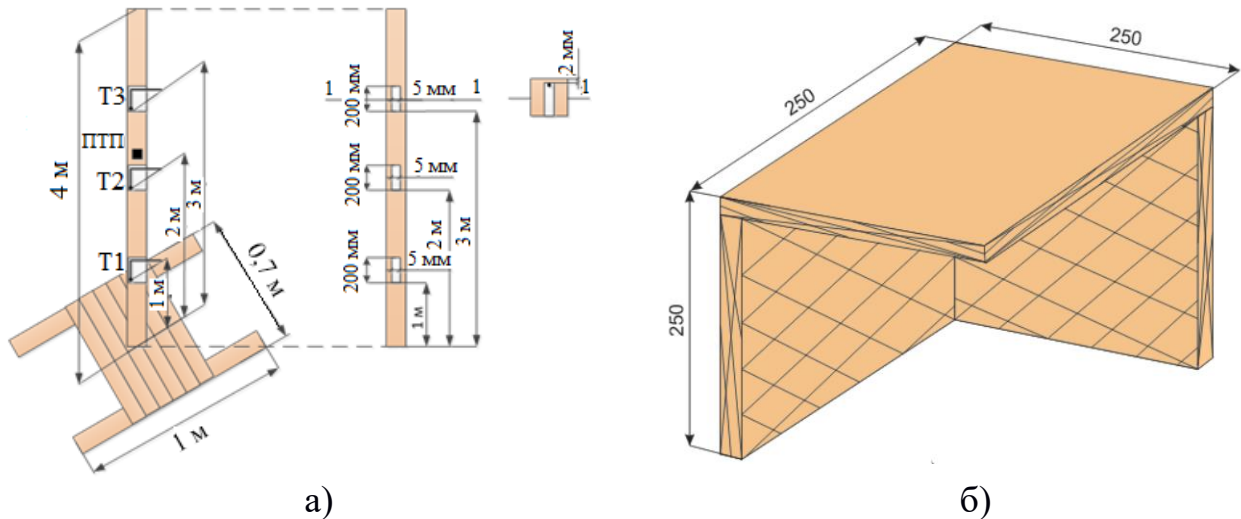


Рис. 6. Дослідні зразки, що використані в методиці експериментальних досліджень а) для сценарію, коли пожежа виникає в зовнішній технологічній установці; б) для сценарію, коли пожежа виникає в будинку

Для вимірювання на поверхні зразка температури, висвердлюються отвори для встановлення термопар. Висвердлювання отвору здійснюється таким чином, щоб товщина недосвердленої частини до поверхні зразка становила в межах  $1 \div 2$  мм, що забезпечує визначення найбільш точних даних температурного прогріву поверхні дослідного зразка. На поверхні дослідного зразка також монтується приймач теплового потоку, який вимірює сумарну густину теплового потоку.

З метою обґрунтування місця улаштування досліджуваних зразків по відношенню до джерела теплового випромінювання проведені попередні експериментальні дослідження визначення розподілу температур на поверхні конструкції, матеріалу або речовини суміжного об'єкту будівництва, який опромінюється теплом рис. 7.

За результатами попередніх експериментальних досліджень встановлено, що:

- для сценарію, коли пожежа виникає в будинку – найбільш інтенсивному тепловому випромінюванню піддаються дослідні зразки, що розташовуються по центральній вісі віконного прорізу фрагменту будинку і розташовані на висоті, що відповідає нижньому краю його віконного прорізу. Тому запропоновано випробувальні зразки розмістити на рівні нижнього краю віконного прорізу фрагменту будинку та на відстані 2 м, 4 м і 6,8 м від фрагменту будинку;

- для сценарію, коли пожежа виникає в зовнішній технологічній установці - найбільш інтенсивному тепловому опромінюванню піддаються

дослідні зразки, що розташовані на висоті 1-2 м від рівня землі. Тому запропоновано встановити термопари у дослідних зразках на висоті 1, 2 та 3 м, при цьому дослідні зразки встановлюються на відстанях 2 м, 4 м і 6 м від вогнища пожежі класу 55В.

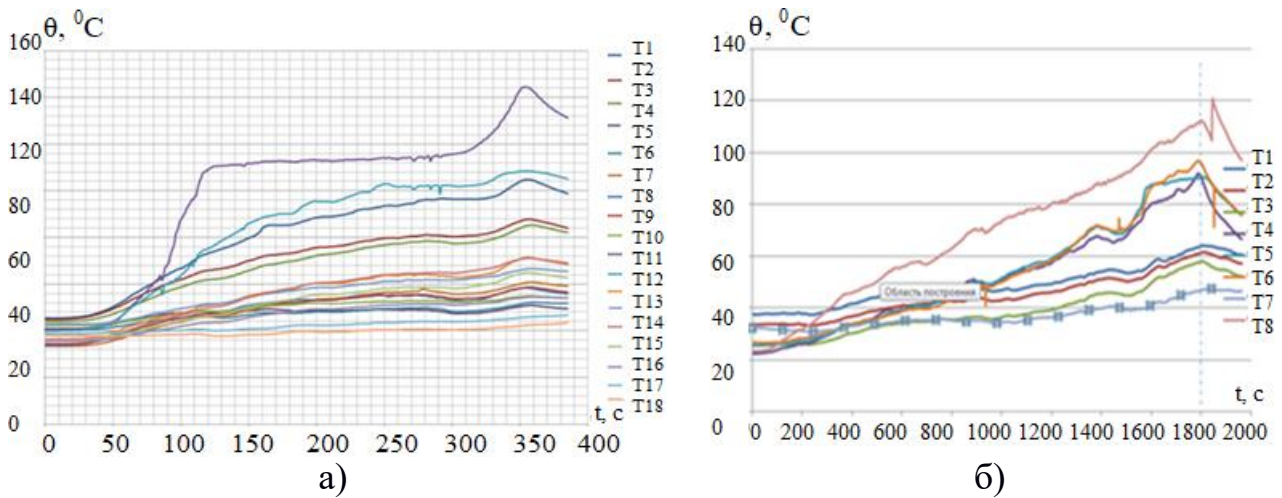


Рис. 7. Результати попередніх експериментальних досліджень щодо обґрунтування місця встановлення дослідних зразків: а) для сценарію, коли пожежа виникає в зовнішній технологічній установці; б) для сценарію, коли пожежа виникає в будинку

На підставі проведених попередніх експериментальних досліджень щодо обґрунтування місця встановлення дослідних зразків розроблені схеми розташування випробувального обладнання рис. 8.

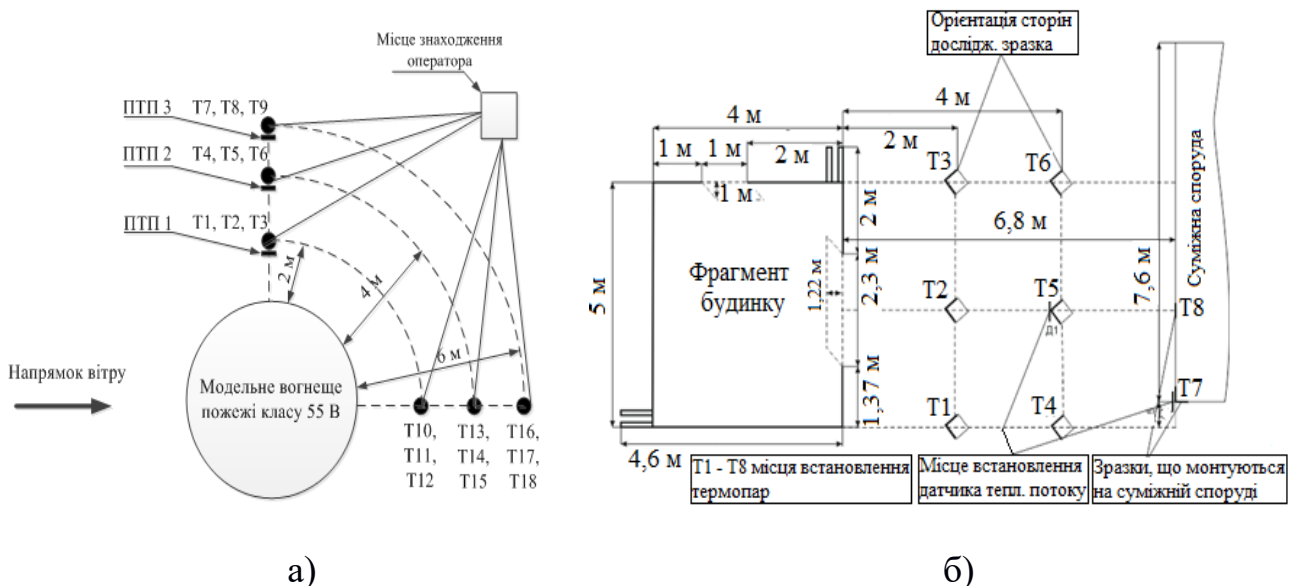


Рис. 8. Схеми улаштування випробувального обладнання, які запропоновані в методиці експериментальних досліджень а) для сценарію, коли пожежа виникає в зовнішній технологічній установці; б) для сценарію, коли пожежа виникає в будинку

У п'ятому розділі «Результати експериментальних досліджень» наведені результати експериментальних досліджень, закономірностей зміни



температури на поверхні конструкції, матеріалу або речовини суміжного об'єкту будівництва, який опромінюється теплом. Так під час експериментальних досліджень спостерігалось зростання температури на поверхні дослідних зразків. При цьому, дослідні зразки рис. 9:

- для сценарію, коли пожежа виникає в зовнішній технологічній установці, що розташовані на відстанях 2 м обвуглювалися, але їх займання не відбувається. Повне вигорання пожежної навантаги спостерігається на 10 хв. експериментального дослідження. Температури в дослідних зразках досягають таких максимальних значень 110 °С, 58 °С та 48 °С відповідно для відстаней 2 м, 4 м та 6 м;

- для сценарію, коли пожежа виникає в середині будинку, пожежна навантага розташовується лише в середині будинку, що розташовані на відстанях 2 м обвуглювалися, але їх займання не відбувається. Повне вигорання пожежної навантаги спостерігається на 30 хв. експериментального дослідження. Температури в дослідних зразках досягають таких максимальних значень 161 °С, 94 °С та 55 °С відповідно для відстаней 2 м, 4 м та 6,8 м;

- для сценарію, коли пожежа виникає в середині будинку, пожежна навантага розташовується в середині будинку та на фасаді будинку, що розташований на відстані 2 м напроти віконного прорізу зайнявся на 40 хв. експериментального дослідження. Повне вигорання пожежної навантаги спостерігається на 60 хв. експериментального дослідження. Температури в дослідних зразках досягають таких максимальних значень 540 °С, 116 °С та 66 °С відповідно для відстаней 2 м, 4 м та 6,8 м.

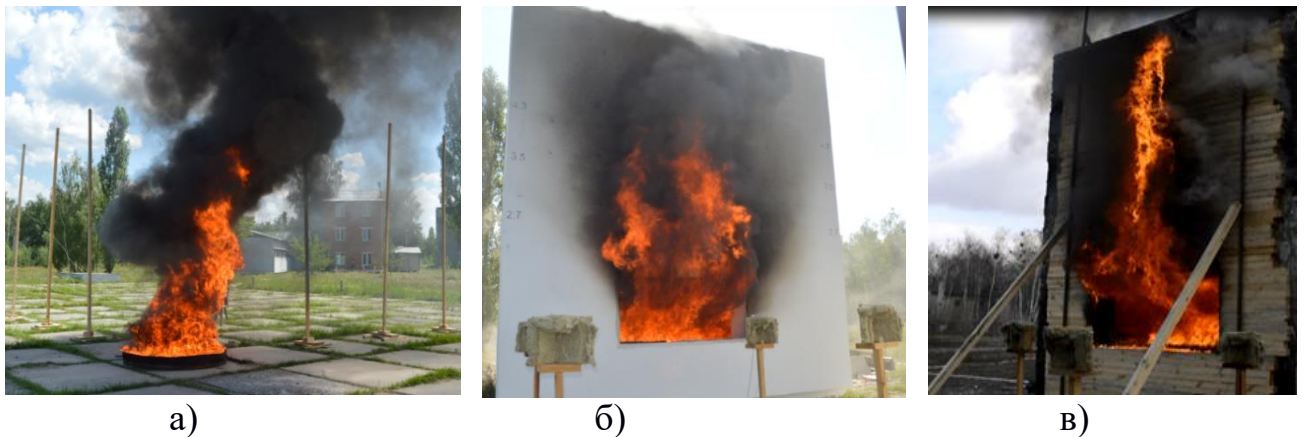


Рис. 9. Фрагменти експериментальних досліджень для сценаріїв: а) пожежа в зовнішній технологічній установці; б) пожежа в середині будинку; в) пожежа в середині будинку та на його фасадній частині

Залежності щодо зміни температури на поверхні дослідних зразків, що розташовані на відстанях 2 м, залежно від тривалості теплового опромінювання представлені на рис. 10.

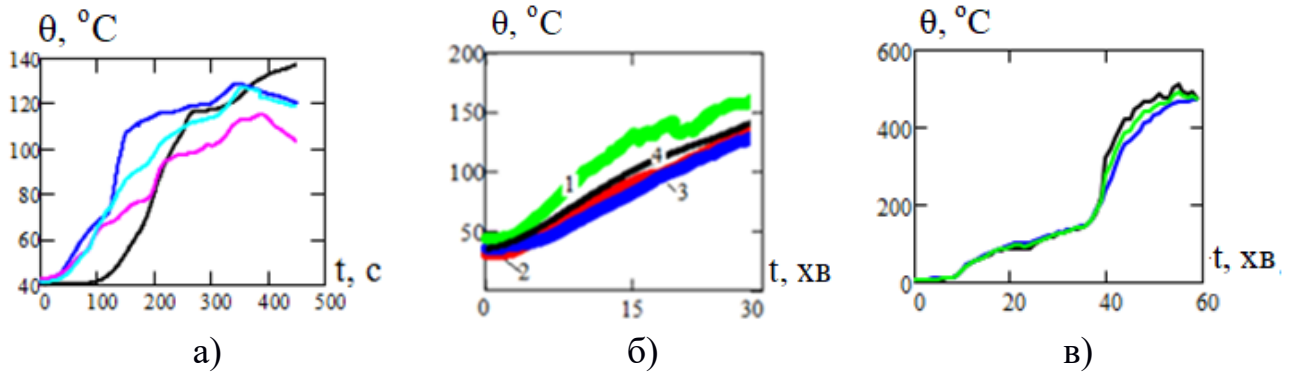


Рис. 10. Залежності температури на поверхні дослідних зразків від тривалості теплового опромінювання для сценаріїв: а) пожежа в зовнішній технологічній установці; б) пожежа в середині будинку; в) пожежа в середині будинку та на його фасадній частині

Отримані дані за кожним окремим експериментом оцінені, використовуючи абсолютні, відносні та середньоквадратичні відхилення, а також статистичні критерії Граббса та Фішера.

Критерій Граббса ( $G_j$ ) використано для визначення наявності в отриманих експериментальних даних викидів та квазівикидів за рівнянням:

$$G_{jmax} = \frac{|\bar{y}_j - y_j|}{S_j} \quad (15)$$

де  $y_j$ ,  $\bar{y}_j$  і  $S_j$  - відповідно порядкове значення ряду, середнє значення та середньоквадратичне відхилення.

Дані щодо оцінки наявності в експериментальних даних викидів та квазівикидів за критерієм Граббса для дослідних зразків, що розташовані на відстані 2 м наведені на рис. 11.

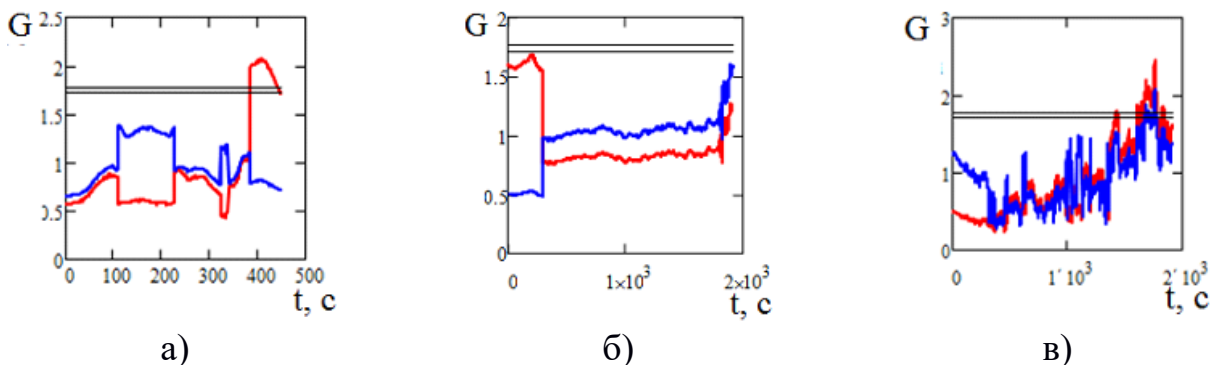


Рис. 11. Дані щодо оцінки наявності в експериментальних даних викидів та квазівикидів за критерієм Граббса для сценаріїв: а) пожежа в зовнішній технологічній установці; б) пожежа в середині будинку; в) пожежа в середині будинку та на його фасадній частині



Експериментальні дані, які мали викиди або квазівикими за критерієм Граббса, не враховували під час подальшого оброблення результатів.

З метою перевірки належності даних, отриманих в кожному експерименті, до однієї генеральної сукупності за критерієм Фішера визначені дисперсії температур експериментальних даних від середнього значення за рівнянням:

З метою перевірки збіжності експерименту, обчислено дисперсії відхилень по середнім значенням відповідних термопар, що порівнювалися за формулою 16.

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|^2}{n} \quad (16)$$

де  $x_i$  – значення  $i$ -го дослідження;  $\bar{x}_i$  – середнє значення;  $n$  – кількість досліджень.

Дисперсії відхилень по середнім значенням для дослідних зразків, що розташовані на відстанях 2 м наведені на рис. 12.

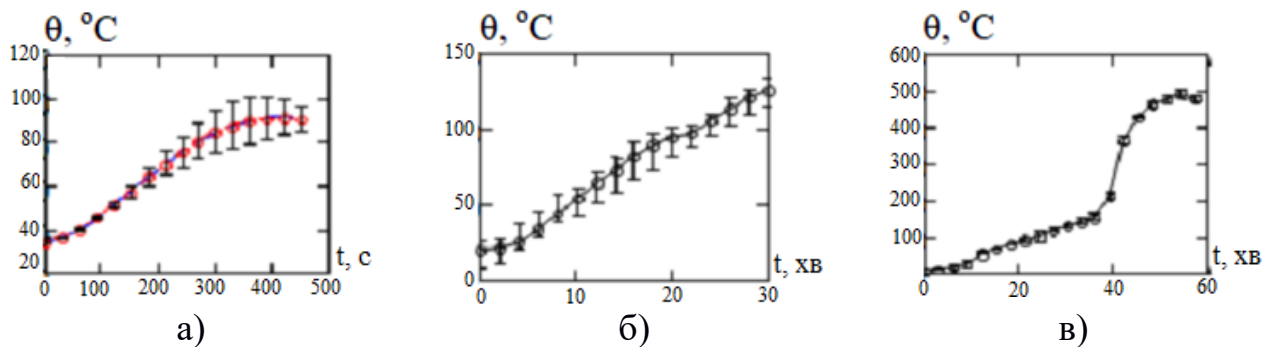


Рис. 12. Дані щодо дисперсії відхилень по середнім значенням для сценаріїв: а) пожежа в зовнішній технологічній установці; б) пожежа в середині будинку; в) пожежа в середині будинку та на його фасадній частині

На рис.13 наведено залежність дисперсії температур від тривалості теплового впливу для досліджуваних зразків, що розташовані на відстанях 2 м.

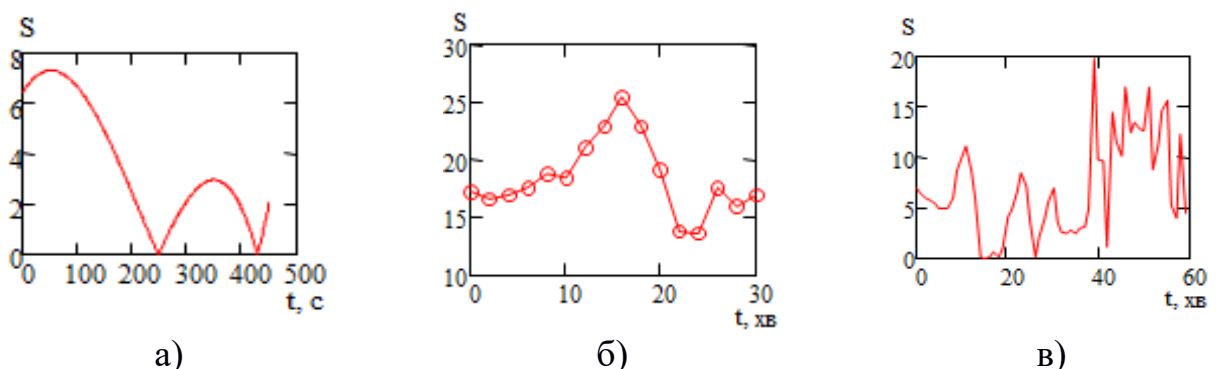


Рис. 13. Дані щодо залежності дисперсії температур від тривалості теплового впливу для сценаріїв: а) пожежа в зовнішній технологічній установці; б) пожежа в середині будинку; в) пожежа в середині будинку та на його фасадній частині

Графіки, що наведені на рисунках 12 та 13 показують, що зміна температури в часі у дослідних зразках має невеликі середні дисперсії.

В таблицях 3-5 представлені результати щодо аналізу повторюваності кожного окремого експериментального дослідження.

Таблиця 3

Результати щодо аналізу повторюваності кожного окремого експериментального дослідження для сценарію, коли пожежа виникає в зовнішній технологічній установці

№ п/п	Термопари	Абсолютні відхилення, °С	Відносні відхилення, %	Середньо квадратичні відхилення, °С	Розрахункове значення критерію Фішера
1.	T1 та T10	3,2	3,8	4,4	5,531
2	T2 та T11	5,5	6,8	6,6	0,256
3.	T3 та T12	4,2	7,1	5	0,462
4.	T4 та T13	5,4	10,5	6	0,824
5.	T5 та T14	4,8	9,2	5,5	2,03
6.	T6 та T15	2,3	4,8	2,5	0,448
7.	T7 та T16	2,5	6	2,5	0,689
8.	T8 та T17	1	2	1,3	0,837
9.	T9 та T18	1,5	4	1,7	1,442

Таблиця 4

Результати щодо аналізу повторюваності кожного окремого експериментального дослідження для сценарію, коли пожежа виникає в середині будинку

№ п/п	Термопари	Абсолютні відхилення, °С	Відносні відхилення, %	Середньо квадратичні відхилення, °С	Розрахункове значення критерію Фішера
1.	T1	2	3	2	0,513
2.	T2	10,8	16	9,9	0,63
3.	T3	8,7	15	8,7	0,462
4.	T4	4,5	9,6	8,7	0,961
5.	T5	5,8	10,4	5,6	1,392
6.	T6	3,2	6,8	3,4	0,25
7.	T7	6,7	11,8	6,3	0,385
8.	T8	2,8	5	2,3	0,485

Таблиця 5

Результати щодо аналізу повторюваності кожного окремого експериментального дослідження для сценарію, коли пожежа виникає в середині будинку та на його фасадній частині

Номер досліджуваного зразка	Абсолютні відхилення, °C	Відносні відхилення, %	Середньоквадратичні відхилення, °C	Розрахункове значення критерію Фішера
T1	4,853	18,581	2,88	0,513
T2	12,6	19,8	7,4	0,63
T3	4,863	10,004	3,1	0,462
T4	6,468	12,932	3,8	0,961
T5	3,738	8,431	3,9	1,392
T6	4,00	13,744	2,1	0,25
T7	4,533	14,641	2,5	0,385
T8	3,154	9,589	2,4	0,485

Наведені дані показують, що абсолютні відхилення в експериментальних даних кожного експерименту від усереднених значень не перевищують 12,6 °C, відповідно відносна похибка не перевищує 19,8 %, а середньоквадратичне відхилення не перевищує 7,4 °C. Оскільки розрахункове значення критерію Фішера менше за табличне, то із статистичною ймовірністю 0,95 можна стверджувати, що отримані дані температур не заперечують нуль гіпотезі, а їх розбіжність можна вважати не суттєвою. Таким чином дані, що отримані за результатами експериментальних досліджень, є вибірками з однієї генеральної сукупності, що підтверджує загальну збіжність кожного окремого експерименту.

Для подальшого оброблення експериментальних даних застосовували середні значення температури, отримані в ході експериментальних досліджень для кожного зразка і певної тривалості теплового впливу, з урахуванням наявності викидів та квазिवикидів. Дані щодо цих значень температури наведено в таблицях 6-8.

Таблиця 6

Середні значення температури, отримані в експериментальних дослідженнях для сценарію, коли пожежа виникає в зовнішній технологічній установці

Відстань від осередку горіння d, м	Тривалість теплового впливу t, хв.						
	1	2	3	4	5	6	7
	Температура $\Theta$ , °C						
0	219,9	368,3	464,2	512,9	512,4	455,0	323,5
2,0	47,6	68,7	88,2	102,2	109,1	109,3	105,7
4,0	36,9	41,5	46,7	51,8	55,9	57,6	56,2
6,0	35,8	38,9	41,8	44,7	47,2	48,6	47,9

Таблиця 7

Середні значення температури, отримані в експериментальних дослідженнях для сценарію, коли пожежа виникає в середині будинку

Відстань від осередку горіння d, м	Тривалість теплового впливу t, хв.									
	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
	Температура $\Theta$ , 0С									
0	451	698	783	788	771	768	795	843	883	864
2,0	33	39	50	65	78	89	98	105	117	126
4,0	32	38	45	52	57	63	70	80	89	96
6.8	32	34	36	39	40	42	45	48	52	55

Таблиця 8

Середні значення температури, отримані в експериментальних дослідженнях для сценарію, коли пожежа виникає в середині будинку та на його фасадній частині

Відстань від осередку горіння d, м	Тривалість теплового впливу t, хв.										
	1	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
	Температура $\Theta$ , °С										
0	9,6	332,6	617,1	659,3	710,6	755,5	821,1	831,4	854,3	664,1	552,9
2,0	10,6	12,5	47,2	85,2	96	124,7	146,0	309,7	428,05	469,9	454,5
4,0	11	13,7	29	42,7	58,2	74,1	86,6	98,05	109,55	119,25	117,7
6,8	9,5	10,4	16,5	20,5	28,9	42,3	52,1	56,4	61,8	65,45	63,25

Апроксимуючи дані, що наведені у таблицях 6-8 у вигляді поліноміальних залежностей третього порядку щодо температури на поверхні дослідних зразків ( $\Theta$ ). Отримано рівняння числової регресії та визначено значення констант цього рівняння, які надано у таблицях 9-11.

Таблиця 9

Рівняння числової регресії та відповідні константи залежності температури від відстані для сценарію, коли пожежа виникає в зовнішній технологічній установці

Коефіцієнти регресії $\theta(d) = a_0 + a_1d + a_2d^2 + a_3d^3$	$a_0$ , °С	$a_1$ , °С/м	$a_2$ , °С/м <sup>2</sup>	$a_3$ , °С/м <sup>3</sup>
Висота 1 м	509	-337,1	81.5	-6,4
Висота 2 м	145	-29,8	1.4	-0,125
Висота 3 м	77.5	-5,6	0.125	-0,04

Таблиця 10

Рівняння числової регресії та відповідні константи залежності температури від відстані для сценарію, коли пожежа виникає в середині будинку

Коефіцієнти регресії $\theta(d) = a_0 + a_1d + a_2d^2 + a_3d^3$	$a_0,$ °C	$a_1,$ °C/м	$a_2,$ °C/м <sup>2</sup>	$a_3,$ °C/м <sup>3</sup>
	883	-629,25	160,25	-13,063

Таблиця 11

Рівняння числової регресії та відповідні константи залежності температури від відстані для сценарію, коли пожежа виникає в середині будинку та на його фасадній частині

Коефіцієнти регресії $\theta(d) = a_0 + a_1d + a_2d^2 + a_3d^3$	$a_0,$ °C	$a_1,$ °C/м	$a_2,$ °C/м <sup>2</sup>	$a_3,$ °C/м <sup>3</sup>
	589	194,083	-140,5	15,604

Використовуючи ці залежності розраховано значення температур на поверхні досліджуваного зразка залежно від відстані до осередку горіння для різної тривалості теплового впливу рис. 14. Відмінність розрахункових даних, отриманих за цією залежністю від експериментальних даних не перевищує 15 %, що є прийнятним для подальшого застосування отриманих результатів.

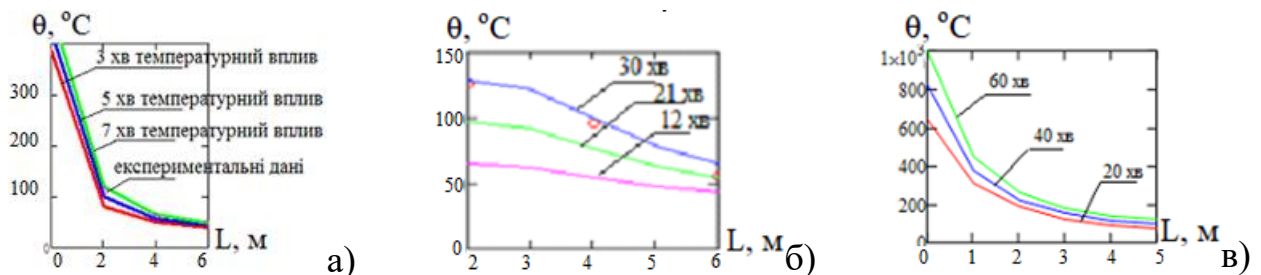


Рис. 14. Залежність температури від відстані розташування дослідного зразка до факелу пожежі для сценаріїв: а) пожежа в зовнішній технологічній установці; б) пожежа в середині будинку; в) пожежа в середині будинку та на його фасадній частині

Таким чином, за результатами експериментальних досліджень встановлено, що в результаті впливу джерела теплового випромінювання від факелу пожежі зміна температури на поверхні елементів суміжного об'єкту описується поліноміальними залежностями 3-го порядку. На рис. 15 зображені діаграми зміни температури від відстані до факелу пожежі та висоти розташування дослідних зразків.



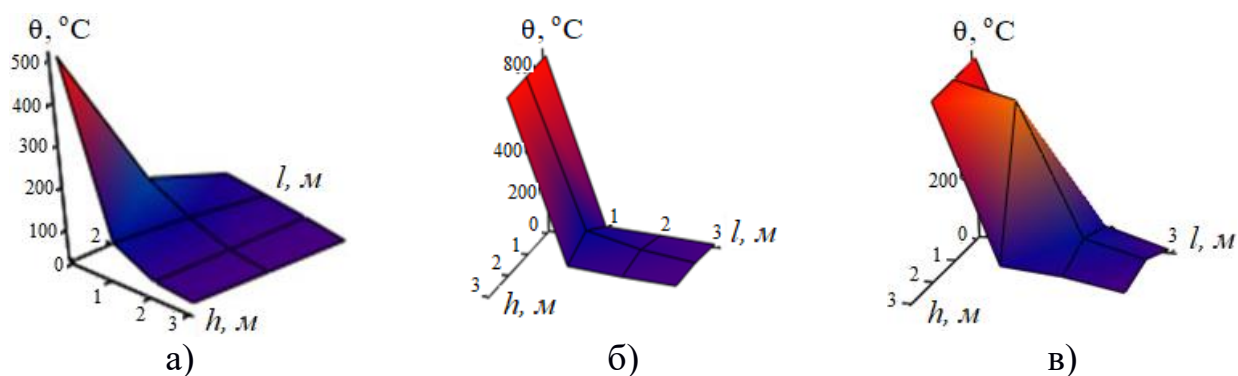


Рис. 15. Діаграми зміни температури від відстані до факелу пожежі та висоти розташування дослідних зразків для сценаріїв: а) пожежа в зовнішній технологічній установці; б) пожежа в середині будинку; в) пожежа в середині будинку та на його фасадній частині

На рис. 16 наведені дані експериментальних досліджень щодо критерію теплового потоку, а саме залежності зміни величини теплового потоку на досліджуваних зразках від часу теплового впливу для різних відстаней встановлення вимірювачів теплового потоку.

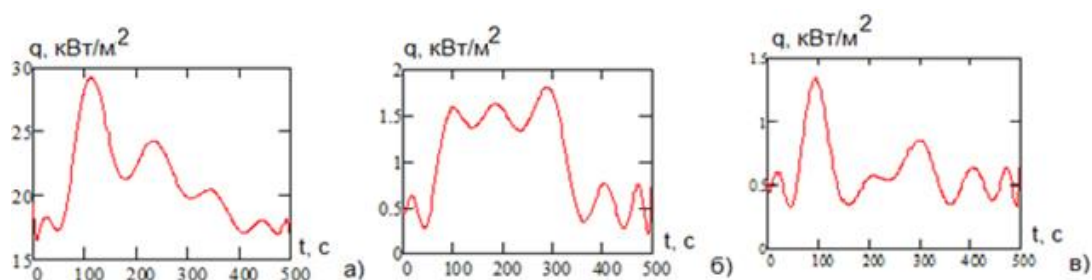


Рис. 16. Залежності зміни величини теплового потоку на досліджуваних зразках від часу теплового впливу для різних відстаней встановлення вимірювачів теплового потоку: а) 2 м; б) 4 м; в) 6 м

За даними рис. 16 можна зробити такі висновки, що значення теплового потоку біля елементів будинку, який суміжний із будинком, що горить є не стабільним та змінним в часі. Зазначене не дозволяє порівняти значення теплового потоку із відповідними характеристиками матеріалів, які використовуються у суміжному будинку, що опромінюється від пожежі та можуть асоціюватись із процесом виникненням горіння. Отримані результати підтверджують припущення про недоцільність використання теплового потоку в якості критерію оцінювання протипожежних відстаней.

**У шостому розділі «Оцінка адекватності розроблених математичних моделей»** проведено комп'ютерне моделювання процесів теплового впливу вогнища пожежі на поверхню суміжних будівельних об'єктів за трьома аналогічними із експериментальними дослідженнями сценаріями теплового впливу вогнища пожежі на дослідні зразки.

На рис. 17 наведені геометричні моделі розрахункових областей для кожного сценарію, що розглядають із відповідною пожежною навантагою. Основним завданням під час розроблення комп'ютерної моделі є максимальне наближення параметрів моделі до умов, що визначені методикою експериментальних досліджень та взаємозв'язків об'єктів, а саме: суміжних відстаней, дотримання масштабів об'єктів, матеріалу об'єктів, параметрів навколишнього середовища, пожежного навантаження об'єктів, встановлення вимірювачів температур тощо.

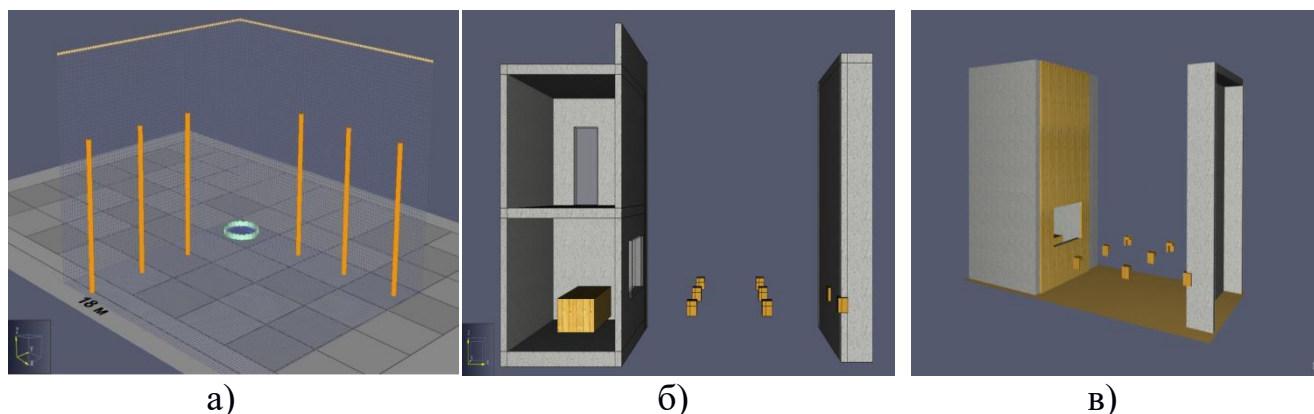


Рис. 17. Геометричні моделі розрахункових областей для комп'ютерного моделювання: а) пожежа в зовнішній технологічній установці; б) пожежа в середині будинку; в) пожежа в середині будинку та на його фасадній частині

В таблиці 12 приведені основні параметри, що закладені в розрахункову комп'ютерну модель.

Таблиця 12

Параметри, що закладені в розрахункову комп'ютерну модель

№ п/п	Матеріал	Параметр	Значення параметру	Одиниці вимірювання
1.	Деревина	густина	520	кг/м <sup>3</sup>
		коефіцієнт випромінювання	0,9	
		питоме тепловиділення	290	кВт/м <sup>2</sup>
2.	Сталь	густина	7850	кг/м <sup>3</sup>
		теплопровідність	45,8	Вт/(м·°С)
		коефіцієнт випромінювання	0,82	
3.	Дизельне паливо	густина	850	кг/м <sup>3</sup>
		коефіцієнт випромінювання	0,9	
		питоме тепловиділення	5800	кВт/м <sup>2</sup>

На рис. 18 наведено візуалізацію температурних розподілів, що отримані під час розрахунку та графіки зміни температури від тривалості теплового

опроміювання, що отримані за результатами експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання.

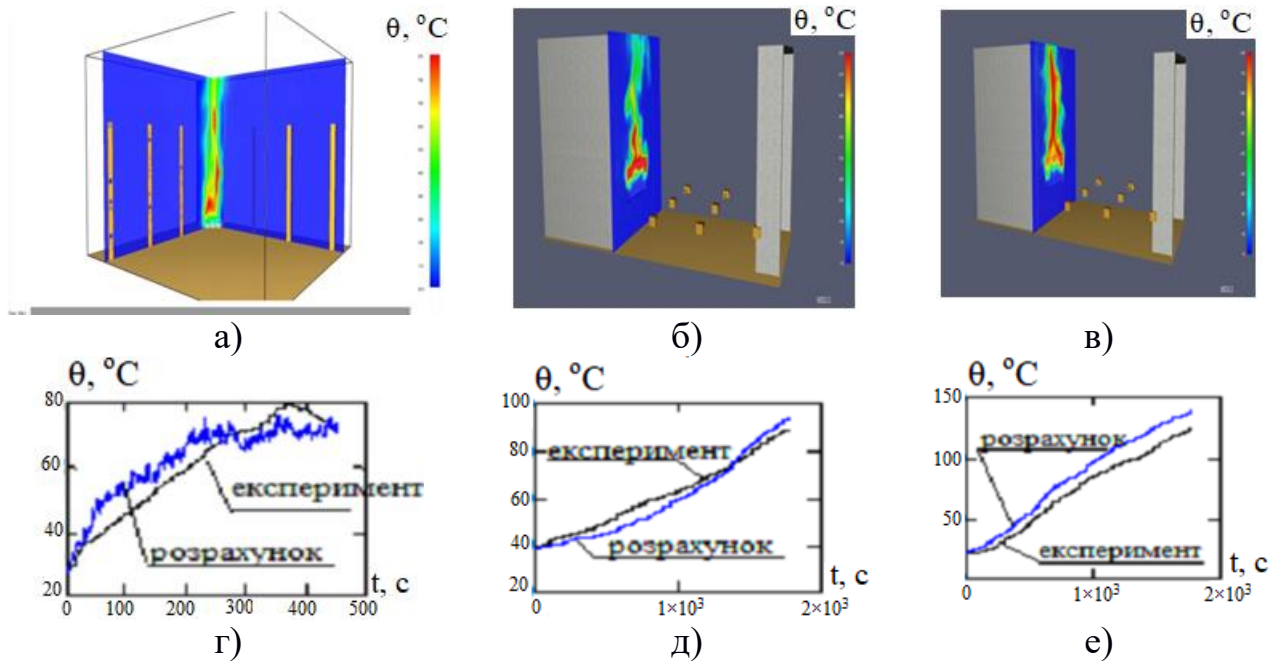


Рис. 18. Візуалізація температурних розподілів та графіки зміни температури від тривалості теплового опроміювання, що отримані за результатами експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання: а), г) пожежа в зовнішній технологічній установці; б), д) пожежа в середині будинку; в), е) пожежа в середині будинку та на його фасадній частині

Далі зроблено порівняння змін температури на елементах суміжних об'єктів залежно від часу їх теплового опроміювання, що отримані за результатами моделювання та експериментальних досліджень за абсолютними, відносними, середньоквадратичними відхиленнями та за статистичним критерієм Фішера. Результати перевірки приведені в таблицях 13-15.

Таблиця 13

Результати перевірки розрахунку для сценарію, коли пожежа виникає в зовнішній технологічній установці

№ п/п	№ термопари	Абсолютне відхилення	Відносне відхилення	Середнє квадратичне відхилення	Значення критерію Фішера
1	2	3	4	5	6
1.	T1	15,2	19	17	1,9
2.	T2	6,027	9,755	6,626	3
3.	T3	5,566	10,183	6,24	4,63
4.	T4	3,09	6,592	3,497	2,14

Продовження таблиці 13

1	2	3	4	5	6
5.	T5	4,868	10,154	5,175	1,69
6.	T6	4,619	10,688	5,02	1,42
7.	T7	7,908	18,046	8,572	1,596
8.	T8	6,097	14,083	6,59	1,306
9.	T9	5,802	13,91	6,065	1,18

Таблиця 14

Результати перевірки розрахунку для сценарію, коли пожежа виникає в середині будинку

№ п/п	№ термопари	Абсолютне відхилення	Відносне відхилення	Середнє квадратичне відхилення	Значення критерію Фішера
1.	T1	3,608	6,03	3,945	5,08
2.	T2	11,516	16,854	12,238	1,51
3.	T3	8,703	16,712	10,081	1,34
4.	T4	7,54	15,507	8,484	3,37
5.	T5	6,762	11,492	7,545	1,77
6.	T6	2,871	5,382	3,284	1,05
7.	T7	8,815	15,125	10,137	2,56
8.	T8	4,465	11,269	4,979	4,63

Таблиця 15

Результати перевірки розрахунку для сценарію, коли пожежа виникає в середині будинку та на його фасадній частині

Номер • досліджуваного • зразка	Абсолютні* відхилення, * °С	Відносні відхилення, - %	Середньоквадратичні відхилення, °С	Критерій Фішера
T1	4,853	18,581	2,88	0,289
T3	4,863	10,004	3,1	0,406
T4	6,468	12,932	3,8	0,488
T5	3,738	8,431	3,9	0,388
T6	4,00	13,744	2,1	0,374
T7	4,533	14,641	2,5	0,302
T8	3,154	9,589	2,4	0,210

Таким чином, абсолютні відхилення між результатами комп'ютерного моделювання та експериментальними дослідженнями не перевищують 16 °С, що у відсоткових показниках не перевищує 20 %, середньоквадратичні відхилення становлять в межах 2÷17 °С, що вказує на те, що дані комп'ютерного моделювання максимально наближені до даних експерименту. Отримані дані порівняння за критерієм Фішера підтверджують загальну

збіжність комп'ютерного моделювання із експериментальними дослідженнями. Оскільки розрахункове значення критерія Фішера менше за табличне, то із статистичною ймовірністю 0,95 дані не заперечують нуль гіпотези, тобто розбіжність між дисперсіями експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання можна вважати не суттєвою.

Це означає, що комп'ютерне моделювання процесу передачі тепла від факелу пожежі на суміжні будівельні об'єкти дають досить точні результати і можуть використані для створення табличних методів оцінювання протипожежних відстаней. А похибку, яка має місце під час моделювання можна врахувати коефіцієнтом безпеки під час оцінювання протипожежних відстаней розрахунковим методом.

У сьомому розділі «Розробка методології розрахункової оцінки протипожежних відстаней між об'єктами» проведено повнофакторний обчислювальний експеримент для попередньо визначених факторів: пожежна навантага, коефіцієнт прорізів, тривалість теплового впливу. Інтервали параметрів визначених факторів варіювали для пожежної навантаги від 20 МДж/м<sup>2</sup> до 1800 МДж/м<sup>2</sup>, для коефіцієнту прорізів у зовнішніх конструкціях від 10 % до 95 %, для тривалості теплового опромінювання від 10 хв. до 150 хв.

Далі записано регресійну залежність протипожежної відстані залежно від величини пожежної навантаги, коефіцієнту прорізів у зовнішній конструкції, тривалості теплового опромінювання.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3 \quad (17)$$

де  $x_1, x_2, x_3$  – параметри, що враховують вибрані фактори;  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$  – константи рівняння числової регресії.

Для визначення констант рівняння числової регресії проведено 8 чисельних експериментів за складеною для цього матрицею планування, що записана у вигляді таблиці 16.

Таблиця 16

Матриця планування повного факторного експерименту

Номер експерименту	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1, x_2$	$x_1, x_3$	$x_2, x_3$	$x_1, x_2, x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

Таким чином, за допомогою попередньо розроблених комп'ютерних моделей розраховані значення температури на елементах суміжних об'єктів від теплового впливу вогнища пожежі для всіх обраних варіантів значущих факторів та проектних сценарії пожежі таблиці 17-19.

Таблиця 17

Розраховані значення температури верхнього шару конструктивних елементів об'єкту, що опромінюється в конструктивних елементах фасаду якого використовуються горючі матеріали

Відстань від осередку теплового випромінювання, м	Розрахункове значення температури для відповідного номера експерименту							
	1	2	3	4	5	6	7	
18	45	21	33	22	25	20	24	21
15	86	30	67	26	37	20	28	24
10	188	61	141	53	75	22	37	26
8	260	101	207	89	106	24	79	30
6	332	155	288	150	162	29	123	47
4	404	271	369	267	273	46	197	89

Таблиця 18

Розраховані значення температури верхнього шару конструктивних елементів об'єкту, що опромінюється в конструктивних елементах фасаду якого використовуються негорючі матеріали

Відстань від осередку теплового випромінювання, м	Розрахункове значення температури для відповідного номера експерименту							
	1	2	3	4	5	6	7	8
18	54	26	46	27	31	25	30	25
15	103	45	75	33	45	25	37	25
10	226	75	163	66	90	27	69	28
8	314	124	239	110	132	29	107	34
6	427	190	334	184	201	34	166	50
4	625	331	477	326	339	53	274	97

Таблиця 19

Розраховані значення температури верхнього шару конструктивних елементів для технологічного об'єкту, що опромінюється та в якому обертаються горючі рідини

Відстань від осередку теплового випромінювання, м	Розрахункове значення температури для відповідного номера експерименту							
	1	2	3	4	5	6	7	8
18	96	47	79	39	50	44	61	35
15	201	99	138	87	99	64	86	39
10	503	196	284	139	139	129	161	44
8	624	301	342	231	169	140	205	53
6	745	498	400	401	624	164	318	77
4	866	695	458	571	968	255	431	145



Інтерполюючи отримані дані за температурою займання, яку в даному випадку прийнято  $255^{\circ}\text{C}$  як для соснової деревини отримані протипожежні відстані між будинками під час пожежі із урахуванням величини пожежної навантаги, коефіцієнту прорізів у зовнішній конструкції, тривалості теплового опромінювання. Використовуючи ці дані, визначено константи рівняння числової регресії таблиці 20-22.

Таблиця 20

Константи рівняння числової регресії для випадку горючого фасаду

Коефіцієнт	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$
Значення	5,09	1,34	0,475	1,573	0,225	0,073	0,134	0,134

Таблиця 21

Константи рівняння числової регресії для випадку не горючого фасаду

Коефіцієнт	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$
Значення	4,275	1,1	0,525	1,65	0,5	0,475	-0,1	-0,125

Таблиця 22

Константи рівняння числової регресії для випадку технологічного об'єкту, в якому обертаються горючі рідини

Коефіцієнт	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$
Значення	7,247	2,215	0,698	2,243	0,125	0,21	-0,037	0,39

За отриманою регресійною залежністю побудовані відповідні поверхні залежності протипожежних відстаней від вибраних найбільш значущих параметрів рис. 19. На побудованих поверхнях показані рівні, що відповідають різним значенням протипожежних відстаней.

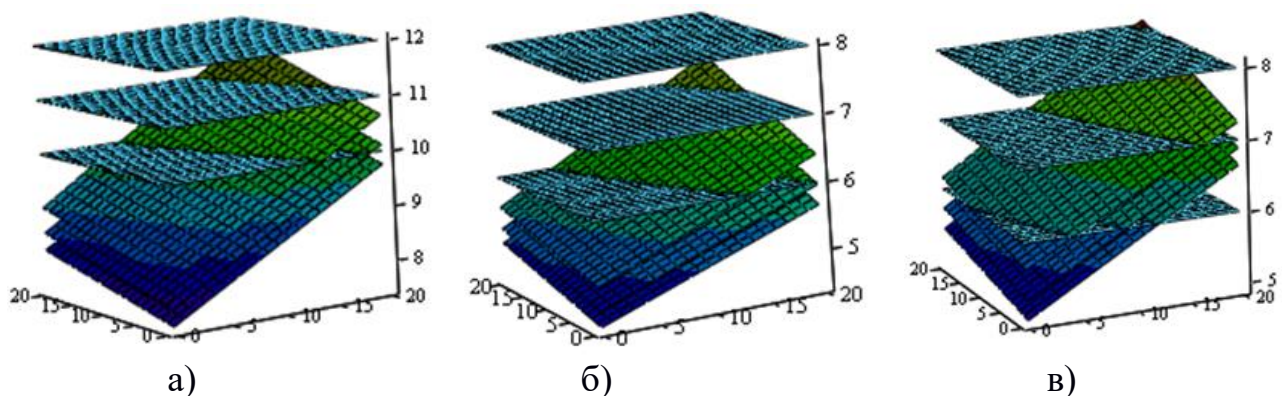


Рис. 19. Поверхні залежності протипожежних відстаней від найбільш значущих параметрів: а) пожежа в зовнішній технологічній установці; б) пожежа в середині будинку; в) пожежа в середині будинку та на його фасадній частині

Таким чином створені табличні дані для розрахунково-табличного методу таблиці 23-25.

Таблиця 23

Визначення протипожежних відстаней для об'єкту, що опромінюється та виконаний із горючого фасаду

Величина пожежної навантаги $q$ , МДж/м <sup>2</sup>	Розрахункова протипожежна відстань, ( $T_p$ , м) залежно від коефіцієнту врахування площі прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях, ( $O$ , %) та тривалості теплового опромінювання, ( $t$ , хв.)											
	O, %											
	до 25			від 25 до 50			від 50 до 90			від 90		
	t, хв.											
	<10	10÷60	>60	<10	10÷60	>60	<10	10÷60	>60	<10	10÷60	>60
до 100	5,5	6,0	7,5	5,5	6,0	7,5	5,5	6,0	7,5	6,0	7,0	8,0
від 100 до 400	6,0	7,0	8,0	6,0	7,0	8,0	6,0	7,0	8,0	7,0	7,5	8,5
від 400 до 1500	7,0	7,5	9,0	7,0	7,5	9,0	7,5	7,5	10,0	7,5	8,5	10,0
від 1500	7,5	8,0	10,0	7,5	8,0	10,0	8,0	8,5	10,5	8,0	9,0	10,5

Таблиця 24

Визначення протипожежних відстаней для об'єкту, що опромінюється та виконаний із не горючого фасаду

Величина пожежної навантаги $q$ , МДж/м <sup>2</sup>	Розрахункова протипожежна відстань, ( $T_p$ , м) залежно від коефіцієнту врахування площі прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях, ( $O$ , %) та тривалості теплового опромінювання, ( $t$ , хв.)											
	O, %											
	до 25			від 25 до 50			від 50 до 90			від 90		
	t, хв.											
	<10	10÷60	>60	<10	10÷60	>60	<10	10÷60	>60	<10	10÷60	>60
до 100	6,0	7,5	8,5	6,0	7,5	8,5	7,0	8,0	9,0	7,5	8,0	9,0
від 100 до 400	7,0	8,0	9,0	7,0	8,0	9,0	7,5	8,5	10,0	8,0	8,5	10,0
від 400 до 1500	7,5	8,5	9,5	7,5	8,5	9,5	8,0	9,0	10,5	8,5	9,0	11,0
від 1500	8,0	9,0	10,5	8,0	9,0	10,5	8,5	10,0	11,0	9,0	9,0	11,5

Таблиця 25

Визначення протипожежних відстаней для технологічного об'єкту, в якому обертаються горючі рідини

Величина пожежної навантаги $q$ , МДж/м <sup>2</sup>	Розрахункова протипожежна відстань, ( $T_p$ , м) залежно від тривалості теплового опромінювання, ( $t$ , хв.)		
	t, хв.		
	>10	10÷60	>60
до 100	25,5	27,0	31,5
від 100 до 400	27,0	28,5	33,0
від 400 до 1500	30,0	33,0	39,0
від 1500	31,5	34,5	42,0

Таким чином, розроблено методологічну базу для розрахункового обґрунтування мінімальних безпечних протипожежних відстаней та прогнозування небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти в основу якої покладено виконання умови безпеки, за якої розрахункова температура, яка отримується в ході оцінювання не повинна перевищувати допустиму температуру для речовини та матеріалу, що опромінюється від факелу пожежі. При цьому, значення допустимої температури складає не більше ніж 80 % від значення температури займання таких речовин та матеріалів. Розрахункову температуру слід оцінювати для випадків пожеж в кожній із суміжних будівель. За даними розрахункової температури визначається два розрахункових значення протипожежної відстані. Проектна протипожежна відстань приймається як максимальне значення із двох розрахункових із урахуванням коефіцієнту безпеки.

В основу методів оцінювання протипожежної відстані покладено відповідні алгоритми, які разом складають ієрархічну структуру та стали теоретичною основою для розроблення проекту національного стандарту України ДСТУ «Пожежна безпека. Оцінювання протипожежних відстаней між суміжними об'єктами будівництва розрахунковими методами. Основні положення». Результати валідації для розробленого розрахункового методу за найбільш точною моделлю, а саме польовою, із експериментальними даними показують, що отримана розбіжність не перевищує 5 %, що підтверджує прийнятну достовірність створеного методу оцінювання протипожежних відстаней.

Проведено розрахунок економічного ефекту від впровадження запропонованого підходу щодо оцінювання протипожежних відстаней, яким підтверджено їх економічну ефективність.

## **ВИСНОВКИ**

У дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням наведено розв'язання актуальної наукової проблеми розкриття закономірностей параметрів теплообміну між факелом пожежі та будівельними об'єктами, що являється науковими основами для розрахункового обґрунтування протипожежних відстаней між такими об'єктами при їх проектуванні та експлуатуванні і слугують теоретичною базою для прогнозування небезпеки поширення пожеж від одного об'єкту на інший, при цьому одержано такі наукові і практичні результати:

1. За результатами проведеного аналізу літературних джерел щодо сучасного стану розрахункових методів обґрунтування безпечних протипожежних відстаней між об'єктами будівництва та прогнозування небезпеки поширення пожеж між такими об'єктами виявлено, що існуюча методологічна розрахункова база потребує нового підходу, який би надав стандартизованим методам параметричної складової за рахунок використання сучасних математичних підходів та комп'ютерних технологій.

2. Обґрунтовано сценарії виникнення та розвитку пожеж, при яких має місце поширення пожежі на сусідній будинок, а також перелік найбільш

значущих параметрів щодо прогнозування небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти, а саме: теплоутворювальна здатність пожежної навантаги, коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалість опромінювання. На основі параметрів пожежної навантаги запропонована відповідна класифікація будинків за чотирма рівнями: безпечні, малонебезпечні, небезпечні, високонебезпечні.

Запропонований новий підхід щодо критеріїв небезпеки поширення пожежі, який полягає у фіксації небезпечної температури появи полум'я на суміжному об'єкті та враховує природу матеріалів його пожежної навантаги. В якості такого критерію має використовуватись температура займання матеріалів, що піддаються тепловому впливу з боку факелу пожежі, на суміжному об'єкті. За тих умов можна використовувати загальний підхід заснований на використанні альтернативних чинним нормам розрахункових методів, які мають ієрархічну структуру.

3. Обґрунтований набір математичних моделей, що дозволяє прогнозувати небезпеку поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти, таких як газо-гідродинамічна модель з урахуванням найбільш значущих факторів поширення пожежі, модель на основі рівняння променистого теплообміну і показана їх гнучкість та універсальність на прикладі таких об'єктів, як житловий будинок, автозаправна станція, виробництво біогазу. При цьому, показано, що обрані параметри, а саме: теплоутворювальна здатність пожежної навантаги, коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалість опромінювання впливають на значення температури на поверхні елементів будинків, що опромінюються від осередку пожежі, визначення яких дозволило обґрунтувати безпечну протипожежну відстань на прикладі житлового будинку та автозаправної станції, яка склала 22,8 м (згідно чинних норм – 40 м), а під час розрахунку ферментаторів для виробництва біогазу – 20 м (норми відсутні).

4. Розроблено методику натурних вогневих досліджень процесів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами включаючи будинки та технологічні установки, в яких використовуються горючі рідини, що максимально наближені до реальних умов та проведені відповідні випробування.

Запропоновано нову принципову схему дослідження небезпечного теплового впливу пожежі на суміжний будинок з використанням зразків, що імітують даний будинок із врахуванням найбільш несприятливих умов.

5. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що:

- впродовж 10 хвилинного впливу факелу від модельного вогнища пожежі класу 55В зміна температури на поверхні елементів суміжного об'єкту залежно від відстані описується поліноміальною залежністю 3-го порядку  $\Theta(d)=509-337,1d+81,5d^2-6,4d^3$ ;

- впродовж 30 хвилинного впливу факелу пожежі фрагменту будинку із негорючим фасадом зміна температури на поверхні елементів суміжного об'єкту залежно від відстані описується поліноміальною залежністю 3-го порядку  $\Theta(d)=883-629,25d+160,25d^2-13,063d^3$ ;

- впродовж 60 хвилинного впливу факелу пожежі фрагменту будинку із горючим фасадом зміна температури на поверхні елементів суміжного об'єкту залежно від відстані описується поліноміальною залежністю 3-го порядку  $\Theta(d) = 589 + 194,083d - 140,5d^2 + 15,604d^3$ , де  $\Theta$  – температура, °C,  $d$  – відстань, м.

6. З використанням обґрунтованого набору моделей газогідродинаміки та з використанням програмного забезпечення FDS проведений чисельний експеримент, що імітує процес проведення випробування з модельним вогнищем пожежі класу 55В та фрагментом будинку із горючим та негорючим фасадами і показано, що результати математичного моделювання є адекватними оскільки їх відносні та середньоквадратичні відхилення від експериментальних результатів становлять 19 %, 16,9 %, 20 %, 17 °C, 12,2 °C, 8 °C відповідно, а критерій Фішера не перевищує критичних значень. Показано, що отримані моделі є адекватними, при цьому відносна похибка в порівнянні з експериментальними даними для модельного вогнища та фрагменту будинку склала 15 % та 20 % відповідно.

7. Шляхом проведення чисельного експерименту з використання математичних моделей обчислювальної газо-гідродинаміки виявлено закономірність залежності мінімальних безпечних відстаней для суміжних будівельних об'єктів у випадку пожежі у будинку з негорючим та горючим фасадами, а також на технологічних установках із використанням горючих рідин, що залежить від теплоутворювальної здатності пожежної навантаги, коефіцієнту прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалості опромінювання у вигляді лінійної (по кожному із параметрів) регресійної залежності.

8. На основі виявлених закономірностей побудовано таблиці безпечних відстаней залежно від теплоутворювальної здатності пожежної навантаги, коефіцієнту прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалості опромінювання для реалізації спрощеного табличного методу розрахунку.

Розроблено методологічну базу для розрахункового обґрунтування мінімальних безпечних протипожежних відстаней та прогнозування небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти шляхом створення структурних схем-методів, що разом складають ієрархічну структуру та є теоретичною основою для створення відповідної нормативної бази.

9. Запропонований підхід щодо оцінювання протипожежних відстаней в порівнянні з чинним нормативним методом дає можливість досягнення економічного ефекту: в 1,2 рази у випадку використання запропонованого табличного методу; в 1,4 рази у випадку використання спрощених моделей; в 1,75 рази у випадку використання моделі на основі рівняння нестационарного теплообміну; у 2 рази у випадку використання польової моделі. Загальна сума економічного ефекту, яку можна досягти у випадку використання польової моделі складає близько 18 млн. грн. для площі забудови Києво-Святошинського району Київської області продовж одного року.



## Список публікацій здобувача в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

### Статті у вітчизняних наукових фахових виданнях

1. Забезпечення пожежної безпеки наземного космічного ракетного комплексу «Циклон-4» в Федеративній Республіці Бразилія / О.О. Сізіков, В.В. Ніжник, Р.В. Уханський, О.Г. Доценко // Науковий вісник УкрНДІПБ: Наук.журнал. – К., 2012. – № 2 (26). – С. 86 – 91.

2. Ніжник В.В. Удосконалення системи функціонування джерел зовнішнього протипожежного водопостачання/ О.О. Сізіков, Н.М. Довгошеєва, В.В. Ніжник, Р.В. Уханський, С.Ю. Голікова // Науковий вісник УкрНДІПБ – Київ, 2013. №1 (27). – С. 49 – 57.

3. Ніжник В.В. Визначення параметрів подавання води з системи пожежогасіння в підкупольних дерев'яних конструкціях культових споруд / В.В. Ніжник // Науковий вісник УкрНДІПБ. – Київ, 2013. №2(28). – С. 168 – 174.

4. Ніжник В.В. Удосконалення будівельних норм з пожежної безпеки об'єктів / В.В. Ніжник, О.О. Сізіков, Р.В. Уханський, С.В. Новак, Л.М. Нефедченко, С.В. Жартовський, Д.В. Мартюк // Науковий вісник УкрНДІПБ – Київ, 2014. №1 (29). – С. 65 – 72.

5. Ніжник В.В. Оцінка класу вогнестійкості самонесучої стіни залізобетонних модулів сховища відпрацьованого ядерного палива / С.В. Поздєєв, Ю.А. Отрош, В.В. Ніжник, О.П. Борис // «Пожежна безпека: теорія і практика». – Черкаси, 2015. № 20. – С. 81 – 90.

6. Ніжник В.В. Феноменологічне моделювання процесу зменшення горючості карбамідоформальдегідних пінопластів / С.В. Жартовський, О.В. Новіков, В.В. Ніжник, Е.А. Лінчевський // Науковий вісник УкрНДІПБ. – Київ, 2015. – № 1(31). – С. 93 – 98.

7. Ніжник В.В. Удосконалення методичних підходів до оцінювання пожежного ризику / Р.В. Климась, В.В. Ніжник, О.О. Сізіков, О.П. Якименко, А.В. Нетреба, Н.М. Довгошеєва // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ, 2016. №2 (2). – С. 83.

8. Ніжник В.В. Щодо розрахунку часу евакуації дітей з шкільних і дошкільних закладів у разі пожежі / В.В. Ніжник, О.М. Тесленко, С.З. Цимбалістий, Н.В. Кравченко // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ, 2016. №1(1). – С. 81 – 88.

9. Білошицький М.В. Особливості розрахунку надлишкового тиску вибуху парів сумішей горючих рідин / М.В. Білошицький, В.В. Ніжник, Н.В. Кравченко, О.М. Тесленко, С.З. Цимбалістий // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ, 2017. №2 (4). – С. 14 – 24.

10. Ніжник В.В. Методика експериментальних досліджень поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього в умовах пожежі / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник, О.П. Борис, Ю.В. Долішній // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ. – 2017 – № 1 (3). – С. 98 – 103.



11. Ніжник В.В. Вогнестійкість дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник, О.П. Борис // Пожежна безпека: збірник наукових праць ЛДУБЖД. – Львів, 2017 – № 30. – С. 159 – 167.
12. Ніжник В.В. Експериментальні дослідження поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник // Сборник научных трудов: Проблемы пожарной безопасности. – Харків. – 2017. – № 42., С. 155 – 164.
13. Ніжник В.В. Обґрунтування швидкості руху пожежних автомобілів для визначення дислокації пожежно-рятувальних підрозділів / О.М. Крикун, В.С. Кропивницький, В.В. Ніжник, О.П. Жихарев, Д.О. Добряк // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ. – 2018 – № 1 (5), С. 21 – 25.
14. Ніжник В.В. Підходи щодо визначення протипожежних відстаней між будинками та спорудами / В.В. Ніжник // Науково-технічний збірник «Сучасні проблеми архітектури та містобудування». – КНУБА. – К., 2019. – № 53. – С. 215 – 226.
15. Ніжник В.В. Оцінка обмеження поширення пожежі між житловим будинком та автозаправною станцією / В.В. Ніжник, Я.В. Балло, С.В. Поздєєв, В.С. Некора // Науково-технічний збірник Містобудування та територіальне планування. КНУБА. – К., 2019. – №69. – С.278 – 290.
16. Ніжник В.В. Дослідження теплового впливу вогнища пожежі через віконний проріз будівлі на елементи суміжних об'єктів / В.В. Ніжник // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ, 2019. – № 1(7). – С. 26 – 33.

#### **Статті у міжнародних фахових виданнях**

17. Ніжник В.В. Активная противопожарная защита деревянных конструкций куполов церквей с применением огнетушащих веществ / С.В. Жартовский, В.В. Ніжник., Р.В. Уханський. – Пожаровзрывобезопасность. М.: Пожнаука 4 – 2013 с. 65 – 94.
18. Нижник В.В. Влияние целевых добавок к воде на эффективность системы пожаротушения / А.А. Сизиков, С.В. Жартовский, В.В. Нижник, Я.В. Балло, В.С. Бенедюк // Вестн. ун-та гражд. защ. МЧС Беларуси. – Минск, 2017. – Вып. 25. – С. 35 – 43.
19. Нижник В.В. Обоснование безопасного противопожарного расстояния между ферментаторами для производства биогаза / С.В. Поздеев, В.В. Нижник, Я.В. Балло, А.Н. Нуянзин, Р.В. Уханский, В.С. Кропивницький / Naukowy wydawany. VIP. Bezpieczeństwo i technika pożarnicza. – Vol. 51 ISSUE 3, 2018. – 60 – 67. (Видання індексується бібліометричною платформою Index Copernicus).
20. Nizhnyk V. A method of experimental studies of heat transfer processes between adjacent facilities / S.Shchipets, O. Tarasenko, V. Kropyvnytskyi, B. Medvid // International Journal of Engineering & Technology; Vol. 7, № 4.3 (2018): Special Issue 3. – 288-292. (Видання індексується бібліометричними платформами ProQuest (USA), Directory of Open Access Journals (DOAJ) (Sweden)).

21. Нижник В.В. Метод интерполяции температурных полей в сечении фрагментов деревянных колонн с огнезащитной облицовкой / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздеев, В.В. Нижник, А.Ю. Новгородченко // Вестник Кокшетауского технического института Комитета по Чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан. – 2018. – № 3 (31). – С. 64 – 73.

22. Нижник В.В. Исследования теплового влияния факела модельного очага пожара класса В на элементы смежных объектов / В.В. Нижник, С.В. Поздеев, Ю.Л. Фещук, А.А. Сизиков // Вестник Кокшетауского технического института Комитета по Чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан. – 2019 – № 2 (34). – С. 62 – 71.

### **Інші публікації**

23. Нижник В.В. Методология прогнозирования пределов огнестойкости деревянных колонн с огнезащитной облицовкой / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздеев, В.В. Нижник // Международный научный журнал "Интернаука". – 2018. – № 14. – С. 74 – 81. (Видання індексується бібліометричними платформами: Index Copernicus International (ICI), Ulrichsweb Global Serials Directory; Google Scholar; Open Academic Journals Index, Polish Scholarly Bibliography).

24. Ніжник В.В. Аналіз теоретичних та експериментальних методів досліджень теплопередачі між будинками та спорудами під час пожежі / В.В. Ніжник // Міжнародний науковий журнал "Интернаука". – 2019. – Вып. №3 (65)/2019. – С. 86 – 92. (Видання індексується бібліометричними платформами: Ulrichsweb Global Serials Directory; Google Scholar; Open Academic Journals Index, Polish Scholarly Bibliography).

25. Ніжник В.В. Оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти за критерієм теплового потоку / В.В. Ніжник, С.В. Поздеев, С.В. Жартовський, Ю.Л. Фещук // Міжнародний науковий журнал "Интернаука". – 2019. – №11 (73). – С. 47 – 51. (Видання індексується бібліометричними платформами: Ulrichsweb Global Serials Directory; Google Scholar; Open Academic Journals Index, Polish Scholarly Bibliography).

26. Ніжник В.В. Моделювання теплового впливу пожежі через віконний проріз будинку на елементи суміжних об'єктів / В.В. Ніжник, Ю.Л. Фещук, С.В. Поздеев, І.Я. Олійник // Міжнародний науковий журнал "Интернаука". — 2019. – №10 (72). – С. 50 – 56. (Видання індексується бібліометричними платформами: Ulrichsweb Global Serials Directory; Google Scholar; Open Academic Journals Index, Polish Scholarly Bibliography).

### **Патент на корисну модель**

27. Пат. 132896 Україна, МПК (2019.01) G09B 25/04 (2006/01), A62C 3/00, A62C 99/00, G01N 25/00, G01N 25/12 (2006.01). Зразок для дослідження процесів теплопередачі між джерелом теплового випромінювання та суміжними об'єктами / В.В. Ніжник, С.В. Поздеев, Ю.Л. Фещук, заявник та патентовласник Український науково-дослідний інститут цивільного захисту. – № у 2018 10891, заяв. 05.11.2018; опубл. 11.03.2019, бюл. № 5.

### **Матеріали науково-практичних конференцій**

28. Ніжник В.В. Запобігання надзвичайним ситуаціям, що обумовлені загораннями і пожежами на об'єктах критичної інфраструктури / М.Г. Шкарабура, І.Г. Маладика, С.В. Жартовський, В.В. Ніжник // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». – Черкаси. – 2015. – С. 178 – 180.

29. Ніжник В.В. Висвітлення основних положень ДСТУ Б В.1.1-36:2016 у Посібнику по практичному застосуванню ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою / М.В. Білошицький, Н.В. Кравченко, В.В. Ніжник, Т.М. Скоробагатько, С.В. Семічаєвський, О.М. Тесленко // Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» 20-21 жовтня 2017 року. – Черкаси, 2017. – С. 12 – 14.

30. Ніжник В.В. Адекватність вимірювання у фрагментах дерев'яних колон під час вогневих випробувань / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник // Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Технології та інфраструктура транспорту». – Харків. – 2018. – С. 311 – 313.

31. Ніжник В.В. Застосування FDS моделювання для дослідження наслідків розвиненої стадії пожежі / Я.В. Балло, В.В. Ніжник, О.О. Сізіков, С.Ю. Голікова Н.М. Довгошеєва // Матеріали 20 Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку». – Київ. – 2018. – С. 29 – 30.

32. Ніжник В.В. Методики натурних вогневих досліджень процесів теплопередачі між джерелом теплового випромінювання та промисловими спорудами / В.В. Ніжник, С.В. Поздєєв, Ю.Л. Фещук // Тези доповідей VII міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті». – Харків. – 2018. – С. 131 – 133.

33. Ніжник В.В. Розрахунковий табличний метод визначення межі вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням / Ю.Л. Фещук, В.В. Ніжник // Матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». – Черкаси. – 2018. – С. 245 – 249.

34. Nizhnyk V. A method of experimental studies of heat transfer processes between industrial constructions / О. Kyrychenko, О. Tarasenko, А. Shvydenko, S. Novalenkov // MATEC Web of Conferences 230, 02021 (2018). ISSN: 2261236X. (Видання індексується бібліометричною платформою SCOPUS).

35. Ніжник В.В. Моделювання процесів теплопередачі пожежі класу В / В.В. Ніжник, Я.В. Балло, О.О. Сізіков, С.Ю. Голікова // Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». – Черкаси. – 2019. – С. 222 – 225.

36. Ніжник В.В. Дослідження теплового впливу модельного вогнища пожежі через віконний проріз на сусідні об'єкти / В.В. Ніжник, Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв // Матеріали 21 Всеукраїнської науково-практичної конференції

(за міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах». – Київ. – 2019. – С. 198 – 201.

37. Ніжник В.В. Наукові дослідження теплового впливу факелу модельного вогнища пожежі класа В на сусідні об'єкти / В.В. Ніжник, Ю.Л. Фещук, Я.В. Балло, С.Ю. Голікова // Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». – Черкаси. – 2019. – С. 98 – 101.

38. Нижник В.В. Расчетно-табличный метод оценки противопожарных расстояний между смежными строительными объектами / В.В. Нижник, С.В. Поздеев, Ю.Л. Фещук, С.Ю. Голикова, Я.В. Балло // Материалы VIII Международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация». – Минск. – 2019. – С. 373 – 383.

### АНОТАЦІЯ

**Ніжник В.В. Розвиток наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека. Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки – розкриття закономірностей параметрів теплообміну між факелом пожежі та будівельними об'єктами, що являється науковими основними для розрахункового обґрунтування протипожежних відстаней між такими об'єктами при їх проектуванні та експлуатуванні і слугують теоретичною базою для прогнозування небезпеки поширення пожеж від одного об'єкту на інший. Це дозволило розробити новий розрахунковий метод оцінювання протипожежних відстаней між будівельними об'єктами, який може враховувати найбільш значущі параметри щодо прогнозування небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти, а саме: теплоутворювальна здатність пожежної навантаги, коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалість опромінювання.

Розроблено методологію розрахункової оцінки протипожежних відстаней між об'єктами, яка включає в себе: розрахунково-табличний метод оцінювання протипожежних відстаней, спрощений метод оцінювання протипожежних відстаней, метод заснований на рівнянні нестационарної теплопровідності, та польовий метод. Шляхом проведення чисельного експерименту з використання математичних моделей обчислювальної газогідродинаміки (польового методу) виявлено закономірність залежності мінімальних безпечних відстаней для суміжних будівельних об'єктів у випадку пожежі у будинку з негорючим та горючим фасадом, а також на промислових об'єктах з використанням горючих рідин, що залежить від теплоутворювальної здатності пожежної навантаги, коефіцієнту прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалості опромінювання у вигляді регресійних залежностей:



$y=5,09+1,34x_1+0,475x_2+1,573x_3+0,225x_1x_2+0,073x_1x_3+0,134x_2x_3+0,134x_1x_2x_3$  (для будинку із горючим фасадом);

$y=4,275+1,1x_1+0,525x_2+1,65x_3+0,5x_1x_2+0,475x_1x_3-0,1x_2x_3-0,125x_1x_2x_3$  (для будинку з негорючим фасадом);

$y=7,247+2,215x_1+0,698x_2+2,243x_3+0,125x_1x_2+0,21x_1x_3-0,037x_2x_3+0,39x_1x_2x_3$  (для промислових об'єктів з використанням горючих рідин).

Побудовані таблиці безпечних відстаней залежно від теплоутворювальної здатності пожежної навантаги, коефіцієнту прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалості опромінювання для реалізації спрощеного табличного методу розрахунку.

Запропоновано методичну базу для розрахункового обґрунтування мінімальних безпечних протипожежних відстаней та прогнозування небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти шляхом створення структурних схем-методів, що разом складають ієрархічну структуру та є теоретичною основою для створення відповідного національного стандарту України ДСТУ «Пожежна безпека. Оцінювання протипожежних відстаней між суміжними об'єктами розрахунковими методами. Основні положення».

Розроблені алгоритми щодо реалізації розрахунків обґрунтування мінімальних безпечних протипожежних відстаней та прогнозування небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти за одним із запропонованих методів.

**Ключові слова:** протипожежна відстань, вогнище, температура, тепловий вплив, теплопередача, поширення пожежі, навантага, математична модель, тепловий потік, теплоприймач.

## АННОТАЦІЯ

**Нижник В.В. Развитие научных основ оценки опасности распространения пожара на смежные строительные объекты.** - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 21.06.02 - пожарная безопасность. Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты, Киев, 2020.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы в сфере пожарной безопасности - раскрытие закономерностей параметров теплообмена между факелом пожара и строительными объектами, является научными основными для расчетного обоснования противопожарных расстояний между такими объектами при их проектировании и эксплуатации, и служат теоретической базой для прогнозирования рисков распространения пожаров от одного объекта на другой. Это позволило разработать новый расчетный метод оценки противопожарных расстояний между строительными объектами, который может учитывать наиболее значимые параметры по прогнозированию рисков распространения пожара на смежные объекты, а именно: пожарная нагрузка, коэффициент проемов в наружных ограждающих конструкциях и продолжительность облучения.

Разработана методология расчетной оценки противопожарных расстояний между объектами, которая включает в себя: расчетно-табличный метод оценки

противопожарных расстояний, упрощенный метод оценки противопожарных расстояний, метод основан на уравнении нестационарной теплопроводности, и полевой метод. Путем проведения численного эксперимента по использованию математических моделей вычислительной газогидродинамики выявлена закономерность зависимости минимальных безопасных расстояний для смежных строительных объектов в случае пожара в доме с негорючим и горючим фасадом, а также на промышленных объектах с использованием горючих жидкостей, от пожарной нагрузки, коэффициента проемов в наружных ограждающих конструкциях и продолжительности облучения в виде регрессий:

$$y=5,09+1,34x_1+0,475x_2+1,573x_3+0,225x_1x_2+0,073x_1x_3+0,134x_2x_3+0,134x_1x_2x_3$$

(для здания из горючим фасадом);

$$y=4,275+1,1x_1+0,525x_2+1,65x_3+0,5x_1x_2+0,475x_1x_3-0,1x_2x_3-0,125x_1x_2x_3$$

(для здания из негорючим фасадом);

$$y=7,247+2,215x_1+0,698x_2+2,243x_3+0,125x_1x_2+0,21x_1x_3-0,037x_2x_3+0,39x_1x_2x_3$$

(для промышленного предприятия в котором используются горючие жидкости).

Построенные таблицы безопасных расстояний в зависимости от пожарной нагрузки, коэффициента проемов в наружных ограждающих конструкциях и продолжительности облучения для реализации упрощенного табличного метода расчета.

Предложено методическую базу для расчетного обоснования минимальных безопасных противопожарных расстояний и прогнозирования риска распространения пожара на смежные объекты путем создания структурных схем-методов, которые вместе составляют иерархическую структуру, и является теоретической основой для создания соответствующего национального стандарта Украины ДСТУ «Пожарная безопасность. Оценивания противопожарных расстояний между смежными объектами расчетными методами. Основные положения».

Разработанные алгоритмы по реализации расчетов обоснования минимальных безопасных противопожарных расстояний и прогнозирования риска распространения пожара на смежные объекты по одному из предложенных методов.

**Ключевые слова:** противопожарное расстояние, очаг, температура, тепловое воздействие, теплопередача, распространение пожара, нагрузка, математическая модель, тепловой поток, теплоприемник.

## SUMMARY

**Nizhnyk V.V. Development of scientific foundations of fire propagation to adjacent construction facilities.** – Qualification scientific paper which is typescript.

Dissertation work for the competition of the scientific degree of Doctor of Sciences (Engineering) by specialty of 21.06.02 – Fire safety. Ukrainian Civil Protection Research Institute, Kyiv, 2020.

The dissertation work is dedicated to the solution of an actual scientific problem in the sphere of fire safety which is revelation of the regularities of the parameters of heat exchange between flames coming from fire and construction facilities which are principal from scientific view-point for the computational



substantiation of fire separation distances between such facilities at their design and use and which serve as theoretical basis for the prediction of risks of fire propagation from a facility to another one. This made it possible to develop a new computational method for the evaluation of fire separation distances between construction facilities which can allow for the most significant parameters as to prediction of risks of fire propagation to adjacent facilities, in particular: heat-producing power of fire load, factor of openings in the external boundary constructions and irradiation duration.

Methodology was developed for the computational evaluation of fire separation distances between facilities which included the following: computational and tabular method of evaluation of fire separation distances, simplified method of evaluation of fire separation distances, method based on non-stationary heat conduction equation, and field method. While conducting numerical experiment using proper mathematical models of computational gas hydrodynamics (field method) trend was revealed of the dependency of minimum safe distances for adjacent construction facilities in case of fire involving buildings with non-combustible and combustible facades as well as at industrial plants consuming combustible liquids which depended on heat-producing power of fire load, factor of openings in the external boundary constructions and irradiation duration in the form of the following regression relations:

$y=5.09+1.34x_1+0.475x_2+1.573x_3+0.225x_1x_2+0.073x_1x_3+0.134x_2x_3+0.134x_1x_2x_3$   
(for a building with combustible facade);

$y=4.275+1,1x_1+0.525x_2+1.65x_3+0.5x_1x_2+0.475x_1x_3-0.1x_2x_3-0.125x_1x_2x_3$  (for a building with non-combustible facade);

$y=7.247+2.215x_1+0.698x_2+2.243x_3+0.125x_1x_2+0.21x_1x_3-0.037x_2x_3+0.39x_1x_2x_3$   
(for industrial plants consuming combustible liquids).

A number of tables were compiled showing safe distances depending on heat-producing power of fire load, factor of openings in the external boundary constructions and duration of irradiation for the realization of simplified tabular computational method.

Methodical base was proposed for the computational substantiation of minimum safe distances and prediction of risk of fire spread to adjacent facilities by way of creation of structural scheme methods which formed together hierarchic structure and were theoretical substantiation for the development of appropriate national standard DSTU "Fire safety. Evaluation of fire separation distances between adjacent facilities by computational methods. Basic provisions".

Some algorithms were developed for the implementation of computations for the substantiation of minimum safe distances and prediction of risk of fire spread to adjacent facilities using one of the proposed methods.

**Key words:** fire separation, source, temperature, heat impact, heat transfer, fire load, heat transfer mathematical model, heat flux, heat flux density, heat flux receiver, dispersions of deviations.

Підписано до друку 12.03.2020. Обл-вид. арт. 0,9.  
Папір офсетний. Друк цифровий.  
Тираж 100 прим. Замовлення № 1203/2020.  
Віддруковано ФОП Клименко Ю.Я.  
м. Київ, вул. П. Запорожця, 4  
Тел.: 066 260 76 86