

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Савченко Олеся Вікторівна

УДК 614.8/.84:303.4(477)

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО
ПОЖЕЖНОГО РИЗИКУ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ СИСТЕМ
ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ

Спеціальність – 261 «Пожежна безпека»

Галузь знань – 26 «Цивільна безпека»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



О. В. Савченко

Науковий керівник: **Ніжник Вадим Васильович**
доктор технічних наук, професор

Черкаси 2026

АНОТАЦІЯ

Савченко О. В. Удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 «Пожежна безпека». – Національний університет цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій, Черкаси, 2025.

Дисертація присвячена вирішенню актуального науково-технічного завдання у сфері пожежної безпеки - виявлення закономірності впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику як наукового підґрунтя для удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику.

У вступі дисертаційної роботи здійснено обґрунтування актуальності теми, її зв'язок із науковими програмами. Сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, визначено наукову новизну, указано практичну значущість отриманих результатів та наведено інформацію про публікації та апробацію отриманих результатів. Наведено інформацію щодо особистого внеску здобувача у роботах, в яких він є співавтором.

У першому розділі здійснено аналіз сучасного стану ефективності функціонування систем протипожежного захисту та оцінено характер їх впливу на величину індивідуального пожежного ризику. Встановлено, що на теперішній час механізми впливу зазначених систем на рівень пожежного ризику залишаються недостатньо вивченими. Зокрема, відсутнє належне наукове обґрунтування та комплексне дослідження закономірностей впливу результативності спрацювання систем протипожежного захисту на масштаби та наслідки пожеж, що зумовлює актуальність подальших досліджень у цьому напрямі як необхідної умови для вдосконалення методів оцінювання індивідуального пожежного ризику.

Проаналізовано наявну структуру системи протипожежного захисту з визначенням її основних функцій і завдань, а також запропоновано напрями її вдосконалення з метою обґрунтування найбільш доцільних рівнів впливу на

показники індивідуального пожежного ризику. Це створює передумови для подальшого розвитку методів його оцінювання з урахуванням кількісного внеску як окремих систем протипожежного захисту, так і їх сумарного впливу в умовах спільного функціонування.

Встановлено, що ефективність спрацювання в середньому для всіх систем протипожежного захисту становить близько 50%. При цьому система протидимного захисту, яка встановлена в евакуаційному коридорі збільшує час блокування шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі приблизно на 34%.

Показано, що системи протипожежного захисту є ефективним технічним засобом, який здатний, у разі його ефективного функціонування, знижувати пожежні ризики.

Визначено, що для оцінювання впливу ефективного функціонування систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик доцільно використовувати такі детерміністичні методи, що ґрунтовані на теорії ймовірності (статистичні методи) або польові методи із використанням сучасних комп'ютерних розрахункових комплексів та подальшою верифікацією отриманих розрахункових даних шляхом проведення натурного експерименту.

У другому розділі здійснено відбір і аналіз найбільш інформативних критеріїв, придатних для оцінювання впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику. Обґрунтовано, що визначальними показниками надійності в межах такого аналізу є безвідмовність та ефективність функціонування систем протипожежного захисту. Зазначені характеристики доцільно пов'язувати з часом досягнення небезпечними чинниками пожежі граничних для життя людини значень. Показано, що найбільш швидко критичного рівня зазвичай досягає зниження видимості внаслідок задимлення, яке кількісно оцінюється через коефіцієнт задимленості. У поєднанні з показником критичної температури ці параметри визначено як базові для подальших досліджень.

Визначено перелік систем протипожежного захисту, що чинять істотний вплив на рівень індивідуального пожежного ризику, до яких віднесено системи пожежної сигналізації, системи оповіщення про пожежу та керування евакуацією людей,

автоматичні системи пожежогасіння, а також системи протидимного захисту.

Оцінювання впливу зазначених систем на величину індивідуального пожежного ризику доцільно здійснювати шляхом зіставлення двох альтернативних сценаріїв розвитку подій: у першому випадку пожежа виникає за відсутності функціонування відповідної системи протипожежного захисту, що супроводжується кількісною оцінкою наслідків такої події; у другому – пожежа відбувається за умови своєчасного спрацювання відповідної системи, для чого також визначаються кількісні показники наслідків. Порівняльний аналіз отриманих результатів для обох сценаріїв дає змогу розрахувати ймовірність ефективного спрацювання систем протипожежного захисту.

Наведено опис математичних моделей для дослідження закономірностей впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик із використанням імовірістно-статистичних математичних моделей та польових математичних моделей.

Запропоновано структурну схему дослідження ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту. У межах цієї схеми насамперед визначається сукупність параметрів, що характеризують вплив відповідної системи протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику. Далі обґрунтовується вибір математичного апарату дослідження, зокрема застосування методів теорії ймовірностей на основі статистичних даних або підходів, заснованих на польовому моделюванні з використанням засобів обчислювальної газогідродинаміки. На наступному етапі формуються розрахункові моделі із заданням граничних умов і визначенням сценаріїв пожежі, після чого організовується ітераційний цикл, у межах якого змінюються фактори, що відображають вплив систем протипожежного захисту на величину індивідуального пожежного ризику. У процесі аналізу різних сценаріїв фіксується наявність або відсутність впливу конкретної системи протипожежного захисту, здійснюється оброблення отриманих даних та порівняння наслідків пожежі з урахуванням дії відповідної системи і без її врахування, що дає змогу дослідити вплив систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик. Як основні критерії

подальших досліджень обґрунтовано доцільність використання температури та диму, які найшвидше досягають критичних для життя і здоров'я людини значень.

У третьому розділі наведені результати щодо дослідження впливу систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику із використанням польових моделей. Побудовані відповідні розрахункові моделі та проведені розрахунки за такими сценаріями: розвиток пожежі без функціонуванням систем протипожежного захисту, розвиток пожежі при функціонуванні систем протипожежного захисту. При цьому, розрахунки проведені для таких об'єктів, як офісний центр, торгівельний центр та лікувальний заклад. Один із розрахунків проведений для об'єкту на якому мала місце пожежа, а саме Епіцентр м. Первомайськ, з метою порівняння реальних (пожежна сигналізація спрацювала та подала сигнал на евакуацію людей, автоматична система пожежогасіння не спрацювала, за 4 хв відбулося заповнення торгівельної зали димом, за 2 хв спрацювали клапани системи протидимного захисту, що свідчить про досягнення температури близько 70 °C на рівні покриття) даних пожежі із результатами розрахунку. Слід відмітити, що абсолютні відхилення результатів розрахунку із реальними наслідками пожежі становлять 20 с для часу досягнення втрати видимості та 20 с для часу досягнення температури спрацювання протидимних клапанів у місці їх розташування, що у відносних показниках не перевищує 10 % та 20 % відповідно. Показані залежності зміни втрати видимості та підвищення температури в часі, на яких зафіксовано момент досягненнями цими критеріями критичних значень для життя людини та показано вплив систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик, що визначені із використанням польових моделей.

Також наведені результати щодо дослідження впливу систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику із використанням теорії імовірності, на основі зібраних відповідних статистичних даних. Для обробки статистичних даних використано наступну методологію: перевіряємо статистичну вибірку на викиди та квазівикиди за критерієм Граббса, будуємо згрупований статистичний ряд за формулою Брукса, визначаємо інтервал групи та межі

інтервалу, визначаємо математичне очікування, визначаємо дисперсію, визначаємо середньоквадратичне відхилення, встановлюємо досліджуване значення критерія. Використовуючи визначений методологічний підхід встановлено відносну кількість пожеж при оснащенні об'єкту відповідними системами протипожежного захисту для різних стадій ліквідації пожежі, а саме: пожежу погашено на початковій стадії її розвитку, пожежу погашено із залученням пожежно-рятувальних підрозділів, пожежу погашено із залученням додаткових сил і засобів, на пожежі мало місце загибель людини. Використовуючи вищезазначені отримані дані побудовані залежності ефективності функціонування відповідної системи протипожежного захисту. Аналізуючи ці залежності можна зазначити, що для кожної системи протипожежного захисту ефективність її функціонування обумовлюється (характеризується) відповідними стадіями пожежі на якій вона ліквідована. Наприклад, ефективність функціонування автоматичних систем пожежогасіння обумовлюється (характеризується) стадією ліквідації пожежі на їх початкових стадіях. Відносна кількість таких випадків становить 0,49. Ефективність функціонування систем пожежної сигналізації, систем оповіщення, протидимного захисту, зовнішнього та внутрішнього протипожежного водопостачання обумовлюється (характеризується) стадією ліквідація пожеж із залученням пожежно-рятувальних підрозділів. Відносна кількість таких випадків становить 0,88; 0,64; 0,75 відповідно. Такі стадії, як пожежа для ліквідації якої залучаються додаткові сили і засоби та пожежа, на якій мала місце загибель людини відносимо до подій із неприйнятним ступенем ризику. Слід відмітити досить високу ефективність впливу функціонування таких систем як автоматична система пожежогасіння, протидимного захисту, внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопостачання для стадій ліквідація пожежі із залученням додаткових сил і засобів. Це можна пояснити можливістю ефективного використання зазначених систем на різних стадіях розвитку пожежі та різних масштабах їх розвитку. Таким чином визначені ймовірність ефективності виконання функцій систем протипожежного захисту, ймовірність оснащення об'єктів

системами протипожежного захисту та ймовірність справності систем протипожежного захисту.

Приведені узагальнені дані щодо ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту, що визначені із використанням польових моделей та із використанням теорії імовірності. Вибираємо значення ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику, яке найменше знижує значення індивідуального пожежного ризику та встановлюємо значення ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту. При цьому слід врахувати, що система оповіщення про пожежу не функціонує без системи пожежної сигналізації тому ймовірності ефективного спрацювання таких систем доцільно об'єднати. Системи протидимного захисту, внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопостачання реалізують одну із основних функцій щодо забезпечення безпеки пожежно-рятувальних підрозділів під час проведення рятувальних робіт та робіт щодо ліквідації пожежі, тому ймовірність ефективного спрацювання таких систем також доцільно об'єднати.

Таким чином у розділі 3 визначено перше наукове положення, а саме встановлено, що значення ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту становлять для систем пожежної сигналізації та оповіщення про пожежу – 0,61, для системи автоматичного пожежогасіння – 0,87, для систем протидимного захисту, внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопроводу – 0,5.

У четвертому розділі наведені результати експериментальних досліджень, які проведені з метою перевірки отриманих результатів за теоретичними дослідженнями. Експериментальні дослідження проведені згідно із розробленою програмою та методикою експериментальних досліджень.

У програмі та методиці експериментальних досліджень аргументовано склад технічного забезпечення, необхідного для їх реалізації. Зокрема визначено, що до складу експериментальної бази входять споруда ВБ-40, модельне вогнище пожежі класу А, комплекс засобів вимірювальної техніки, а також обладнання для фото- й відеофіксації перебігу експериментів. Окремо обґрунтовано вибір вимірювальних

приладів для реєстрації небезпечних чинників пожежі, критичних для життя людини. Для контролю температурних параметрів використано термопари типу ТХА у поєднанні з вимірювальним пристроєм «Термоконт», що забезпечує фіксацію температур, близьких до гранично допустимих значень. Для оцінювання втрати видимості застосовано лазерний вимірювач із діаметром променя 6 мм Н4А3 у поєднанні з фоторезистором GL5516 (5–10 кОм), що дозволяє кількісно визначати рівень задимленості під час розвитку пожежі.

Встановлена послідовність проведення експериментальних досліджень та вимоги безпеки, яких необхідно дотримуватися під час проведення експериментальних досліджень.

Встановлено, що значення критичної для життя людини температури досягнуто на 36 секунді експерименту, а втрата видимості на - 28 секунді експерименту для сценарію, коли споруда ВБ-40 не оснащена системами протипожежного захисту. Система пожежної сигналізації спрацювала на 15 секунді експерименту, що виражає ймовірність ефективного функціонування систем пожежної сигналізації із значенням 0,58 та 0,52. У разі функціонування систем протидимного захисту значення критичної для життя людини температури досягнуто на 53 секунді експерименту, а втрата видимості на - 56 секунді експерименту. Автоматична система пожежогасіння спрацювала на 7 секунді експериментального дослідження та по значенню температури не дала досягнути критичного значення для життя людини небезпечного чинника пожежі, а втрата видимості на - 87 секунді експерименту.

Обґрунтовано доцільність застосування методів теорії ймовірності, що базуються на статистичних даних, а також підходів, заснованих на польових комп'ютерних моделях і засобах обчислювальної газогідродинаміки, для дослідження впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику. Порівняння результатів розрахунків, отриманих із використанням зазначених методів, з даними експериментальних досліджень підтвердило їхню адекватність і прийнятну точність, оскільки відносні відхилення не перевищували приблизно 14 % для систем пожежної сигналізації, близько 20 %

для систем протидимного захисту та близько 7 % для автоматичних систем пожежогасіння.

У п'ятому розділі розроблено удосконалений метод оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту, який впроваджений шляхом внесення зміни № 1 до ДСТУ 8828:2019 «Пожежна безпека. Основні положення». Затверджені наказом ДП «УкрНДНЦ» від 20.04.2023 № 77, надання чинності зміні № 1 до національного стандарту з 2023-06-01.

Розроблено алгоритм обґрунтування оснащеності об'єкту відповідними системами протипожежного захисту на основі управління пожежним ризиком. Саме цим зумовлений економічна ефективність роботи, що дозволяє на основі ризи-орієнтовного підходу оцінювати необхідність оснащення об'єктів будівництва відповідними системами протипожежного захисту. Зазначене дасть змогу знайти баланс між достатнім рівнем пожежної безпеки та мінімальними витратами на проектування та будівництва відповідних систем протипожежного захисту.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розкритті закономірностей впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику як наукового підґрунтя для удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику. За цих обставин отримано такі нові наукові дані.

Вперше:

- встановлено, що значення ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту становлять для систем пожежної сигналізації та оповіщення про пожежу – 0,61, для системи автоматичного пожежогасіння – 0,87, для систем протидимного захисту, внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопроводу – 0,5;

- встановлено залежність величини індивідуального пожежного ризику від ймовірності спрацювання систем протипожежного захисту, яка дозволяє врахувати наявність систем пожежної сигналізації, автоматичних систем пожежогасіння та систем протидимного захисту, як у спільній дії так і індивідуально.

Удосконалено:

- метод оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту.

Набуло подальшого розвитку:

- застосування даних про системи протипожежного захисту під час проведення інженерних розрахунків щодо оцінки рівня пожежної безпеки об'єктів.

Отримані в ході дослідження результати знайшли практичне застосування (додаток Б) у діяльності Міністерства розвитку громад та територій України, базової організації Міністерства розвитку громад та територій України – «Українського союзу пожежної та техногенної безпеки», а також у роботі ТОВ «Флагман систем безпеки», зокрема під час використання запропонованого підходу до оцінювання індивідуального пожежного ризику для об'єктів будівництва. Крім того, напрацювання дисертації інтегровані в освітній процес кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки Національного університету цивільного захисту України. Практична реалізація результатів дослідження також забезпечена шляхом внесення зміни № 1 до національного стандарту ДСТУ 8828:2019 «Пожежна безпека. Основні положення».

Ключові слова: пожежний ризик, системи протипожежного захисту, коефіцієнти впливу, критерії оцінки, параметри пожежної небезпеки, наслідки, оцінювання пожежного ризику, управління пожежним ризиком.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у вітчизняних наукових фахових виданнях

1. Сізіков О., Ніжник В., Балло Я., Голікова С., **Савченко О.** Систематизація процесу управління пожежною безпекою об'єкта захисту. *Науковий збірник «Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека»*, № 2 (8). Київ, 2019. С. 41-49. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2019.2.41-49>.
2. Балло Я., Голікова С., Сізіков О., Жихарев О., **Савченко О.**, Несенюк Л. Вимоги пожежної безпеки до висотних громадських будівель з умовною висотою від 100 м до 150 м. *Науковий збірник «Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека»*. № 2 (12). Київ, 2021. С. 30-42. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2.30-42>.
3. Несенюк Л., **Савченко О.**, Ніжник В., Нікулін О. Методи оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. № 2 (14). Київ, 2022. С. 134-142. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.134-142>.
4. Ніжник В., **Савченко О.**, Некора В. Теоретичні підходи для дослідження закономірності впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗУ «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Том 7 № 1. Черкаси, 2023. С. 67-76. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.67.76>.
5. **Савченко О.**, Ніжник В. Удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту. *Збірник наукових праць «Пожежна безпека»*. 2025. Т. 47. С. 96–102. <https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.10>.
6. **Савченко О.**, Ніжник В., Коваль Р. Дослідження впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик. *Збірник наукових праць «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. № 2 (42). Черкаси, 2025. С. 285-294. <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2025-42-18>.

7. **Савченко О.**, Ніжник В., Циганков А., Тесленко О., Селіхов Д. Аналіз сучасного стану технічного обслуговування систем протипожежного захисту. *Науковий збірник «Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека»*. № 2 (20). Київ, 2025. С. 116-123. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2.116-123>.

Статті у міжнародних виданнях

8. Ніжник В., **Савченко О.**, Некора В., Одинець А. Дослідження впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику. *The scientific heritage*. № 109 (109). Budapest (Hungary), 2023. Р. 64-70. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7752746>.

Інші публікації

9. **Савченко О.**, Зенкін А., Козелло Н., Сізіков О., Ніжник В., Балло Я. Удосконалення протипожежного захисту об'єктів шляхом обґрунтування загальних положень системи управління пожежною безпекою. *Вісник UAS «Стандартизація, сертифікація, якість»*. № 6 (118). Київ, 2019. С. 18-25.

10. Дишкант О., Дивень В., Доценко О., **Савченко О.** Чинники, які впливають на швидкість евакуації. *XXII-ий том міжнародної колективної монографії "MODERNÍ ASPEKTY VĚDY" ("Сучасні аспекти науки")*. Київ, 2022. С. 516-526.

11. Ніжник В., **Савченко О.**, Добряк Д., Кравченко Н. Аналіз сучасного стану управління індивідуальним пожежним ризиком із використанням систем протипожежного захисту. *Науковий журнал «Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки»*, Том 33 (72) № 1. Київ, 2022. С. 328-333.

12. Ніжник В., **Савченко О.**, Добряк Д. Критерії для дослідження впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик. *Науковий журнал «Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки»*. Том 34 (73) № 1. Київ, 2023. С. 336-341.

13. **Савченко О.**, Ніжник В., Савченко Т. Програма та методика експериментальних досліджень впливу систем протипожежного захисту на

індивідуальний пожежний ризик. *Науковий журнал «Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки»*. Том 35 (74) № 4. Київ, 2024. С. 348-353.

Публікації, які засвідчують апробацію дисертації

14. Vadim Nizhnyk, **Olesya Savchenko**, Yaroslav Ballo, Valeriia Nekora Theoretical Approaches to Justify the Coefficients of Influence of Fire Protection Systems on Individual Fire Risk *International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering EcoComfort 2022: Proceedings of EcoComfort 2022* pp 299–306 **Scopus** DOI: 10.1007/978-3-031-14141-6_30.

15. **Савченко О.**, Козелло Н., Сізіков О., Ніжник В., Балло Я. Удосконалення протипожежного захисту об'єктів шляхом обґрунтування загальних положень системи управління пожежною безпекою. *Міжнародна науково-практична конференція «Пріоритетні напрями досліджень в науковій та освітній діяльності»*. Львів, (5-6.12.2019). С. 45-47.

16. **Савченко О.**, Ніжник В., Одинець А., Несенюк Л. Аналіз статистичних даних про пожежі щодо ефективності спрацювання систем протипожежного захисту. *XI Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси, 28-29.10.2021. С. 52-53.

17. **Савченко О.**, Добряк Д., Ніжник В. Роль систем протипожежного захисту під час оцінювання індивідуального пожежного ризику. *XVII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів, 03.2022). С. 114-116.

18. Ніжник В., **Савченко О.**, Некора В., Несенюк Л. Теоретичні дослідження щодо ефективності функціонування систем протипожежного захисту. *XIII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси, 26.04.2022. С. 28-30.

19. **Савченко О.**, Ніжник В., Добряк Д., Кравченко Н. До питань ефективності функціонування систем протипожежного захисту. *Актуальні проблеми пожежної*

безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення. Зб. наук. праць Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю». Львів, ЛДУБЖД, 2022. С. 227-229.

20. **Савченко О.**, Добряк Д., Кравченко Н., Луценко Ю., Ніжник В. Методика теоретичних досліджень з визначення коефіцієнтів ймовірної ефективності функціонування систем протипожежного захисту. *Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності: матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів*. Львів, 30-31 березня 2023. С.156-158.

21. **Савченко О.**, Несенюк Л., Оношко І. Ніжник В. Програма та методика експериментальних досліджень впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту»*. Харків, НУЦЗУ, 2024. С. 97.

22. **Савченко О.**, Ніжник В. Удосконалення підходів до управління індивідуальним пожежним ризиком на основі ефективності систем протипожежного захисту. *Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми забезпечення державної безпеки»*. Київ, Київський інститут національної гвардії України, 2025. С. 444-445.

23. Ніжник В., Фещук Ю., Жихарєв О., Циганков А., **Савченко О.** Оцінка стану оперативної обстановки території зони відчуження. *XII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. ЧПБ НУЦЗУ, 2021. С. 44-46.

ABSTRACT

Savchenko O. V. Improvement of the method for assessing individual fire risk, taking into account the impact of fire protection systems. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 261 ‘Fire Safety’. – National University of Civil Protection of Ukraine of the State Emergency Service of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to solving an urgent scientific and technical problem in the field of fire safety: identifying the patterns of influence of fire protection systems on the calculated parameters of individual fire risk as a scientific basis for improving the method of assessing individual fire risk.

The introduction to the dissertation substantiates the relevance of the topic and its connection with scientific programmes. It formulates the goal, objectives, object and subject of the research, determines its scientific novelty, indicates the practical significance of the results obtained, and provides information about publications and the testing of the results obtained. Information is provided on the personal contribution of the applicant to the works in which he is a co-author.

The first section analyzes the current state of fire protection systems and assesses their impact on individual fire risk. It has been established that the mechanisms by which these systems affect fire risk remain insufficiently studied. In particular, there is a lack of adequate scientific justification and comprehensive research on the patterns of influence of the effectiveness of fire protection systems on the scale and consequences of fires, which makes further research in this area a necessary condition for improving methods of assessing individual fire risk.

The existing structure of the fire protection system has been analyzed, defining its main functions and tasks, and directions for its improvement have been proposed in order to justify the most appropriate levels of influence on individual fire risk indicators. This creates the prerequisites for the further development of methods for its assessment, taking into account the quantitative contribution of both individual fire protection systems and their cumulative impact in conditions of joint operation.

It has been established that the average activation efficiency for all fire protection systems is about 50%. At the same time, the smoke protection system installed in the evacuation corridor increases the time of blocking of evacuation routes by dangerous fire factors by approximately 34%.

It has been shown that fire protection systems are an effective technical means that, if they function effectively, can reduce fire risks.

It has been determined that to assess the impact of the effective functioning of fire protection systems on individual fire risk, it is advisable to use such deterministic methods based on probability theory (statistical methods) or field methods using modern computer calculation complexes and subsequent verification of the obtained calculation data by conducting a full-scale experiment.

The second section selects and analyzes the most informative criteria suitable for assessing the impact of fire protection systems on the level of individual fire risk. It is justified that the determining indicators of reliability within such an analysis are the reliability and effectiveness of fire protection systems. It is advisable to link these characteristics to the time it takes for hazardous fire factors to reach values that are critical for human life. It is shown that the critical level is usually reached most quickly by a decrease in visibility due to smoke, which is quantitatively assessed by the smoke coefficient. In combination with the critical temperature indicator, these parameters are reasonably defined as basic for further research.

A list of fire protection systems that have a significant impact on the level of individual fire risk has been identified, including automatic fire alarm systems, fire warning and evacuation control systems, fire extinguishing systems, and smoke protection systems.

It is advisable to assess the impact of these systems on the level of individual fire risk by comparing two alternative scenarios: in the first case, a fire occurs in the absence of a functioning fire protection system, accompanied by a quantitative assessment of the consequences of such an event; in the second case, a fire occurs with the timely activation of the relevant system, for which quantitative indicators of the consequences are also

determined. A comparative analysis of the results obtained for both scenarios makes it possible to calculate the coefficient of probable effectiveness of fire protection systems.

A description of mathematical models for studying the patterns of the impact of fire protection systems on individual fire risk using probabilistic-statistical mathematical models and field mathematical models is given.

A structural scheme for studying the coefficients of probable effectiveness of fire protection systems is proposed. Within this scheme, a set of parameters characterizing the impact of the corresponding fire protection system on the level of individual fire risk is first determined. Next, the choice of mathematical apparatus for the study is justified, in particular, the application of probability theory methods based on statistical data or approaches based on field modeling using computational gas hydrodynamics. At the next stage, computational models are formed with the specification of boundary conditions and the definition of fire scenarios, after which an iterative cycle is organized, within which the factors reflecting the impact of fire protection systems on the magnitude of individual fire risk are changed. In the process of analyzing various scenarios, the presence or absence of the influence of a specific fire protection system is recorded, the obtained data is processed, and the consequences of the fire are compared, taking into account the action of the corresponding system and without taking it into account, which makes it possible to determine the coefficients of influence of fire protection systems on individual fire risk. The main criteria for further research are the feasibility of using temperature and smoke, which most quickly reach values critical to human life and health.

The third section presents the results of determining the coefficient of influence of fire protection systems on the value of individual fire risk using field models. The corresponding calculation models were built and calculations were performed according to the following scenarios: fire development without the functioning of fire protection systems, fire development with the functioning of fire protection systems. At the same time, calculations were performed for such objects as an office center, a shopping center and a medical institution. One of the calculations was performed for the object where the fire occurred, namely the Epicenter in Pervomaisk, in order to compare the real (automatic fire alarm system worked and gave a signal to evacuate people, the automatic fire

extinguishing system did not work, in 4 minutes the trading floor was filled with smoke, in 2 minutes the smoke protection system valves worked, which indicates that the temperature reached about 70 °C at the level of the floor) fire data with the calculation results. It should be noted that the absolute deviations of the calculation results from the real consequences of a fire are 20 s for the time of achieving the loss of visibility and 20 s for the time of reaching the operating temperature of the smoke dampers at their location, which in relative terms does not exceed 10% and 20%, respectively. The dependences of the change in the loss of visibility and the increase in temperature over time are shown, which record the moment when these criteria reach critical values for human life, and the values of the coefficient of influence of fire protection systems on individual fire risk, determined using field models, are shown.

Also, the results of determining the coefficient of influence of fire protection systems on the value of individual fire risk using probability theory, based on the collected relevant statistical data. The following methodology was used to process statistical data: we check the statistical sample for outliers and quasi-outliers using the Grubbs criterion, we build a grouped statistical series using the Brooks formula, we determine the group interval and interval boundaries, we determine the mathematical expectation, we determine the variance, we determine the standard deviation, we establish the studied value of the criterion. Using the specified methodological approach, the relative number of fires when equipping the facility with appropriate fire protection systems for different stages of fire elimination was established, namely: the fire was extinguished at the initial stage of its development, the fire was extinguished with the involvement of fire and rescue units, the fire was extinguished with the involvement of additional forces and means, a person died in the fire. Using the above-mentioned obtained data, the dependences of the efficiency of the functioning of the corresponding fire protection system were constructed. Analyzing these dependences, it can be noted that for each fire protection system, the efficiency of its functioning is determined (characterized) by the corresponding stages of the fire at which it is eliminated. For example, the efficiency of the functioning of automatic fire extinguishing systems is determined (characterized) by the stage of fire elimination at their initial stages. The relative number of such cases is 0.49. The efficiency

of the functioning of automatic fire alarm systems, warning systems, smoke protection, external and internal fire water supply is determined (characterized) by the stage of fire elimination with the involvement of fire and rescue units. The relative number of such cases is 0.88; 0.64; 0.75, respectively. Such stages as a fire for the elimination of which additional forces and means are involved and a fire in which a person died are attributed to events with an unacceptable degree of risk. It should be noted that the effectiveness of the operation of such systems as automatic fire extinguishing systems, smoke protection, internal and external fire water supply for the stages of fire elimination with the involvement of additional forces and means is quite high. This can be explained by the possibility of effective use of these systems at different stages of fire development and different scales of their development. Thus, the probability of the effectiveness of the functions of fire protection systems, the probability of equipping facilities with fire protection systems and the probability of the serviceability of fire protection systems are determined.

The generalized data on the coefficients of effective functioning of fire protection systems, determined using field models and using probability theory, are presented. We choose the value of the coefficient of probable effectiveness of fire protection systems operation for the value of individual fire risk, which least reduces the value of individual fire risk and establish the values of the coefficients of probability of effective operation of fire protection systems. It should be noted that the fire alarm system does not function without an automatic fire alarm system, therefore it is advisable to combine the coefficients of probability of effective operation of such systems. Smoke protection systems, internal and external fire water supply implement one of the main functions of ensuring the safety of fire and rescue units during rescue operations and fire extinguishing operations, therefore it is also advisable to combine the coefficients of probability of effective operation of such systems.

Thus, in section 3, the first scientific proposition is determined, namely, it is established that the values of the probability coefficients of effective operation of fire protection systems are 0.61 for automatic fire alarm and fire notification systems, 0.87 for

automatic fire extinguishing systems, 0.5 for smoke protection systems, internal and external fire water supply systems.

Section 4 presents the results of experimental studies conducted to verify the results obtained from theoretical studies. Experimental studies were conducted in accordance with the developed program and methodology of experimental studies.

The program and methodology of experimental research justify the technical support necessary for their implementation. In particular, it is determined that the experimental base includes the VB-40 structure, a model class A fire source, a set of measuring instruments, as well as equipment for photo and video recording of the experiments. The choice of measuring instruments for recording fire hazards critical to human life is justified separately. To control temperature parameters, TXA thermocouples are used in combination with the Thermokont measuring device, which records temperatures close to the maximum permissible values. To assess the loss of visibility, a laser meter with a beam diameter of 6 mm H4A3 was used in combination with a GL5516 photoresistor (5–10 kOhm), which allows the level of smoke during the development of a fire to be quantitatively determined.

The sequence of experimental research and safety requirements that must be observed during experimental research are established.

It was established that the critical temperature for human life was reached at 36 seconds of the experiment, and the loss of visibility at - 28 seconds of the experiment for the scenario when the VB-40 building is not equipped with fire protection systems. The automatic fire alarm system was triggered at 15 seconds of the experiment, which expresses the efficiency coefficient of the automatic fire alarm systems with a value of 0.58 and 0.52. In the case of smoke protection systems, the critical temperature for human life was reached at 53 seconds of the experiment, and the loss of visibility at - 56 seconds of the experiment. The automatic fire extinguishing system was triggered at 7 seconds of the experimental study and, based on the temperature value, did not allow the critical value for human life of the fire hazard factor to be reached, and the loss of visibility at - 87 seconds of the experiment.

The feasibility of applying probability theory methods based on statistical data, as well as approaches based on field computer models and computational gas-dynamics tools, to study the impact of fire protection systems on the level of individual fire risk has been substantiated. A comparison of the calculation results obtained using these methods with experimental research data confirmed their adequacy and acceptable accuracy, since the relative deviations did not exceed approximately 14% for automatic fire alarm systems, about 20% for smoke protection systems, and about 7% for automatic fire extinguishing systems.

In the fifth section, an improved method for assessing individual fire risk is developed, taking into account the impact of fire protection systems, which is implemented by introducing Amendment No. 1 to DSTU 8828:2019 “Fire Safety. Basic Provisions”. Approved by order of the State Enterprise “UkrNDNC” dated 20.04.2023 No. 77, entry into force of Amendment No. 1 to the national standard from 2023-06-01.

An algorithm has been developed to justify the equipment of an object with appropriate fire protection systems based on fire risk management. This is what determines the economic efficiency of the work, which allows, based on a risk-oriented approach, to assess the need to equip construction objects with appropriate fire protection systems. This will make it possible to find a balance between a sufficient level of fire safety and minimal costs for the design and construction of appropriate fire protection systems.

The scientific novelty of the results obtained lies in revealing the patterns of the influence of fire protection systems on the calculated parameters of individual fire risk as a scientific basis for improving the method of assessing individual fire risk. Under these circumstances, the following new scientific data were obtained.

For the first time:

- it was established that the values of the probability coefficients of effective operation of fire protection systems are 0.61 for automatic fire alarm and fire notification systems, 0.87 for automatic fire extinguishing systems, 0.5 for smoke protection systems, internal and external fire water supply systems;

- the dependence of the value of individual fire risk on the effectiveness of operation of fire protection systems has been established, which has the form of the equation:

$$R=0.0005-0.0255r_a-0.0034r_d+0.0075r_g+0.16r_{ard}-0.19r_{arg}+0.039r_{drg}+0.52r_{ardrg};$$

Improved:

- the method of assessing individual fire risk taking into account the impact of fire protection systems.

Further development has been made:

- the use of data on fire protection systems when conducting engineering calculations to assess the level of fire safety of facilities.

The results obtained in the course of the research have found practical application (Appendix B) in the activities of the base organization of the Ministry of Community and Territorial Development of Ukraine – the Ukrainian Union of Fire and Technogenic Safety, as well as in the work of Flagman Security Systems LLC, in particular when using the proposed approach to assessing individual fire risk for construction objects. In addition, the findings of the dissertation have been integrated into the educational process of the Department of State Supervision in the Field of Fire and Technogenic Safety at the National University of Civil Protection of Ukraine. The practical implementation of the research results is also ensured by amendment No. 1 to the national standard DSTU 8828:2019 “Fire Safety. Basic Provisions”.

Keywords: fire risk, fire protection systems, impact factors, assessment criteria, fire hazard parameters, consequences, fire risk assessment, fire risk management.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THESIS TOPIC

1. Sizikov O., Nizhnyk V., Ballo Ya., Golikova S., **Savchenko O.** Systematization of the fire safety management process of a protected object. *Scientific collection “Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety”*. № 2 (8). Kyiv, 2019. P. 41-49. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2019.2.41-49>.

2. Ballo Ya., Golikova S., Sizikov O., Zhykharev O., **Savchenko O.**, Nesenyuk L. Fire safety requirements for high-rise public buildings with a nominal height of 100 m to

150 m. *Scientific collection "Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety"*. № 2 (12). Kyiv, 2021. P. 30-42. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2.30-42>.

3. Nesenjuk L., **Savchenko O.**, Nizhnyk V., Nikulin O. Methods for assessing the effectiveness of fire protection systems. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. № 2 (14). Kyiv, 2022. P. 134-142. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.134-142>.

4. Nizhnyk V., **Savchenko O.**, Nekora V. Theoretical approaches to studying the regularity of the influence of fire protection systems on the level of individual fire risk. *Collection of scientific papers of the Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl NUCZU "Emergency situations: prevention and liquidation"*. Volume 7 №1. Cherkasy, 2023. P. 67-76. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.67.76>.

5. **Savchenko O.**, Nizhnyk V. Improvement of the method of assessing individual fire risk taking into account the influence of fire protection systems. *Collection of scientific works "Fire safety"*. Volume 47. Lviv, 2025. P. 96–102 <https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.10>.

6. **Savchenko O.**, Nizhnyk V., Koval R. Studies of the influence of fire protection systems on individual fire risk. *Collection of scientific works "Problems of emergency situations"*. № 2 (42). Cherkasy, 2025. P. 285-294. <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2025-42-18>.

7. **Savchenko O.**, Nizhnyk V., Tsygankov A., Teslenko O., Silihov D. Analysis of the current state of technical maintenance of fire protection systems. *Scientific collection "Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety"*. № 2 (20). Kyiv, 2025. P. 116-123.

Articles in international publications

8. Nizhnyk V., **Savchenko O.**, Nekora V., Odynets A. Research on the influence of fire protection systems on the level of individual fire risk. *The scientific heritage*. № 109 (109). Budapest (Hungary), 2023. P. 64-70.

Other publications

9. **Savchenko O.**, Zenkin A., Kozello N., Sizikov O., Nizhnyk V., Ballo Ya. Improving fire protection of facilities by substantiating the general provisions of the fire

safety management system. *Bulletin of UAS "Standardization, Certification, Quality".* №6 (118). Kyiv, 2019. P. 18-25.

10. Dyskhant O., Dyven V., Dotsenko O., **Savchenko O.** Factors affecting the speed of evacuation. *Volume XXII of the international collective monograph "MODERNÍ ASPEKTY VĚDY" ("Modern aspects of science")*. Kyiv, 2022. P. 516-526.

11. Nizhnyk V., **Savchenko O.**, Dobryak D., Kravchenko N. Analysis of the current state of individual fire risk management using fire protection systems. *Scientific journal "Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Tavrichesky National University Series: Technical Sciences"*. Volume 33 (72) № 1. Kyiv, 2022. P. 328-333.

12. Vadim Nizhnyk, **Olesya Savchenko**, Yaroslav Ballo, Valeriia Nekora Theoretical Approaches to Justify the Coefficients of Influence of Fire Protection Systems on Individual Fire Risk. *International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering EcoComfort 2022: Proceedings of EcoComfort 2022*. Pp. 299–306 **Scopus**. DOI: 10.1007/978-3-031-14141-6_30.

13. Nizhnyk V., **Savchenko O.**, Dobryak D. Criteria for studying the impact of fire protection systems on individual fire risk. *Scientific journal "Scientific notes of the V.I. Vernadsky Tavrichesky National University Series: Technical Sciences"*. Volume 34 (73) №4. Kyiv, 2023. P. 336-341.

14. **Savchenko O.**, Nizhnyk V., Savchenko T. Program and methodology of experimental research on the impact of fire protection systems on individual fire risk. *Scientific journal "Scientific notes of the V.I. Vernadsky Tavrichesky National University Series: Technical Sciences"*. Volume 35 (74) № 1. Kyiv, 2024. P. 348-353.

Publications that confirm the approval of th dissertation

15. **Savchenko O.**, Kozello N., Sizikov O., Nizhnyk V., Ballo Ya. Improving fire protection of facilities by substantiating the general provisions of the fire safety management system. *International scientific and practical conference "Priority areas of research in scientific and educational activities"*. Lviv: (5-6.12.2019). Lviv Scientific Forum, 2019. P. 45-47.

16. **Savchenko O.**, Nizhnyk V., Odyneets A., Nesenyuk L. Analysis of statistical data on fires regarding the effectiveness of fire protection systems. *XI All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation "Emergencies: Safety and Protection"*. Cherkasy, (28-29.10. 2021). Cherkasy, CHIPB NUCZU. P. 52-53.

17. **Savchenko O.**, Dobryak D., Nizhnyk V. The role of fire protection systems when assessing individual fire risk. *XVII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Cadets and Students "Problems and Prospects for the Development of the Life Safety System"*. Lviv, (03.2022). Lviv, LDU BZhD. P. 114-116.

18. Nizhnyk V., **Savchenko O.**, Nekora V., Nesenyuk L. Theoretical studies on the effectiveness of fire protection systems. *XIII International Scientific and Practical Conference "Theory and Practice of Fire Extinguishing and Emergency Situations Elimination"*. Cherkasy, (04/26/2022). Cherkasy, CHIPB NUCZU. P. 28-30.

19. **Savchenko O.**, Nizhnyk V., Dobryak D., Kravchenko N. On the issues of the effectiveness of the functioning of fire protection systems. Current problems of fire safety and prevention of emergency situations in today's conditions. *Collection of scientific papers of the All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation*. Lviv, LDUBZHD, 2022. P. 227-229.

20. **Savchenko O.**, Dobryak D., Kravchenko N., Lutsenko V., Nizhnyk V. Methodology of theoretical research to determine the coefficients of probable efficiency of fire protection systems functioning. *Problems and prospects for the development of life safety systems: materials of the XVIII international scientific and practical conference of young scientists, cadets and students*. Lviv, (March 30-31, 2023). Lviv, LDUBZHD, 2023. P. 156-158.

21. **Savchenko O.**, Nesenyuk L., Onoshko A. Nizhnyk V. Program and methodology of experimental research on the impact of fire protection systems on individual fire risk. *Materials of the international scientific and practical conference of young scientists "Problems and prospects of providing civil protection"*. Kharkiv, NUCZU, 2024. P. 97.

22. **Savchenko O.**, Nizhnyk V. Improving approaches to managing individual fire risk based on the effectiveness of fire protection systems. *Materials of the III All-*

Ukrainian Scientific and Practical Conference “Actual Problems of Ensuring State Security”. Kyiv, Kyiv Institute of the National Guard of Ukraine, 2025. P. 444-445.

23. V. Nizhnyk, Yu. Feshchuk, O. Zhykharev, A. Tsygankov, **O. Savchenko** Assessment of the operational situation of the territory of the exclusion zone. *XII International Scientific and Practical Conference “Theory and Practice of Fire Fighting and Emergency Situations Elimination”*. CHIPB NUCZU, 2021. P. 44-46.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	29
ВСТУП.....	30
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА ВЕЛИЧИНУ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ПОЖЕЖНОГО РИЗИКУ	41
1.1 Статистичні дані про пожежі щодо ефективності спрацювання систем протипожежного захисту	41
1.2 Види систем протипожежного захисту	46
1.3 Аналіз літературних джерел щодо ефективності функціонування систем протипожежного захисту	53
1.4 Методи оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту	73
1.5 Висновки до розділу 1.....	94
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА ІНДИВІДУАЛЬНИЙ ПОЖЕЖНИЙ РИЗИК	97
2.1 Критерії для дослідження впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику	97
2.2 Математична модель для дослідження закономірності впливу ефективності функціонування систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик	107
2.2.1 Імовірісно-статистична математична модель	107
2.2.2 Польова математична модель	109
2.3 Методика теоретичних досліджень обґрунтування ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик	123
2.4 Узагальнення теоретичного алгоритму дослідження впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик	129
2.5 Висновки до розділу 2	131

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА ІНДИВІДУАЛЬНИЙ ПОЖЕЖНИЙ РИЗИК	133
3.1 Моделювання процесу поширення небезпечних чинників пожеж залежно від функціонування систем протипожежного захисту із використанням польових методів	133
3.2 Дослідження впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик на основі імовірістно-статистичних методів	153
3.3 Проведення повнофакторного експерименту	168
3.4 Висновки до розділу 3	171
РОЗДІЛ 4. ВЕРИФІКАЦІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ВПЛИВУ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА ІНДИВІДУАЛЬНИЙ ПОЖЕЖНИЙ РИЗИК	172
4.1 Програма та методика експериментальних досліджень.....	172
4.2 Результати експериментальних досліджень	184
4.3 Висновки до розділу 4	190
РОЗДІЛ 5. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ПОЖЕЖНОГО РИЗИКУ	192
5.1 Зміна № 1 до ДСТУ 8828:2019 «Пожежна безпека. Загальні положення»	192
5.2 Розроблення алгоритму обґрунтування оснащеності об'єкту відповідною системою протипожежного захисту на основі управління пожежним ризиком	197
5.3 Висновки до розділу 5.....	199
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	200
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	202
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	224
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	229

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ПОЗНАЧЕНЬ ТА ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ

СПЗ – система протипожежного захисту;

ПС – пожежна сигналізація;

СПС – система пожежної сигналізації;

АСПГ – автоматична система пожежогасіння;

СО – система оповіщення;

СПДЗ – система протидимного захисту;

ЗПВ – система зовнішнього протипожежного водопостачання;

ВПВ – система внутрішнього протипожежного водопостачання;

ПРП – пожежно-рятувальний підрозділ;

ІПР – індивідуальний пожежний ризик;

РПРП -ризик для пожежно-рятувальних підрозділів;

$P(t)$ – імовірність безвідмовної роботи;

T_y – гамма-відсотковий наробіток до відмови;

T_{cp} – середнє напрацювання до відмови;

T_Q – середнє напрацювання на відмову

T_{py} – гамма-відсотковий ресурс;

T_p – середній ресурс;

$T_{слу}$ – гамма-відсотковий термін служби;

$\lambda(t)$ – інтенсивність відмов;

$\omega(t)$ – параметр потоку відмов;

$\varpi(t)$ – опосередкований параметр потоку відмов.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження

Щороку в Україні реєструється близько 90 тис. пожеж. На таких пожежах гине близько 2 тис. людей, у тому числі близько 100 дітей. Щорічно матеріальні втрати від пожеж складають більше 10 млрд грн. Щодня пожежі знищують або пошкоджують близько 70 будівель і споруд. За останні десять років в середньому загибель людей на пожежах по Україні перевищує показник таких країн, як Великобританії, Італії, Франції та Польщі разом взятих.

Якщо зіставити статистичні дані щодо загиблих унаслідок пожеж із загальною чисельністю населення, можна визначити індивідуальний пожежний ризик, який становить приблизно $3,3 \cdot 10^{-5}$, що перевищує допустимий рівень [1].

Одним із технічних засобів зменшення пожежного ризику є оснащення об'єктів системами протипожежного захисту. Такі системи впливають на рівень пожежного ризику як окремо, так і через їхню взаємодію. Це підтверджується даними статистичних досліджень пожеж та наслідків, що з них випливають.

На сучасному етапі врахування впливу систем протипожежного захисту під час оцінювання параметрів пожежного ризику та інших показників пожежної небезпеки об'єктів здійснюється лише частково:

- у ДСТУ 8828:2019 *Пожежна безпека. Загальні положення* [2] вплив систем протипожежного захисту на величину індивідуального пожежного ризику враховується через коефіцієнт ймовірності ефективного спрацювання цих систем. Значення коефіцієнта визначається на підставі технічної документації щодо вірогідності безвідмовної роботи систем. У разі відсутності таких даних допускається приймати ймовірність ефективного спрацювання кожної системи рівною 0,5. Однак аналіз існуючих технічних документацій показав, що параметр часто не визначено, а значення «0,5» обирається експертним шляхом без належного наукового обґрунтування і не враховує специфіку функціонування кожної окремої системи;

- у ДСТУ 9058:2020 *Пожежна безпека. Визначення протипожежних відстаней між об'єктами розрахунковими методами. Основні положення*

передбачено можливість зменшення розрахункової пожежної навантаги за рахунок дії систем протипожежного захисту, таких як пожежна сигналізація, системи автоматичного пожежогасіння, пожежні кран-комплекти внутрішнього протипожежного водопроводу тощо. При цьому, якщо системи наявні, коефіцієнт приймається рівним 1 (тобто вплив не враховується), а у разі їх відсутності – 1,5, що фактично призводить не до зменшення пожежної навантаги, а до її збільшення.

За підсумками аналізу літературних джерел та нормативних документів можна констатувати, що на сьогодні вплив систем протипожежного захисту на величину пожежного ризику досліджено не повністю. Зокрема, відсутнє належне наукове обґрунтування та системне вивчення закономірностей впливу ефективного спрацювання таких систем на наслідки пожеж. Це обумовлює актуальність подальших досліджень у зазначеному напрямку, що є необхідною передумовою для удосконалення методів оцінювання індивідуального пожежного ризику.

У результаті сучасна практика застосування систем протипожежного захисту як засобу забезпечення пожежної безпеки об'єктів визнається ефективним рішенням і регламентується низкою нормативних документів. Водночас при оцінюванні індивідуального пожежного ризику їхня ефективність враховується опосередковано і фактично не дозволяє відобразити специфіку конкретного виду системи або випадки одночасного функціонування кількох систем.

Таким чином, стан досліджуваного питання характеризується певними протиріччями:

- на практиці:

- а) з одного боку, об'єкти оснащуються системами протипожежного захисту, що є ефективним заходом забезпечення пожежної безпеки;

- б) з іншого боку, під час оцінювання індивідуального пожежного ризику ефективність дії цих систем не враховується;

- в теорії:

- а) з одного боку, існує підґрунтя для математичного моделювання впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик;

б) з іншого боку, відсутні науково обґрунтовані закономірності впливу цих систем на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику.

Дослідженням ймовірності ефективного спрацювання різних інженерних систем та їхніх компонентів, зокрема систем протипожежного захисту, займалися такі вчені, як Cungh Z., Avizienis A., Garter W., Nerber P. Вони аналізували процеси відмов та ефективності роботи на основі теорії ймовірності. Проте їхні дослідження не охоплюють специфічні аспекти ефективності спрацювання систем протипожежного захисту.

Оцінювання процесів і методів визначення пожежних ризиків досліджували Ніжник В., Сізіков О.О., Дунюшкін В., Бегун В. Водночас у цих роботах не розглянуто вплив систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику.

На сьогодні для оцінювання ефективності технічних систем широко застосовуються методи теорії ймовірності. У європейських країнах ці підходи розвинулися до практики поділу системи на елементарні компоненти з їх подальшою оцінкою та прогнозуванням ефективності функціонування всієї технічної системи в цілому.

Таким чином, дослідження впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику є актуальним науковим завданням. Розв'язання цієї задачі дозволить удосконалити методи оцінювання індивідуального пожежного ризику. При цьому доцільним є застосування підходів, заснованих на теорії ймовірності, із використанням статистичних даних.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконана в рамках Програми робіт з національної стандартизації на 2022 рік затвердженої наказом ДП «УкрНДНЦ» від 04 квітня 2022 року № 56, 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, плану наукової та науково-технічної діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій та в продовження науково-дослідної роботи: «Обґрунтування впливу систем протипожежного захисту під час реалізації ризик-орієнтовного підходу у

профілактичній діяльності підрозділів ДСНС України» (державний реєстраційний № 0121U112066).

Метою роботи є виявлення закономірності впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику як наукового підґрунтя для удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан щодо впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику;
2. Обґрунтувати критерії впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику;
3. Обґрунтувати математичні моделі для дослідження закономірності впливу ефективності функціонування систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику та здійснити їх перевірку;
4. Обґрунтувати вплив систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику;
5. Дослідити закономірності впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику;
6. Розробити пропозиції щодо удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику.

Об’єкт дослідження – функціонування систем протипожежного захисту в умовах пожежі.

Предмет дослідження – вплив ефективності спрацювання систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику.

Методи дослідження У роботі здійснено комплексний аналіз і узагальнення попередніх досліджень щодо оцінювання пожежних ризиків; проведено математичне моделювання процесів поширення пожежі та її небезпечних факторів із застосуванням систем диференціальних рівнянь Нав’є-Стокса для неперервних середовищ; використано методи кінцевих різниць за схемою «предиктор-коректор»

та методи кінцевих об'ємів для розв'язання диференціальних рівнянь. Застосовано метод наявності викидів та квазівикидів у результатах досліджень (метод Грабса); метод перевірки належності дисперсій результатів до однієї генеральної сукупності (метод Фішера); метод Брукса; дихотомічний метод для обґрунтування розміру розрахункової сітки комп'ютерних моделей. Для визначення ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту використано методи теорії ймовірності та математичної статистики. Крім того, застосовано метод оцінювання індивідуального пожежного ризику відповідно до ДСТУ 8828, загальний метод оцінювання ризиків, а також метод експериментальних досліджень згідно з розробленою програмою та методикою експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розкритті закономірностей впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику як наукового підґрунтя для удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику. За цих обставин отримано такі нові наукові дані.

Вперше: встановлено, що значення ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту становлять для систем пожежної сигналізації та оповіщення про пожежу – 0,61, для системи автоматичного пожежогасіння – 0,87, для систем протидимного захисту, внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопроводу – 0,5;

встановлено залежність величини індивідуального пожежного ризику від ймовірності спрацювання систем протипожежного захисту, яка дозволяє врахувати наявність систем пожежної сигналізації, автоматичних систем пожежогасіння та систем протидимного захисту, як у спільній дії так і індивідуально.

Удосконалено:

- метод оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту.

Набуло подальшого розвитку:

- застосування даних про системи протипожежного захисту під час проведення інженерних розрахунків щодо оцінки рівня пожежної безпеки об'єктів.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність полягає у застосуванні результатів роботи під час оцінюванні рівня пожежної безпеки об'єктів та індивідуального пожежного ризику, що дасть змогу оцінювати необхідність оснащення об'єктів будівництва відповідними системами протипожежного захисту, чим забезпечити баланс між достатнім рівнем пожежної безпеки та мінімальними витратами на проектування та будівництва відповідних систем протипожежного захисту.

Отримані в ході дослідження результати знайшли практичне застосування (додаток Б) у діяльності Міністерства розвитку громад та територій України, базової організації Міністерства розвитку громад та територій України – «Українського союзу пожежної та техногенної безпеки», а також у роботі ТОВ «Флагман систем безпеки», зокрема під час використання запропонованого підходу до оцінювання індивідуального пожежного ризику для об'єктів будівництва. Крім того, напрацювання дисертації інтегровані в освітній процес кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки Національного університету цивільного захисту України. Практична реалізація результатів дослідження також забезпечена шляхом внесення зміни № 1 до національного стандарту ДСТУ 8828:2019 «Пожежна безпека. Основні положення».

Результати дисертаційної роботи можливо та доцільно використовувати під час розроблення розділу «Пожежна безпека» проекту будинків в частині Планувальних рішень пов'язаних із шляхами евакуації та систем протипожежного захисту.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень та отриманих висновків підтверджується результатами аналітичного опрацювання наукових джерел у відповідній сфері; узгодженістю застосованих методів дослідження з визначеними цілями та завданнями роботи; повнотою отриманих експериментальних даних, зібраних за допомогою метрологічно каліброваних

засобів вимірювальної техніки; високим рівнем відповідності результатів теоретичних досліджень результатам експерименту, а також їхньою апробацією та практичним впровадженням.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні мети й завдань дослідження, аналізі літературних джерел, вивчення впливів систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику, розробленні математичних моделей та проведення розрахунків і моделювання із використанням цих моделей, організації та проведенні натурних експериментів, а також аналізі отриманих даних експериментальних та розрахункових досліджень. Результати роботи впроваджені дисертантом особисто із дотриманням академічної доброчесності.

Особистий внесок здобувача у публікаціях, де містяться отримані результати наукових досліджень за участі співавторів, указано нижче:

- у публікації [193] Систематизація процесу управління пожежною безпекою об'єкта захисту *Науковий збірник «Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека»*. № 2 (8). Київ, 2019. С. 41-49 здобувачка здійснила узагальнення наукових підходів до побудови системи управління пожежною безпекою та взяла участь у розробленні структурної моделі процесу управління, забезпечивши формування логічної послідовності етапів оцінювання, планування та реалізації заходів пожежної безпеки;

- у публікації [28] Вимоги пожежної безпеки до висотних громадських будівель з умовною висотою від 100 м до 150 м *Науковий збірник «Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека»*, № 2 (12). Київ, 2021. С. 30-42 здобувачка здійснила аналіз існуючих нормативних вимог пожежної безпеки для висотних будівель, систематизувала основні критерії забезпечення безпеки та запропонувала рекомендації щодо їх практичного застосування при проєктуванні та експлуатації таких об'єктів;

- у публікації [176] Методи оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. № 2 (14). Київ, 2022. С. 134-142 здобувачка здійснила систематизувала методи

оцінювання ефективності систем протипожежного захисту, провела порівняльну оцінку їхніх показників та окреслила шляхи підвищення надійності і безпеки об'єктів у разі пожежі;

- у публікації [177] Теоретичні підходи для дослідження закономірності впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗУ «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Том 7 № 1. Черкаси, 2023. С. 67-76 здобувачка здійснила класифікацію існуючих методів оцінки впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик, визначила ключові закономірності залежності рівня ризику від параметрів систем та сформулювала на їх основі рекомендації для практичного використання у проєктуванні систем безпеки;

- у публікації [197] Удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту. *Збірник наукових праць «Пожежна безпека»*. Том 47. Львів, 2025. С. 96–102 здобувачка здійснила розробила вдосконалений метод оцінки індивідуального пожежного ризику, враховуючи вплив параметрів систем протипожежного захисту, провела його апробацію на прикладі різних типів об'єктів та окреслила рекомендації щодо підвищення точності та ефективності оцінювання;

- у публікації [192] Дослідження впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик. *Збірник наукових праць «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. № 2(42), Черкаси, 2025. С.285-294 здобувачка здійснила провела експериментальні дослідження для оцінки впливу різних систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику, опрацювала та інтерпретувала отримані дані, визначила закономірності зміни ризику залежно від параметрів систем та окреслила практичні рекомендації для підвищення безпеки об'єктів;

- у публікації [128] Аналіз сучасного стану технічного обслуговування систем протипожежного захисту. *Науковий збірник «Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека»*. №2 (20). Київ, 2025. С. 116-123 здобувачка провела аналіз стану технічного обслуговування систем протипожежного захисту на сучасних об'єктах,

ідентифікувала ключові проблеми та недоліки, визначила закономірності впливу обслуговування на ефективність систем і окреслила рекомендації щодо підвищення надійності та безпеки об'єктів;

- у публікації [181] Дослідження впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику. The scientific heritage. № 109. Budapest (Hungary), 2023. Р. 64-70 здобувачка провела дослідження впливу різних систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику, опрацювала отримані результати, визначила закономірності зміни ризику залежно від характеристик систем та сформулювала практичні рекомендації для підвищення безпеки людей у будівлях.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дослідження представлені на таких науково-практичних конференціях:

1. **Савченко О.,** Козелло Н., Сізіков О., Ніжник В., Балло Я. Удосконалення протипожежного захисту об'єктів шляхом обґрунтування загальних положень системи управління пожежною безпекою. *Міжнародна науково-практична конференція «Пріоритетні напрями досліджень в науковій та освітній діяльності»*. Львів, (5-6.12.2019). Львівський науковий форум, 2019. С. 45-47. *Здобувачці особисто належить розробка концептуальних положень системи управління пожежною безпекою, формулювання основних принципів її впровадження та обґрунтування заходів підвищення ефективності протипожежного захисту об'єктів.*

2. **Савченко О.,** Ніжник В., Одинець А., Несенюк Л. Аналіз статистичних даних про пожежі щодо ефективності спрацювання систем протипожежного захисту. *XI Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси, (28-29.10. 2021 року). Черкаси, ЧПБ НУЦЗУ. С. 52-53. *Здобувачці особисто належить опрацювання та узагальнення статистичних даних про пожежі, оцінка ефективності спрацювання систем протипожежного захисту та визначення ключових тенденцій і закономірностей їх функціонування у реальних умовах.*

3. **Савченко О.,** Добряк Д., Ніжник В. Роль систем протипожежного захисту під час оцінювання індивідуального пожежного ризику. *XVII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів, (04.2022 року). Львів, ЛДУ БЖД. С. 114-116. *Здобувачі особисто належить оцінка впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику, виокремлення ключових факторів, що впливають на безпеку людей, та формулювання практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності протипожежного захисту*

4. Ніжник В., **Савченко О.,** Некора В., Несенюк Л. Теоретичні дослідження щодо ефективності функціонування систем протипожежного захисту. *XIII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси, (26.03. 2022 року). Черкаси, ЧПБ НУЦЗУ. С. 28-30. *Здобувачі особисто належить розробка теоретичних підходів до оцінки ефективності систем протипожежного захисту, визначення ключових факторів, що впливають на їх функціонування, та формулювання висновків щодо підвищення надійності і безпеки об'єктів.*

5. **Савченко О.,** Ніжник В., Добряк Д., Кравченко Н. До питань ефективності функціонування систем протипожежного захисту. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: Зб. наук. праць Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Львів, ЛДУБЖД, 2022. С. 227-229. *Здобувачі особисто належить оцінка ефективності функціонування систем протипожежного захисту, виділення ключових факторів, що впливають на їхню надійність, та формулювання рекомендацій щодо підвищення безпеки об'єктів у надзвичайних ситуаціях.*

6. **Савченко О.,** Добряк Д., Кравченко Н., Луценко Ю., Ніжник В. Методика теоретичних досліджень з визначення коефіцієнтів ймовірної ефективності функціонування систем протипожежного захисту. *Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності: матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів*. Львів, (30-31

березня 2023). Львів, ЛДУБЖД, 2023. С. 156-158. *Здобувачці особисто належить розробка методики визначення коефіцієнтів ймовірної ефективності систем протипожежного захисту, проведення теоретичних досліджень та формулювання висновків щодо підвищення надійності і безпеки об'єктів.*

7. **Савченко О.,** Несенюк Л., Оношко І., Ніжник В. Програма та методика експериментальних досліджень впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту».* Харків, НУЦЗУ, 2024. С. 97. *Здобувачці особисто належить розробка програми та методики експериментальних досліджень, проведення апробації методики на прикладі різних об'єктів та визначення закономірностей впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику.*

8. Савченко О., Ніжник В. Удосконалення підходів до управління індивідуальним пожежним ризиком на основі ефективності систем протипожежного захисту. *Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми забезпечення державної безпеки».* Київський інститут національної гвардії України, Київ, 2025. С. 444-445. *Здобувачці особисто належить розробка удосконалених підходів до управління індивідуальним пожежним ризиком, оцінка ефективності систем протипожежного захисту та формулювання рекомендацій щодо підвищення безпеки об'єктів.*

Кількість публікацій за темою дисертаційної роботи. Основні положення дисертаційних досліджень опубліковано в 14 статтях, 7 з яких надруковано в фахових наукових журналах України, 1 стаття надрукована в міжнародному виданні та 5 в інших виданнях. Також результати досліджень висвітлено в 9 тезах доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях, одна із яких у науково-метричній базі Scopus.

Структура дисертації та її обсяг. Робота містить анотацію, зміст, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел, що складає 197 найменування і додатки. Обсяг дисертації складає 234 сторінки, 27 таблиць, 37 рисунків та 2 додатки.

РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА ВЕЛИЧИНУ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ПОЖЕЖНОГО РИЗИКУ

У цьому розділі представлені результати щодо розв'язання першого завдання дослідження, а саме аналізу сучасного стану щодо впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику.

1.1 Статистичні дані про пожежі щодо ефективності спрацювання систем протипожежного захисту

Рівень пожежної безпеки характеризується відносними показниками, зокрема кількістю загиблих унаслідок пожеж у розрахунку на 1 тис. населення [4, 5]. У розвинених державах із відносно високою щільністю населення протягом року фіксується від двох до п'яти випадків загибелі людей на пожежах на кожну тисячу жителів. Водночас у багатьох країнах світу щорічні економічні втрати від пожеж становлять до 1 % валового національного продукту, що означає, що приблизно три робочі дні на рік економіка цих держав фактично спрямована на компенсацію наслідків пожеж.

Порівняння статистичних даних щодо кількості загиблих унаслідок пожеж із чисельністю населення України [6] дає змогу, із застосуванням методичних підходів, викладених у роботах [7, 8], визначити середній індивідуальний пожежний ризик, який становить $3,3 \cdot 10^{-5}$. Отримане значення перевищує допустимі рівні, встановлені нормативними документами [1, 2], що свідчить про його неприйнятність з точки зору забезпечення належного рівня безпеки людей в умовах пожежі.

Протягом останніх років в Україні щорічно реєструється близько 90 тис. пожеж, унаслідок яких гине приблизно 2 тис. осіб, у тому числі близько 100 дітей. Сукупні матеріальні збитки від пожеж перевищують 10 млрд грн на рік. У середньому щоденно знищується або зазнає пошкоджень близько 70 будівель і споруд. За останні десять років показники загибелі людей на пожежах в Україні в

середньому перевищують аналогічні значення для Великобританії, Італії, Франції та Польщі разом узятих [9–11].

У зв'язку з цим дослідження проблем пожежної безпеки на державному рівні повинні розглядатися як пріоритетний напрям, а особлива увага має приділятися розробленню та впровадженню превентивних заходів, зокрема прийняттю обґрунтованих інженерних рішень, що створюють передумови для підвищення пожежної безпеки будівельних об'єктів як у загальнодержавному, так і в локальному вимірах [2].

Аналіз статистичних даних щодо виникнення пожеж в Україні [5] свідчить, що близько 50 % їх загальної кількості припадає на споруди. У таблиці 1.1 наведено узагальнені дані щодо наслідків пожеж у спорудах за період 2020–2024 років.

З аналізу даних таблиці 1.1 випливає, що кількість пожеж має стійку тенденцію до зростання, що в цілому вказує на незадовільний рівень пожежної безпеки в державі.

Таблиця 1.1 – Дані про пожежі в спорудах за період з 2020 по 2024 рік

Показник	2020	2021	2022	2023	2024	Середнє значення
Кількість пожеж	101279	79457	80654	67934	105214	86908
Загинуло осіб	1728	1853	1639	1468	1521	1642
У тому числі дітей	46	35	36	40	53	42
Збитки прямі, тис. грн.	2631982	3181197	39231129	23242049	24633864	18584044

За результатами аналізу статистичних даних за об'єктами виникнення пожеж встановлено, що приблизно 40 % усіх пожеж припадає на споруди, з яких близько 25 % становлять об'єкти, зведені з використанням дерев'яних конструкцій. На відкриті території припадає орієнтовно 51 % пожеж, на транспортні засоби – близько 5 %. Частка пожеж на інших об'єктах, не включених до зазначених

категорій, становить приблизно 4 % від загальної кількості. Розподіл кількості пожеж за об'єктами їх виникнення наведено на рисунку 1.1.

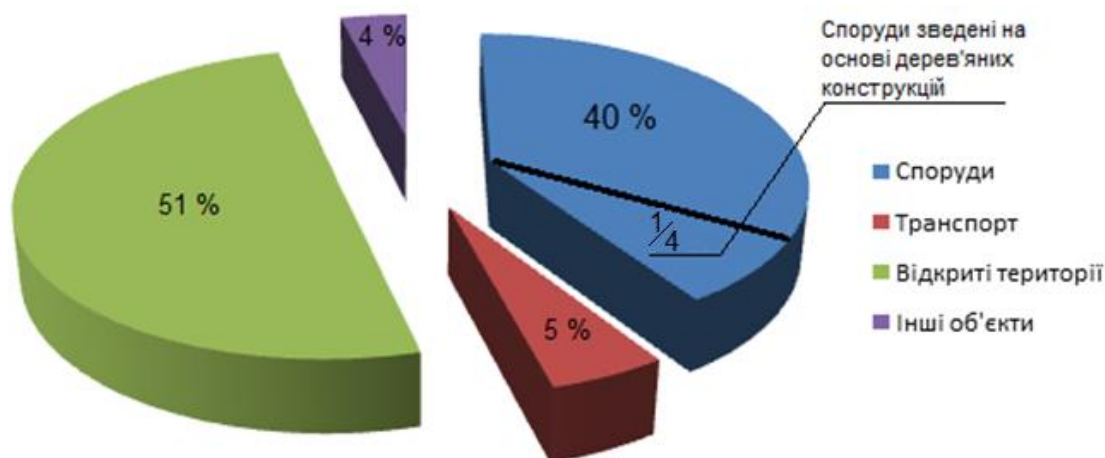


Рисунок 1.1 – Розподіл пожеж за об'єктами їх виникнення

Ранжування кількості пожеж і прямих збитків, завданих ними, по спорудах різного призначення за відносними показниками наведено на рисунку 1.2 [5].

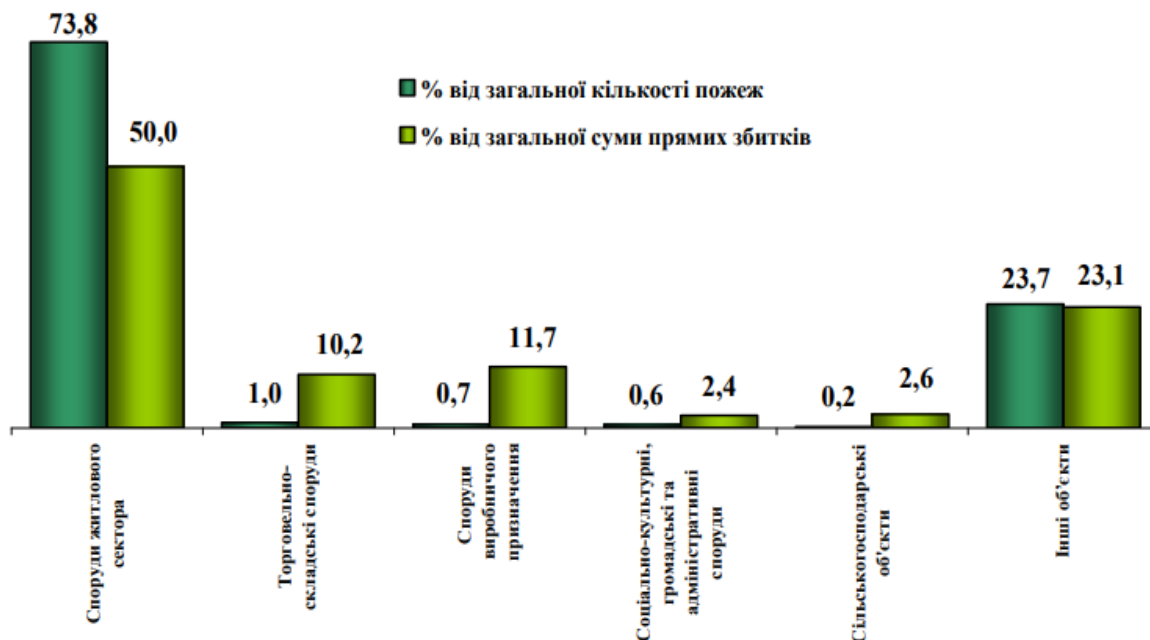


Рисунок 1.2 – Відносні показники кількості пожеж та прямих збитків на спорудах різного призначення

З аналізу рисунка 1.2 випливає, що найбільша частка як пожеж, так і матеріальних збитків припадає на споруди житлового сектору, у яких постійно перебувають люди.

Одним із комплексів пожежної безпеки, який попереджає створенню умов, за яких можливе виникнення горіння, а також забезпечує умови локалізації та ліквідації пожежі є комплекс протипожежного захисту [2].

Станом на 2024 рік в Україні загальна кількість об'єктів, які необхідно обладнати системами протипожежного захисту становить 416 148 тисяч [12].

Всього обладнано 390 112, що складає 93,7 % від необхідної кількості. Із них 56 075 виробили свій ресурс та підлягають заміні (14,4%) [13].

Пожежі на об'єктах, які не обладнані системами протипожежного захисту, або на яких такі системи експлуатуються в несправному стані набувають великого поширення та супроводжуються значними збитками, травмуванням і гибеллю людей. Разом з цим пожежі на об'єктах оснащених системами протипожежного захисту швидко виявляються, здійснюється оперативне повідомлення про них та гасяться автоматичними системами пожежогасіння. Наведено деякі приклади таких пожеж.

13 січня 2019 року в м. Дніпро по вул. Шолом Алейхема виникла пожежа у будинку ТОВ «МЕНОР ЛТД» осередком пожежі стало приміщення електричної щитової. Будинок об'єкту був обладнаний системою пожежної сигналізації, системою протидимного захисту, а також системою централізованого пожежного спостереження. Всі системи за результатом виникнення пожежі успішно спрацювали та виконали свої функції. Зокрема, пожежа виявлена на ранній стадії. Система протидимного захисту видалила небезпечні чинники пожежі та забезпечила безпечну евакуацію людей, за результатами пожежі люди не постраждали. Крім того, на момент прибуття пожежних підрозділів сильного задимлення приміщень не виявлено. Вчасне повідомлення пожежного підрозділу про пожежу за рахунок системи централізованого пожежного спостереження забезпечило швидке прибуття пожежних підрозділів та ліквідацію пожежі на її ранній стадії, за рахунок чого, пожежею не нанесено значних матеріальних збитків об'єкту.

22 січня 2019 року в м. Харків по вул. Дружби Народів в будинку підвищеної поверховості (16 поверхів) відбулася пожежа, як наслідок короткого замкнення в електричній мережі у приміщенні електричної щитової. Будинок обладнаний системою протипожежної сигналізації та системою протидимного захисту, які на момент виникнення пожежі перебували у не справному стані та як наслідок не виконали своїх функцій. Пожежа та її небезпечні чинники поширилися по всьому об'єму будинку. За результатами такої пожежі небезпечними чинниками травмовано 1 людину, а матеріальні втрати від пожежі склали близько 1 млн. грн.

17 жовтня 2019 року в м. Києві проспект Тичини, 16/2 виникла пожежа в багатоповерховому будинку (16 поверхів) в наслідок потрапляння малокалорійного джерела запалювання (недопалок) на горючий матеріал балконного приміщення. Будинок оснащений системою пожежної сигналізації та системою протидимного захисту, які на момент виникнення пожежі перебували у не справному стані та як наслідок не виконали своїх функцій. Пожежа та її небезпечні чинники поширилися по всьому об'єму квартири житлового будинку. За результатами такої пожежі 1 людина загинула, а матеріальні втрати від пожежі склали близько 5 млн. грн.

Згідно зі статистичними даними, протягом 2021 року пожежі були зафіксовані на 230 об'єктах, обладнаних системами протипожежного захисту. При цьому зафіксовано випадки неефективного спрацювання окремих систем, зокрема: автоматичних систем пожежогасіння – у 9 випадках; систем пожежної сигналізації – у 47 випадках; систем оповіщення та управління евакуацією людей – у 12 випадках; систем протидимного захисту – у 5 випадках.

В роботах зарубіжних вчених [14-19] показано ефективність та способи використання статистичних даних, аналітичних звітів та інших статистичних матеріалів, як інструменту оцінювання та ідентифікації ризиків, що є передумовою для подальшого процесу організації управління ризиком.

Отже, одним із технічних заходів, спрямованих на зниження пожежних ризиків, є оснащення об'єктів системами протипожежного захисту. Такі системи впливають на рівень пожежного ризику як окремо, так і в сукупній взаємодії, що підтверджується результатами статистичних досліджень пожеж та їх наслідків.

Водночас слід зазначити, що на сучасному етапі процеси впливу систем протипожежного захисту на величину пожежного ризику вивчені недостатньо. Зокрема, ймовірність ефективного спрацювання систем протипожежного захисту та їх вплив на рівень пожежного ризику не мають належного наукового обґрунтування, що зумовлює актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

1.2 Види систем протипожежного захисту

Пожежна безпека об'єктів відповідно до розробленої структури її забезпечення формується трьома взаємопов'язаними складовими: системою запобігання виникненню пожеж; комплексом протипожежного захисту; системою управління пожежною безпекою об'єкта [2].

Системи протипожежного захисту є складовим елементом комплексу протипожежного захисту та відіграють ключову роль у запобіганні виникненню пожеж, а також у їх локалізації та ліквідації у разі виникнення. Вони являють собою сукупність технічних засобів, змонтованих на об'єкті та призначених для автоматичного виявлення пожежі, її локалізації й гасіння без безпосереднього втручання людини, а також для захисту людей, матеріальних цінностей і навколишнього середовища від дії небезпечних факторів пожежі. Структурну схему комплексу протипожежного захисту наведено на рисунку 1.3 [20].

Таким чином, системи протипожежного захисту є технічним елементом, здатним знижувати рівень пожежних ризиків [21–26]. Крім того, у роботі [27] продемонстровано ефективність застосування таких систем під час оцінювання пожежних ризиків в екологічних системах, а в дослідженні [28] обґрунтовано їхню ключову та безальтернативну роль у процесі проєктування і будівництва висотних громадських будівель із умовною висотою від 100 до 150 м.

Вимоги до складових систем протипожежного захисту встановлюються Державними будівельними нормами [29] та відповідними національними стандартами [30-39].



Рисунок 1.3 – Структурна схема комплексу протипожежного захисту

Основними принципами функціонування систем протипожежного захисту є, по-перше, запобігання виникненню пожежі, що досягається шляхом недопущення формування горючого середовища та/або усунення можливості появи чи внесення до нього джерел запалювання, і, по-друге, забезпечення максимально оперативного реагування на пожежу у разі її виникнення. Останнє передбачає своєчасне виявлення осередку пожежі, оповіщення людей та організацію їх безпечної евакуації визначеними

евакуаційними шляхами, нейтралізацію небезпечних факторів пожежі або обмеження їх поширення в межах приміщення чи об'єму, в якому сталася пожежа, безпосереднє гасіння пожежі, а також передачу повідомлення до пожежно-рятувальних підрозділів.

До систем протипожежного захисту, що забезпечують реалізацію зазначених функцій, належать:

- системи пожежної сигналізації;
- автоматичні системи пожежогасіння;
- автоматичні системи пожежогасіння;
- системи керування евакуюванням (в частині систем оповіщення про пожежу і показників напрямку евакуювання);
- системи протидимного захисту;
- системи централізованого пожежного спостерігання;
- системи диспетчеризації СПЗ;
- системи флегматизації.

Інженерні системи та технологічне обладнання, які не входять до складу систем протипожежного захисту, але з системами протипожежного захисту функціонально пов'язані:

- блискавкозахист;
- пожежні ліфти;
- пожежні кран-комплекти;
- протипожежні двері, ворота та завіси (екрани) тощо.

Основним призначенням системи пожежної сигналізації є своєчасне виявлення пожежі та формування сигналу тривоги з метою ініціювання комплексу необхідних заходів, зокрема організації евакуації людей, виклику пожежно-рятувальних підрозділів, автоматичного запуску систем протидимного захисту й автоматичних систем пожежогасіння, керування протипожежними клапанами, дверима, воротами та завісами (екранами), а також відключення, блокування або розблокування інших інженерних систем і обладнання у разі подання сигналу «пожежа».

Системи пожежної сигналізації поділяються залежно від виду чутливого пристрою пожежного сповіщувача на основі якого вона побудована, який реагує на

відповідний небезпечний чинник пожежі, а саме: теплові, димові, полум'яні, комбінованої дії [30, 31].

Основним призначенням автоматичної системи пожежогасіння є виявлення ознак горіння, формування сигналу про пожежу та подавання вогнегасної речовини в осередок загоряння без безпосереднього втручання людини [35–38, 40].

Автоматичні системи пожежогасіння класифікуються за конструктивним виконанням, характером впливу на осередок пожежі або способом гасіння, способом пуску, а також за видами вогнегасних речовин [35–38, 40].

Системи протидимного захисту являють собою комплекс технічних засобів і пристроїв (системи димо- та тепловидалення, припливу і підпору повітря, засоби керування та запуску), призначених для формування бездимного шару нижче стабільного шару диму шляхом видалення диму, димових газів, летких продуктів згоряння та нагрітого повітря з приміщень, будівель і споруд, а також із шляхів евакуації у разі пожежі.

Застосування систем протидимного захисту спрямоване на досягнення однієї або кількох таких цілей: забезпечення умов для безпечної евакуації людей; створення умов для гасіння пожежі та виконання пожежно-рятувальних робіт; зниження ймовірності займання предметів, обладнання, речовин і матеріалів під впливом теплового випромінювання; обмеження впливу високих температур на будівельні конструкції під час пожежі; зменшення матеріальних збитків, спричинених продуктами термічного розкладу та гарячими газами [32, 33].

Системою, що безпосередньо забезпечує безпеку людей у будівлях і спорудах під час пожежі, є система оповіщення про пожежу та управління евакуацією людей. Її основною функцією є своєчасне інформування осіб, які перебувають у будівлі (споруді), про виникнення пожежі з метою створення умов для їх оперативної евакуації, а також надання інформації щодо найбільш безпечних і найкоротших шляхів виходу [41, 42].

Системи оповіщення поділяються залежно від способу оповіщення або їх комбінації: звукові, світлові, мовленнєві та комбіновані [30, 31].

Системи централізованого пожежного спостереження призначені для організації віддаленого цілодобового контролю за станом систем протипожежного захисту об'єктів.

Пожежне спостереження є невід’ємною складовою систем протипожежного захисту і забезпечує прийом сигналів пожежної тривоги та повідомлень про несправності від приймально-контрольних приладів об’єктів центром приймання тривожних сповіщень пультової організації, їх обробку, архівування та збереження. Отримані тривожні сповіщення передаються в автоматизованому режимі у єдиному протоколі та форматі до відповідних точок доступу, що забезпечує оперативне реагування пожежних підрозділів на сигнали тривоги.

Диспетчеризація та автоматизація систем протипожежного захисту дозволяють здійснювати контроль, сигналізацію та електрокерування роботою цих систем відповідно до вимог будівельних норм і правил.

Слід також відмітити, що деякі аспекти щодо функціональності різних систем протипожежного захисту, які входять до комплексу протипожежного захисту також викладені у [43] та [44].

На сьогодні у нормативних документів є деякі протиріччя, зокрема щодо термінологічного тлумачення призначення та основних функцій таких систем протипожежного захисту як система пожежної сигналізації та система оповіщення про пожежу. Зокрема, згідно із [29] та [42] такі системи є незалежними, які можуть функціонувати окремо одна від одної. А в серії стандартів ДСТУ CEN/TS 54 [30, 31, 45-69] система оповіщення є лише однією із функцій системи пожежної сигналізації. Крім того, до систем протипожежного захисту згідно з [30] віднесено системи, пов’язані з евакуацією, [45] – протипожежні системи (fire-fighting systems), а [70] – пожежні ліфти. Визначене дає підґрунтя для визначення дискусійного питання щодо еквівалентності чи ні термінів «система протипожежного захисту» та «система пожежної безпеки».

Термін «fire alarm system (installation)» в одних випадках перекладається як «система оповіщення про пожежу», в інших – «система пожежної сигналізації».

Термін «fire detection and alarm system (installation)» в одних випадках перекладається як «система пожежної сигналізації», в інших – «система пожежної сигналізації та оповіщення». Вважати «пожежною сигналізацією» лише «fire detection system» і не вважати такою «систему оповіщення про пожежу» є

некоректним, зважаючи на положення пункту 2.2 [45], згідно з яким функцією «fire detection and alarm system» є також подавання звукових (мовленнєвих) та візуальних сигналів мешканцям будівлі.

Принциповим є переклад слова «detection», який подано як «сигналізація», а не «виявлення». Для інших систем це слово перекладено як «виявлення».

Отже, аналізуючи кожен окрему систему, що входить до складу систем протипожежного захисту, з урахуванням її основного призначення та функціональних завдань, можна визначити відповідні рівні впливу цих систем на кількісну величину індивідуального пожежного ризику. На основі отриманих даних запропоновано нову структурну схему систем протипожежного захисту, яка враховує зазначені рівні впливу (рисунок 1.4) [71].

Вплив систем протипожежного захисту на кількісні значення пожежних ризиків підкреслюється також в таких роботах [72-74]. У роботі [72] продемонстровано ефективність та запропоновано оптимальний алгоритм реалізації системи протипожежного захисту з метою зменшення величини пожежного ризику під час транспортування та зберігання нафтопродуктів на нафтобазі. Дослідження [73] ілюструє роль ефективності систем протипожежного захисту у формуванні кількісного значення пожежного ризику на прикладі складських приміщень. У роботі [74] наведено приклад функціонування системи пожежної безпеки на основі технічних характеристик систем протипожежного захисту та визначено основні принципи проєктування зазначеного підходу.

У роботах [75-77] приведено приклади ефективності застосування систем протипожежного захисту під час загального забезпечення протипожежного захисту об'єктів для таких країн, як Німеччина, Нова Зеландія та Південна Африка.

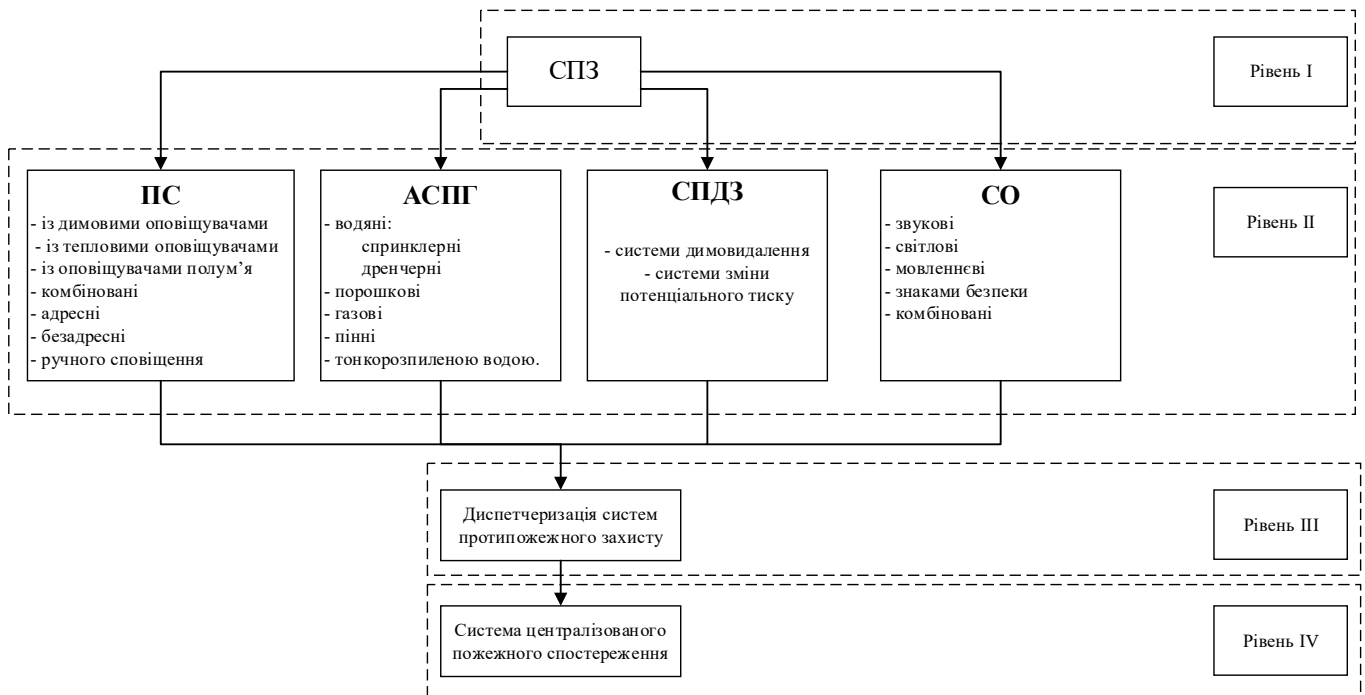


Рисунок 1.4 – Структурна схему систем протипожежного захисту із урахуванням рівнів впливу на кількісне значення індивідуального пожежного ризику

За результатами аналізу систем протипожежного захисту щодо їхніх основних функцій і завдань запропоновано вдосконалення структурної схеми цих систем. Зокрема, рекомендовано інтегрувати в схему рівні впливу окремих систем протипожежного захисту на кількісне значення індивідуального пожежного ризику, що створює перспективи для подальшого розвитку методів оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням внеску кожної окремої системи.

Слід відзначити, що існуючі методи оцінювання індивідуального пожежного ризику не забезпечують можливості кількісного врахування впливу як окремих систем, так і їхньої сумісної роботи на розрахункові параметри ризику.

Встановлено, що середня ефективність спрацювання всіх систем протипожежного захисту становить близько 50 %. При цьому система протидимного захисту, розташована в евакуаційному коридорі, збільшує час блокування шляхів евакуації під дією небезпечних чинників пожежі приблизно на 34 %.

1.3 Аналіз літературних джерел щодо ефективності функціонування систем протипожежного захисту

Основним завданням при проектуванні технічної системи є підвищення її ефективності та якості, що забезпечує поліпшення таких характеристик, як надійність, міцність, швидкодія тощо. Системи протипожежного захисту, як і інші технічні системи, підпадають під вимоги щодо ефективності їх функціонування, оцінка якої здійснюється за допомогою детерміністичних методів [78].

Існуючі підходи до визначення ефективності проєктованих систем протипожежного захисту ґрунтуються на апроксимаційних моделях, створених на основі спеціальних розділів теорії ймовірностей та математичної статистики [79, 80]. Такі моделі передбачають, що процес експлуатації визначається зовнішніми факторами та залежить від внутрішнього стану самої системи. При цьому враховується потенційна можливість відмови будь-якого компонента, що в кінцевому результаті знижує надійність системи в цілому та впливає на якість її функціонування [81, 82].

Застосування цього підходу дозволяє обґрунтовано, за кількісними критеріями, визначити оптимальну структуру системи протипожежного захисту об'єкта [83]. Забезпечення пожежної безпеки об'єкта при цьому реалізується шляхом послідовної оцінки різних альтернативних варіантів систем та їх комбінацій [84, 85], що враховує вимоги щодо рівня пожежної безпеки, показники якості функціонування та економічної доцільності системи. Такий підхід дозволяє оцінити ефективність впливу як окремих систем протипожежного захисту, так і їх комбінацій з урахуванням синергетичного ефекту спільної дії [86].

При оцінюванні ефективності функціонування систем слід орієнтуватися на критерії виконання заданих функцій відповідними системами [87, 88]. Процедура дослідження надійності технічної системи наведена у роботах [87, 88], а схема процедури оцінювання ефективності функціонування технічної системи представлена на рисунку 1.5. Використання цієї процедури дозволяє проводити комплексну оцінку ефективності роботи систем протипожежного захисту.

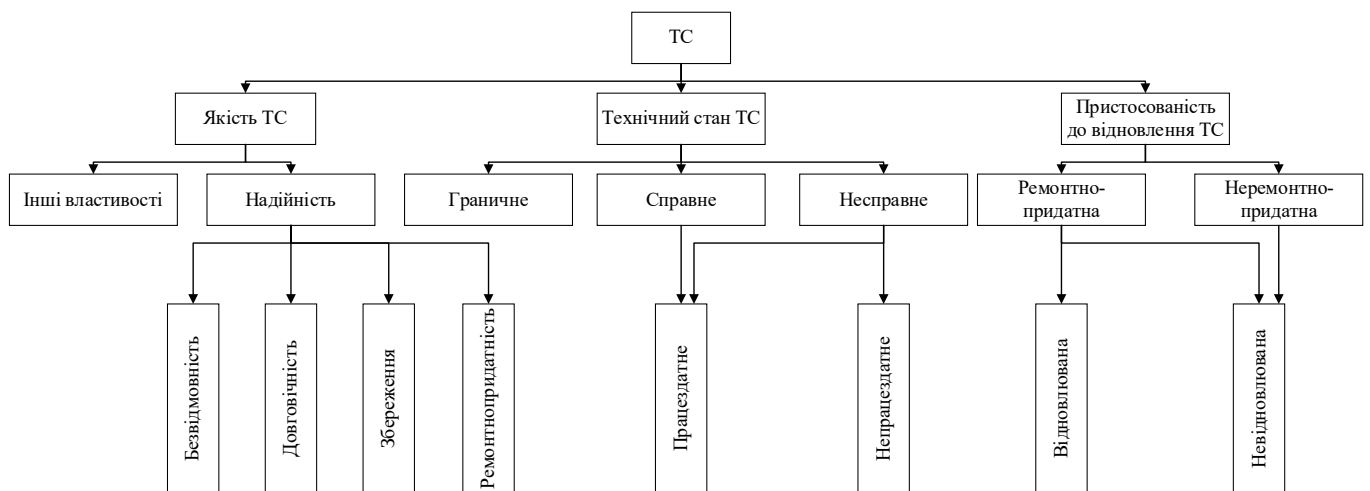


Рисунок 1.5 – Схема процедури дослідження ефективності технічної системи

У практичній діяльності розрахунок показників технічних систем здебільшого здійснюють на основі систематизованих даних.

Такі підходи до оцінювання надійності технічної системи дозволяють кількісно визначати ефективність функціонування як окремих систем протипожежного захисту, так і їхніх комбінацій, виходячи з вимог до рівня протипожежного захисту об'єкта загалом. Статистична теорія надійності є частиною більш загального підходу до розрахункової оцінки надійності технічних систем, в якому відмови розглядаються як результат взаємодії системи з рівнем протипожежного захисту об'єкта.

Методи статистичної теорії надійності ґрунтуються на оцінюванні впливу функціонування конкретної системи протипожежного захисту на наслідки пожежі для відповідних об'єктів на основі статистичних даних. Реалізація цього підходу відбувається за схемою: «система протипожежного захисту — наслідки пожежі у порівнянні з наслідками для аналогічного об'єкта без системи протипожежного захисту».

Апробація теоретично отриманих даних щодо ефективності функціонування систем протипожежного захисту, визначених за допомогою ймовірнісно-статистичних методів, може здійснюватися шляхом експериментальної експлуатації системи під контролем [89, 90] або через проведення спеціалізованих експериментальних досліджень (випробувань).

У роботі [91] наведено класифікацію показників надійності технічних систем, представлена у таблиці 1.2. Використовуючи ці показники або їх довільні комбінації, можливо проводити оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту.

Таблиця 1.2 – Класифікація показників надійності за властивостями виробів, що характеризує надійність

Властивості, що характеризують надійність	Найменування показника	Позначення
Безвідмовність	Імовірність безвідмовної роботи	$P(t)$
	Гамма-відсотковий наробіток до відмови	T_y
	Середнє напрацювання до відмови	T_{cp}
	Середнє напрацювання на відмову	T_Q
	Інтенсивність відмов	$\lambda(t)$
	Параметр потоку відмов	$\omega(t)$
	Опосередкований параметр потоку відмов	$\varpi(t)$
Довговічність	Гамма-відсотковий ресурс	T_{py}
	Середній ресурс	T_p
	Гамма-відсотковий термін служби	$T_{слу}$
	Середній термін служби	$T_{сл}$
Збереженість	Середній термін зберігання	T_c
	Гамма-відсотковий термін зберігання	T_{cy}
	Призначений термін зберігання	$T_{c.n}$
	Встановлений термін збереження	$T_{c.y}$
Ремонтопридатність	Середній час відновлення	T_v
	Ймовірність відновлення	$P_z(t_B)$
Комбінація властивостей	Коефіцієнт готовності	K_r
	Коефіцієнт оперативної готовності	$K_{o.r}$
	Коефіцієнт технічного використання	$K_{т.и}$

За результатами проведеного аналізу встановлено, що оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту може здійснюватися на основі детерміністичних підходів, зокрема методів, заснованих на теорії ймовірності, включаючи ймовірнісно-статистичні методи, з подальшою апробацією отриманих результатів через експеримент або контрольовану експлуатацію.

Ефективність функціонування систем протипожежного захисту оцінюється як для окремих систем, так і для їх комбінацій із урахуванням синергетичного ефекту спільної дії. При цьому доцільно використовувати критерії оцінювання, що базуються на виконанні заданих функцій системою або їх комбінацією, а також інші відповідні показники надійності об'єкта.

Запропоновані підходи створюють основу для подальшого дослідження ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту та їхнього впливу на величину індивідуального пожежного ризику.

Статистична теорія надійності застосовна до поодиноких ремонтованих об'єктів, для яких нормативно-технічною документацією допускається багаторазова відмова компонентів. Для опису послідовності відмов у таких системах використовується модель потоку випадкових подій. Теорія також застосовується до унікальних і малосерійних об'єктів, що складаються з масово вироблених компонентів; у цьому випадку розрахунок показників надійності об'єкта здійснюють за статистичними характеристиками надійності його складових елементів.

Методи статистичної теорії надійності дозволяють визначити вимоги до надійності компонентів на підставі вимог до надійності об'єкта в цілому. Вони є складовою більш загального підходу до розрахункової оцінки надійності технічних систем, де відмови розглядаються як результат взаємодії об'єкта як фізичної системи з іншими об'єктами та навколишнім середовищем. При проектуванні будівель і конструкцій враховують статистичний розкид механічних властивостей матеріалів, елементів та з'єднань, а також просторово-часову змінність параметрів зовнішніх навантажень і подій.

Більшість показників надійності зберігають свою актуальність і при застосуванні загального підходу до розрахункової оцінки надійності. У спрощеній моделі «параметр навантаження – параметр міцності» ймовірність безвідмовної роботи відповідає ймовірності того, що значення навантаження протягом заданого часу не перевищить допустимого значення міцності, при цьому обидва параметри можуть розглядатися як випадкові функції часу.

На стадії проєктування та конструювання показники надійності визначаються як характеристики імовірнісних або напівімовірнісних моделей об'єктів. Під час експериментальної відпрацювань, випробувань та експлуатації ці показники реалізуються як статистичні оцінки відповідних імовірнісних характеристик.

Для уніфікації всі показники надійності визначені як імовірнісні величини, що забезпечує можливість їх прогнозування вже на стадії проєктування. Показники надійності встановлюються щодо конкретних режимів і умов експлуатації, визначених нормативно-технічною та/або конструкторською документацією, та підлягають класифікації за відповідними категоріями:

- за способом їх отримання;
- у сфері їх використання;
- у сфері їх поширення;
- за властивостями виробів, що характеризують надійність.

За способом отримання показники надійності поділяються на:

- експлуатаційні, одержувані за результатами експлуатаційних випробувань.

Одним із ключових видів експлуатаційних випробувань є дослідна експлуатація. Окрім цього, проводиться підконтрольна експлуатація, яку умовно також можна віднести до експлуатаційних випробувань. Підконтрольна експлуатація передбачає природний процес використання об'єкта, хід та результати якого контролюються спеціально призначеним і підготовленим персоналом (додатковим або штатним). Вона здійснюється відповідно до розробленої документації, яка передбачає збір, облік та первинну обробку інформації, отриманої в процесі підконтрольної експлуатації;

- експериментальні, отримані за даними випробувань;
- розрахункові, одержувані розрахунковими методами; екстрапольовані, одержувані на підставі результатів розрахунків, випробувань та (або) експлуатаційних даних шляхом екстраполювання на іншу тривалість експлуатації та інші умови.

За областю використання показники надійності поділяються на:

- нормативні, що використовуються в нормативно-технічній чи конструкторській (проектній) документації;
- оціночні, які застосовуються для оцінки надійності за результатами випробувань та експлуатації.

За областю поширення показники надійності поділяються на індивідуальні та групові, що використовуються для оцінки надійності одного виробу та партії виробів відповідно. За властивостями виробів, що характеризують їхню надійність, розрізняють показники надійності, наведені у табл. 1.7: показники безвідмовності, показники довговічності, показники збереження, показники ремонтпридатності та показники, що застосовуються для оцінки комбінації властивостей (комплексні показники).

Розрахунок надійності технічної системи зазвичай здійснюється у кілька послідовних етапів. Перший етап передбачає опис роботи системи, визначення поняття «безвідмовна робота системи», складання переліку властивостей справної системи та поділ її на окремі елементи. На другому етапі проводиться аналіз та класифікація можливих відмов елементів і системи загалом, оцінюється вплив кожної відмови на працездатність системи.

Третій етап є основним і полягає у побудові структурної (логічної) моделі безвідмовної роботи системи [92]. На цьому етапі зазвичай виділяються підсистеми або блоки, у яких відмова будь-якого елемента призводить до відмови всього блоку. Для кожного блоку розраховується його надійність, після чого блоки нумеруються та позначаються літерами. Далі визначаються комбінації блоків, що забезпечують безвідмовну роботу системи, та складається логічна схема для розрахунку надійності технічної системи. Ця схема, яка часто називається розрахунково-

логічною, відображає працездатний або непрацездатний стан системи залежно від стану її окремих елементів або блоків.

Зазначені системи можуть бути таких видів: послідовні, паралельні, системи, місткові та комбіновані [93].

Відповідно до [94], процедура визначення показників надійності об'єкта здійснюється за допомогою методів, які базуються на обчисленні значень на основі довідкових даних щодо надійності елементів об'єкта, даних про надійність аналогічних об'єктів, властивостей матеріалів та іншої доступної на момент розрахунку інформації.

Прогнозування надійності: окремий випадок розрахунку надійності об'єкта на основі статистичних моделей, що відображають тенденції зміни надійності об'єктів-аналогів та/або експертних оцінок.

Розрахунок надійності об'єкта на певному етапі видів робіт, що відповідає певній стадії його життєвого циклу, може мати своїми цілями:

- обґрунтування кількісних вимог щодо надійності до об'єкта або його складових частин; перевірку здійсненості встановлених вимог та/або оцінка ймовірності досягнення необхідного рівня надійності об'єкта у встановлені терміни та при виділених ресурсах, обґрунтування необхідних коригувань встановлених вимог;
- порівняльний аналіз надійності варіантів схемно-конструктивної побудови об'єкта та обґрунтування вибору раціонального варіанту;
- визначення досягнутого або очікуваного рівня надійності об'єкта та його складових частин, включно з розрахунковим визначенням показників надійності або параметрів розподілу характеристик надійності компонентів, що використовуються як вихідні дані для оцінки надійності об'єкта в цілому;
- обґрунтування та перевірку ефективності запропонованих або реалізованих заходів щодо вдосконалення конструкції, технології виготовлення, системи технічного обслуговування та ремонту об'єкта з метою підвищення його надійності;
- вирішення різноманітних оптимізаційних завдань, де показники надійності виконують роль цільових функцій, керованих параметрів або граничних умов. Це

включає оптимізацію структури об'єкта, розподіл вимог щодо надійності між складовими (наприклад, безвідмовності та ремонтпридатності), розрахунок комплектів ЗІП, оптимізацію систем технічного обслуговування та ремонту, обґрунтування гарантійних термінів та призначених термінів служби (ресурсу) об'єкта тощо;

- перевірку відповідності очікуваного або досягнутого рівня надійності об'єкта встановленим вимогам (контроль надійності) у випадках, коли пряме експериментальне підтвердження рівня надійності технічно неможливе або економічно недоцільне.

Розрахунок надійності об'єктів у загальному випадку здійснюється як поетапна процедура послідовного уточнення оцінок показників надійності. Цей процес передбачає вдосконалення конструкції та технології виготовлення об'єкта, алгоритмів його функціонування, правил експлуатації, системи технічного обслуговування та ремонту, критеріїв відмов і граничних станів. У ході накопичення більш повної та достовірної інформації про всі чинники, що впливають на надійність, застосовуються дедалі більш адекватні й точні методи розрахунку та розрахункові моделі.

Розрахунок надійності на будь-якому етапі видів робіт, передбаченому планом процедури оцінки надійності, включає:

- ідентифікацію об'єкта, що підлягає розрахунку;
- визначення цілей і завдань розрахунку на даному етапі, номенклатури та необхідних значень показників надійності, що розраховуються;
- вибір методу(ів) розрахунку, адекватного(их) особливостям об'єкта, цілям розрахунку, наявності необхідної інформації про об'єкт та вихідних даних для розрахунку;
- складання розрахункових моделей кожному за показника надійності;
- отримання та попередню обробку вихідних даних для розрахунку, обчислення значень показників надійності об'єкта та, при необхідності, їх зіставлення з необхідними;
- оформлення, подання та захист результатів розрахунку.

Ідентифікація об'єкта для розрахунку його надійності передбачає збір та аналіз інформації про об'єкт, умови його експлуатації та інші чинники, що впливають на його надійність, зокрема:

- призначення, сфери застосування та функції об'єкта;
- критерії якості функціонування, відмов та граничних станів, можливі наслідки відмов (досягнення об'єктом граничного стану) об'єкта;
- структура об'єкта, склад, взаємодія та рівні завантаженості елементів, що входять до нього, можливість перебудови структури та/або алгоритмів функціонування об'єкта при відмовах окремих його елементів;
- наявність, види та способи резервування, що використовуються в об'єкті;
- типова модель експлуатації об'єкта, що встановлює перелік можливих режимів експлуатації та виконуваних при цьому функцій, правила та частоту чергування режимів, тривалість перебування об'єкта в кожному режимі та відповідні напрацювання, номенклатуру та параметри навантажень та зовнішніх впливів на об'єкт у кожному режимі;
- планована система технічного обслуговування (ТО) та ремонту об'єкта, що характеризується видами, періодичністю, організаційними рівнями, способами виконання, технічним оснащенням та матеріально-технічним забезпеченням робіт з його ТО та ремонту;
- розподіл функцій між операторами та засобами автоматичного діагностування (контролю) та управління об'єктом, види та характеристики людино-машинних інтерфейсів, що визначають параметри працездатності та надійності роботи операторів;
- рівень кваліфікації персоналу;
- якість програмних засобів, які застосовуються в об'єкті;
- плановані технологія та організація виробництва під час виготовлення об'єкта.

Повнота ідентифікації об'єкта на етапі розрахунку його надійності визначає вибір відповідного методу розрахунку, який забезпечує прийнятну точність з

урахуванням наявної інформації та можливих обмежень у доступі до частини даних, зазначених вище.

Джерелами інформації для проведення ідентифікації об'єкта виступають конструкторська, технологічна, експлуатаційна та ремонтна документація щодо об'єкта в цілому, його складових та комплектуючих виробів, а також комплектів, які відповідають конкретному етапу розрахунку надійності.

Методи розрахунку надійності поділяють:

- за складом розрахункових показників надійності;
- за основними принципами розрахунку.

За складом розрахункових показників розрізняють методи розрахунку:

- безвідмовності,
- ремонтпридатності,
- довговічності,
- збереження,
- комплексних показників надійності (методи розрахунку коефіцієнтів готовності, технічного використання, збереження ефективності та ін.).

За основними принципами розрахунку властивостей, що становлять надійність, або комплексних показників надійності об'єктів розрізняють:

- методи прогнозування,
- структурні методи розрахунку,
- фізичні способи розрахунку.

Методи прогнозування надійності базуються на використанні даних про досягнуті показники надійності та тенденції їх зміни для об'єктів-аналогів – тобто об'єктів, схожих за призначенням, принципами дії, схемно-конструктивною побудовою, технологією виготовлення, елементною базою, матеріалами, умовами та режимами експлуатації, а також методами управління надійністю.

Структурні методи розрахунку передбачають подання об'єкта у вигляді логічної або структурно-функціональної схеми, яка відображає залежність станів і переходів об'єкта від станів та взаємодій його елементів, а також виконуваних ними функцій. Далі побудована структурна модель описується відповідною

математичною моделлю, на основі якої обчислюється показник надійності об'єкта з урахуванням відомих характеристик надійності його компонентів.

Фізичні методи розрахунку ґрунтуються на застосуванні математичних моделей, що описують фізичні, хімічні та інші процеси, які можуть призвести до відмов об'єкта або досягнення ним граничного стану. Показник надійності обчислюється з урахуванням параметрів навантажень, характеристик матеріалів та речовин, використаних в об'єкті, а також специфіки його конструкції та технології виготовлення.

Вибір методу розрахунку надійності конкретного об'єкта здійснюється з урахуванням таких факторів:

- цілей розрахунку та вимог до точності визначення показника надійності об'єкта;
- наявності або можливості отримання необхідної вихідної інформації для застосування конкретного методу;
- ступеня відпрацьованості конструкції та технології виготовлення об'єкта, а також системи його технічного обслуговування та ремонту, що дозволяє застосовувати відповідні розрахункові моделі.

При розрахунку надійності окремих об'єктів можливо одночасне використання декількох методів. Наприклад, результати прогнозування надійності електронних та електротехнічних компонентів можуть слугувати вихідними даними для подальшого розрахунку надійності об'єкта в цілому або його складових частин за допомогою структурних методів.

В якості вихідних даних для розрахунку надійності об'єкта можуть використовуватися:

- апіорна інформація щодо надійності об'єктів-аналогів, складових частин та комплектуючих виробів, отримана на основі їх експлуатації в аналогічних або близьких умовах;
- оцінки показників надійності (параметри розподілу характеристик надійності) складових частин об'єкта та властивостей застосованих матеріалів,

отримані експериментально або розрахунковим шляхом у процесі розробки, виготовлення чи експлуатації об'єкта та його складових;

- розрахункові та/або експериментальні оцінки параметрів навантаження на складові частини та елементи конструкції об'єкта.

Джерела вихідних даних для розрахунку надійності об'єкта включають:

- стандарти та технічні умови на складові частини об'єкта, комплектуючі елементи міжгалузевого застосування, речовини та матеріали;

- довідники з надійності елементів, властивостей речовин та матеріалів, нормативи тривалості (трудомісткості, вартості) типових операцій технічного обслуговування та ремонту та інші інформаційні матеріали;

- статистичні дані (банки даних) щодо надійності об'єктів-аналогів, їх складових елементів, властивостей застосованих речовин і матеріалів, параметрів операцій технічного обслуговування та ремонту, зібрані в процесі розробки, виготовлення, випробувань та експлуатації;

- результати міцнісних, електричних, теплових та інших розрахунків об'єкта і його складових частин, включно з розрахунками показників надійності цих частин.

У разі наявності кількох джерел вихідних даних слід визначити пріоритети їх використання або методи інтеграції даних у методиці розрахунку. У робочій документації об'єкта перевагу слід надавати даним із стандартів і технічних умов на складові частини, елементи та матеріали.

Методика розрахунку надійності конкретного об'єкта має містити:

- інформацію про об'єкт, що забезпечує його ідентифікацію для розрахунку надійності відповідно до вимог цього стандарту;

- номенклатуру розрахункових показників надійності та їх необхідні значення;

- моделі для розрахунку кожного показника надійності, прийняті при їх побудові припущення та припущення, відповідні алгоритми обчислення показника надійності та програмні засоби, що застосовуються, оцінки похибок та чутливості обраних (побудованих) моделей;

- вихідні дані для розрахунку та джерела їх отримання;

- методики оцінки параметрів завантаженості об'єкта та його складових частин або безпосередньо оцінки зазначених параметрів з посиланнями на відповідні результати та методики міцнісних, теплових, електричних та інших розрахунків об'єкта.

Методи прогнозування застосовуються для:

- обґрунтування необхідного рівня надійності об'єктів під час розробки технічних завдань та/або оцінки ймовірності досягнення заданих показників надійності при опрацюванні технічних пропозицій і аналізі вимог до технічної системи (контракту);

- орієнтовної оцінки очікуваного рівня надійності об'єктів на ранніх стадіях проектування, коли відсутня достатня інформація для застосування інших методів розрахунку надійності. Приклад методики прогнозування показників безвідмовності блоків радіоелектронної апаратури залежно від її призначення та кількості активних елементів наведено в [95];

- розрахунку інтенсивності відмов серійно випускаються та нових електронних і електротехнічних елементів різних типів із урахуванням рівня їх завантаженості, якості виготовлення та сфер застосування апаратури, у якій використовуються ці елементи. Приклади методик наведено в [96];

- розрахунку параметрів типових завдань та операцій технічного обслуговування й ремонту об'єктів із урахуванням конструктивних характеристик, що визначають їх ремонтпридатність. Приклади методик містяться в [97] та американському військовому довіднику [98].

Для прогнозування надійності об'єктів застосовуються наступні групи методів:

1. Методи евристичного прогнозування (експертної оцінки)

Засновані на статистичній обробці незалежних оцінок очікуваних показників надійності об'єкта, які надає група кваліфікованих фахівців (експертів). Оцінки формуються на основі інформації про об'єкт, умови його експлуатації, плановану технологію виготовлення та інші доступні дані. Статистична обробка

індивідуальних прогнозів проводиться загальноприйнятими методами експертної оцінки для забезпечення узгодженості та обґрунтованості результатів.

2. Методи прогнозування за статистичними моделями

Базуються на екстраполяції або інтерполяції залежностей, які відображають тенденції зміни показників надійності об'єктів-аналогів з урахуванням їх конструктивно-технологічних особливостей та інших факторів. Дані про об'єкти-аналогів обробляються з використанням відомих статистичних методів: багатфакторного регресійного аналізу, факторного аналізу, методів статистичної класифікації та розпізнавання образів.

3. Комбіновані методи

Поєднують статистичні моделі та евристичні методи для уточнення прогнозу. Евристичні оцінки використовують для перевірки можливості екстраполяції статистичних моделей та коригування прогнозу у випадках якісних змін рівня надійності або недостатньої кількості об'єктів-аналогів для статистичної обробки.

4. Структурні методи

Служать основними методами розрахунку показників безвідмовності, ремонтпридатності та комплексних показників надійності у процесі проектування об'єктів, що піддаються розукрупненню на елементи. Характеристики надійності елементів у момент розрахунку відомі або визначаються іншими методами (прогнозування, фізичними, за статистичними даними, отриманими в процесі застосування об'єктів-аналогів). Структурні методи застосовують також для оцінки довговічності та збереження об'єктів, критеріями граничного стану яких є параметри довговічності та збереженості їх елементів.

Розрахунок показника надійності структурними методами передбачає двоетапну процедуру:

1. Представлення об'єкта у вигляді структурної схеми

Структурна схема відображає логічні взаємозв'язки між станами елементів та станом об'єкта в цілому.

Враховуються структурно-функціональні зв'язки між елементами, стратегія обслуговування, типи та способи резервування, а також інші фактори, що впливають на надійність.

2. Опис структурної схеми математичною моделлю

Математична модель забезпечує можливість обчислення показника надійності об'єкта з урахуванням введених припущень і вихідних даних про надійність елементів у реальних умовах експлуатації.

Типи структурних схем, що застосовуються для оцінки надійності:

- структурні блок-схеми надійності – об'єкт розглядається як сукупність елементів, з'єднаних між собою з точки зору забезпечення безвідмовної роботи [99];
- дерева відмов – графічне відображення причинно-наслідкових зв'язків, що призводять до певних видів відмов об'єкта [100];
- графи (діаграми) станів і переходів – описують можливі стани об'єкта та переходи між ними як функцію станів та взаємодії його елементів.

Вибір моделі визначається типом та складністю структурної схеми, прийнятими припущеннями щодо розподілу характеристик надійності елементів, точністю та достовірністю вихідних даних, а також іншими факторами, що впливають на адекватність розрахунку.

Цей підхід дозволяє кількісно оцінити вплив кожного елемента та комбінації елементів на загальний рівень надійності об'єкта, що є критичним при проектуванні технічних систем, у тому числі систем протипожежного захисту.

Нижче розглянуті найбільш уживані математичні методи розрахунку показника надійності, що виключає можливості розробки та застосування інших методів, більш адекватних структурі та іншим особливостям об'єкта.

Для розрахунку безвідмовності невідновлюваних об'єктів виду I [101] застосовують методи, які базуються на структурному представленні об'єкта у вигляді блок-схеми безвідмовності [99].

Основні підходи та методи:

1. Прямий розрахунок для простих структур.

Застосовується до паралельно-послідовних структур.

Ймовірність безвідмовної роботи об'єкта визначається безпосередньо через параметри безвідмовності його елементів.

2. Розрахунок для складних структур (монотонних)

Використовуються методи:

- прямого перебору станів;
- мінімальних шляхів та перерізів;
- розкладання щодо будь-якого елемента.

3. Показники напрацювання до відмови

Для визначення середнього напрацювання до відмови застосовують пряме або чисельне інтегрування розподілу напрацювань елементів.

При неповній або недостовірній інформації про розподіл напрацювань застосовуються граничні оцінки показника надійності, відомі з теорії надійності.

4. Спеціальний випадок з різними способами резервування

При експоненційному розподілі напрацювань елементів об'єкт можна відобразити у вигляді графа переходів, а його надійність описується за допомогою марківського процесу.

Такий підхід дозволяє формалізовано оцінити безвідмовність як простих, так і складних невідновлюваних систем, враховуючи структуру, способи резервування та статистичні характеристики елементів.

При використанні для структурного опису безвідмовності дерев відмов відповідно до [100], ймовірності відповідних відмов розраховують з використанням булева уявлення дерева відмов і методу мінімальних перерізів.

Методи розрахунку безвідмовності та комплексних показників надійності відновлюваних об'єктів виду I базуються на моделюванні роботи об'єкта з урахуванням можливості його відновлення після відмов. Основним і універсальним підходом є метод статистичного моделювання, який дозволяє оцінювати надійність об'єктів будь-якої структури та за будь-яких розподілів напрацювань між відмовами і часів відновлення.

Основні етапи застосування методу статистичного моделювання:

1. Синтез формальної моделі

Формується алгоритм послідовності випадкових подій: відмов, відновлень, перемикань на резерв, початку та завершення технічного обслуговування.

2. Розробка програмного забезпечення

Реалізація моделі на комп'ютері та розрахунок показників надійності.

3. Проведення імітаційного експерименту

Багаторазова реалізація формальної моделі для забезпечення заданої точності та достовірності розрахунків.

Особливості застосування:

Для резервованих послідовних структур з відновленням елементів застосовують марківські моделі, які описують графи станів об'єкта.

Якщо розподіли напрацювань або часу відновлення не експоненційні, можна вводити фіктивні стани для приведення задачі до марківської.

Для об'єктів з резервом можливе також представлення напрацювань між відмовами як суми випадкових доданків з прямим обчисленням показника надійності без використання теорії випадкових процесів.

Розрахунок показників ремонтопридатності:

Процес технічного обслуговування або ремонту розглядається як сукупність окремих завдань (операцій), ймовірність виконання яких залежить від безвідмовності об'єкта та прийнятої стратегії обслуговування.

Тривалість або трудомісткість виконання кожного завдання визначається конструктивною пристосованістю об'єкта до обслуговування.

Для поточних непланових ремонтів розподіл часу (трудомісткості, вартості) відновлення об'єкта формується як композиція розподілів витрат на окремі завдання з урахуванням ймовірності їх виконання у певний період роботи об'єкта.

Ймовірності виконання завдань можуть визначатися, наприклад, деревами відмов, а параметри розподілу витрат – за методиками, наведеними у [97].

Такий підхід забезпечує комплексну оцінку надійності та ремонтопридатності відновлюваних об'єктів, враховуючи вплив резервування, різних стратегій обслуговування та випадкових факторів відмов.

Загальна схема розрахунку надійності та ремонтпридатності об'єктів включає кілька ключових етапів, що забезпечують комплексну оцінку роботи системи:

1. Складання переліку можливих відмов об'єкта

Визначають усі потенційні відмови елементів та підсистем об'єкта.

Оцінюють ймовірності або інтенсивності настання кожної відмови.

2. Вибір завдань для розрахунку

Зі списку відмов обирають представницьку вибірку завдань за допомогою розширеної випадкової вибірки.

Для кожного завдання визначають параметри розподілу тривалості, трудомісткості або вартості виконання.

Зазвичай застосовують усічений нормальний розподіл або альфа-розподіл.

3. Побудова емпіричного розподілу витрат на ремонт

Розподіл витрат на поточний ремонт формується шляхом сумування розподілів витрат на окремі завдання з урахуванням ймовірності їх виконання.

Емпіричний розподіл згладжують за допомогою відповідного теоретичного розподілу, наприклад логарифмічно-нормального або гамма-розподілу.

4. Обчислення показників ремонтпридатності

Показники визначаються за параметрами обраного закону розподілу (середнє, дисперсія, ймовірності виконання завдань).

Методи розрахунку надійності об'єктів виду II

Для об'єктів виду II застосовують коефіцієнт збереження ефективності, який характеризує частку номінальної ефективності, що зберігається в кожному стані об'єкта від 0 до 1.

На відміну від об'єктів виду I, де ефективність приймає лише значення 0 або 1, об'єкти виду II дозволяють моделювати ступінчасту або неповну ефективність при відмовах елементів.

Основні методи розрахунку:

1. Метод усереднення за станами

Застосовується для короткочасних об'єктів, де ймовірністю зміни стану під час виконання завдання можна знехтувати.

Ефективність оцінюється лише за початковим станом об'єкта.

2. Метод усереднення по траєкторіях

Використовується для довготривалих об'єктів, де під час виконання завдання відбувається зміна станів елементів через відмови та відновлення.

Функціонування об'єкта моделюється як реалізація однієї з можливих траєкторій у просторі станів, що дозволяє врахувати динаміку зміни ефективності.

Такий підхід забезпечує кількісну оцінку надійності та ефективності об'єктів тривалого та короткочасного використання, враховуючи відмови, відновлення та резервування елементів.

Узагальнюючи, сучасні підходи до розрахунку ефективності та надійності систем передбачають застосування різноманітних схем та моделей залежно від особливостей функціонування об'єкта:

1. Розрахункові схеми для різних видів показників ефективності:

Адитивні системи – кожен елемент робить незалежний внесок у загальний ефект.

Мультиплікативні системи – ефективність системи визначається як добуток ефективностей підсистем.

Системи із резервуванням функцій – додаткові елементи забезпечують дублювання критичних функцій.

Системи з кількома способами виконання завдання – використовується різне поєднання елементів для досягнення результату.

Симетричні гілкувані системи – однакові підсистеми, що взаємодіють у структурі.

Системи із зонами дії, що перетинаються – ефект системи визначається взаємодією зон дії елементів.

У всіх випадках ефективність системи є функцією ефективності її підсистем або елементів.

2. Методи оцінки ефективності:

Аналітичні – обчислення показників за математичними моделями.

Моделювання – комп'ютерне моделювання функціонування системи у різних станах або траєкторіях.

Експериментальні – випробування на об'єкті або його натурних моделях.

3. Фізичні методи розрахунку:

Використовуються для об'єктів, де відомі механізми деградації під дією внутрішніх та зовнішніх факторів.

Застосовуються моделі деградації для обчислення показників надійності з урахуванням конструкції, технології виготовлення, режимів експлуатації та властивостей матеріалів.

4. Моделі не перевищення:

Для одного провідного процесу деградації ресурс об'єкта моделюють як випадковий процес із межами допустимого існування (можуть бути випадковими та корельованими).

Для кількох незалежних процесів деградації застосовується модель «найслабшої ланки», де ресурс об'єкта визначається мінімумом ресурсів окремих процесів.

Компоненти моделі можуть мати різну фізичну природу, що зумовлює використання різних видів розподілів.

5. Основний метод розрахунку:

Статистичне моделювання – дозволяє розраховувати надійність у складних системах, де пряме аналітичне рішення практично неможливе через багатofакторність процесів деградації.

Таким чином, для сучасних технічних систем комбінують аналітичні, моделювальні та фізичні методи, використовуючи відповідні моделі ефективності та деградації, щоб отримати адекватну оцінку надійності та прогнозованої роботи об'єкта.

Новітніми розробками, які допомагають оцінювати ефективність функціонування систем протипожежного захисту та оцінювати рівень їх впливу на пожежні ризики є використання штучного інтелекту. Зокрема у роботі [102]

досліджені питання застосування штучного інтелекту під час вирішення проблем пожежної безпеки в цілому, в тому числі із за рахунок застосування інженерних систем протипожежного захисту. У роботі [103] розглянуті стратегії оцінки ефективності застосування стаціонарних автоматичних систем пожежогасіння в житлових багатоповерхових будинках з метою покращення забезпечення пожежної безпеки населення в їхніх оселях. В той час як у роботі [104] досліджені питання комплексної оцінки ризиків виникнення та поширення пожежі за допомогою використання супутникових даних часових рядів та методів прийняття рішення за рядом попередньо визначених критеріїв.

Також серед новітніх розробок доцільно відмітити використання супутникових технологій під час забезпечення пожежної безпеки, зокрема використання комплексних даних супутникових спостережень і математичного моделювання в задачах оцінювання пожежних ризиків в геоекологічних системах та забезпечення безпеки на основі цих даних [105].

Таким чином, системи протипожежного захисту є ефективним технічним засобом, який здатний у разі його ефективного функціонування знижувати пожежні ризики, зокрема, індивідуальний пожежний ризик.

1.4. Методи оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту

Один із підходів до оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту полягає у використанні ймовірнісних методів. У цьому випадку аналіз здійснюють на основі ймовірнісних законів розподілу [106], які застосовуються у розрахунках надійності та можуть бути використані для оцінки ефективності систем. Ці закони описують розподіл випадкової величини, яку можна подати у вигляді функції розподілу $F(t)$ випадкової величини T :

$$F(t)=P(T<t)=\int_{-\infty}^t f(t)dt \quad (1.1)$$

та функції щільності розподілу випадкової величини T :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (1.2)$$

Щільність розподілу відповідає умовам:

$$f(t) \geq 0; \quad \int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (1.3)$$

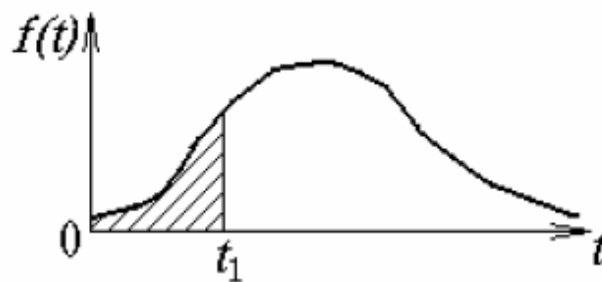


Рисунок 1.6 – Крива щільності розподілу [106]

Заштрихована площа під кривою густини розподілу рисунок 1.6 на ділянці $[0; t_1]$ являє собою ймовірність попадання випадкової величини T на цю ділянку. Якщо на осі абсцис відкласти напрацювання, а на осі ординат – щільність розподілення напрацювання до відмови, то площа під кривою зліва від точки t_1 визначає ймовірність відмови в інтервалі часу $[0; t_1]$, а площа під кривою праворуч від точки t_1 – можливість безвідмовної роботи у цьому ж інтервалі. Для опису надійності використовують різні закони розподілення випадкових величин.

Біноміальному розподілу підпорядковується дискретна випадкова величина, що представляє собою число яких-небудь подій.

У теорії надійності часто розглядаються такі події, як відмови та безвідмовна робота. При біноміальному розподілі ймовірність того, що рівно m елементів системи із загальної кількості n елементів виявляться працездатними, дорівнює:

$$P_m = C_n^m p^m (1-p)^{n-m} \quad (1.4)$$

де p - ймовірність безвідмовної роботи елемента системи;

C_n^m біноміальний коефіцієнт, званий “числом поєднань (комбінацій) по « m

з n »:

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!} \quad (1.5)$$

У формулі (1.5) символ «!» означає факторіал, тобто добуток усіх натуральних чисел від 1 до відповідного числа.

Біноміальний розподіл застосовується для визначення ймовірності безвідмовної роботи системи типу « m із n », що означає, що система залишається працездатною, якщо з n елементів принаймні m і більше залишаються в робочому стані. Оскільки система виходить з ладу, якщо кількість справних елементів менша за m , ймовірність її відмови можна обчислити, використовуючи теорему складу ймовірностей:

$$Q = \sum_{k=0}^{m-1} C_n^k p^k (1-p)^{n-k} \quad (1.6)$$

Аналогічним чином можна визначити ймовірність безвідмовної роботи як суму:

$$P = \sum_{k=m}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k} \quad (1.7)$$

При розрахунках із формул (1.6) та (1.7) слід обрати ту, яка містить меншу кількість доданків, а потім за необхідності скористатися виразом $Q+P=1$ [106].

Нормальний розподіл випадкової величини виникає внаслідок дії великої кількості рівнозначних факторів. У теорії надійності він застосовується для обчислення показників надійності виробів у період поступових відмов, зумовлених

зносом та старінням. Щільність розподілу величини T при нормальному розподілі (рисунок 1.7) визначається співвідношенням:

$$f(t) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t-M_t)^2}{2\delta^2} \right] \quad (1.8)$$

де δ , M_t – середнє квадратичне відхилення та математичне очікування величини T відповідно. Випадковою величиною T , що розглядається в теорії надійності, зазвичай є напрацювання до відмови або несуча здатність.

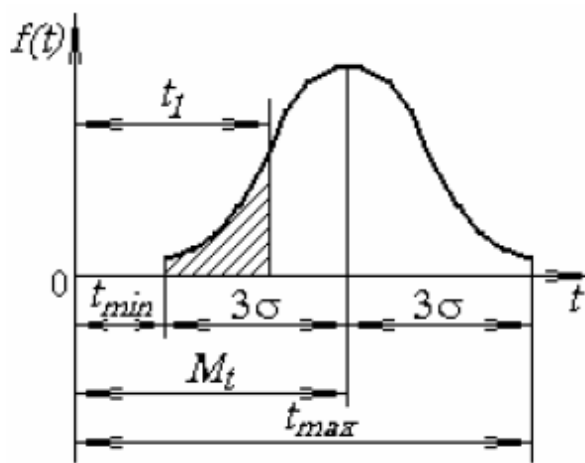


Рисунок 1.7 – Щільність нормального розподілу [107]

Функція розподілу величини T за її нормального розподілу має вид

$$F(t) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp \left[-\frac{(t-M_t)^2}{2\delta^2} \right] dt \quad (1.9)$$

Обчислення $F(t)$ здійснюють за допомогою таблиць, в яких наводяться значення відповідно $F_0(x)$ для нормованого нормального розподілу. Нормований нормальний розподіл – це нормальний розподіл, у якому $\sigma=1$; $M=0$. Тому формули для щільності розподілу та функції розподілу мають у цьому разі наступний вид:

$$F_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{x^2}{2} \right], \quad (1.10)$$

$$F_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right] dx \quad (1.11)$$

Якщо у цих формулах зробити підстановку $x=(t-M_t)/\sigma$, тоді $F_0(x)=F(t)$. Тому, для визначення $F(t)$ за таблицями спочатку необхідно визначити значення x (це значення називається квантілю нормального розподілу) за формулою $x=(t-M_t)/\sigma$, потім за відповідними таблицями знайти $F_0(x)$. Значення $F(t)$ обчислюють за формулою $F(t)=F_0(x)$. Значення $F_0(x)$ таблиці наведені для $x \geq 0$. Для $x < 0$ $F_0(x)$ визначають по формулам $F_0(-x)=1-F_0(x)$. Розподіл суми незалежних випадкових величин $U=X+Y+Z$, називають композицією розподілів, при нормальному розподілі доданків також є нормальним розподілом.

Математичне очікування та дисперсія для композиції відповідно дорівнюють:

$$M_u = M_x + M_y + M_z; D_u = D_x + D_y + D_z \quad (1.12)$$

де M_x, M_y, M_z - математичні очікування випадкових величин X, Y, Z ;

D_x, D_y, D_z дисперсії тих самих величин

Логарифмічно нормальний розподіл (рисунок 1.8) описує випадкову величину, логарифм якої підпорядковується нормальному закону розподілу. У теорії надійності цей розподіл застосовується для обчислення показників надійності виробів у період настання втоми матеріалу та між відмовами [108].

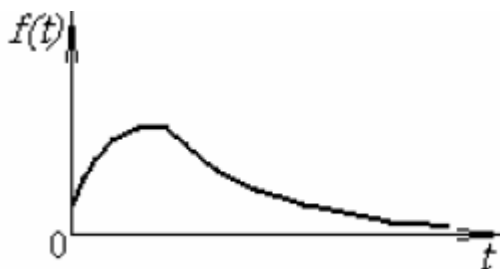


Рисунок 1.8 – Щільність логарифмічно нормального розподілу [108]

Щільність розподілу у цьому випадку описується співвідношенням.

$$f(t) = \frac{1}{st\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(1nt - \mu_t)^2}{2s^2} \right] \quad (1.13)$$

Параметри μ та s визначають за результатами випробувань. Щільність розподілу, функцію розподілу можна знайти за таблицям для нормованого нормального розподілу, обчислюючи квантиль за формулою $x = (1nt - \mu)/s$.
Математичне очікування

$$M(t) = e^{\mu + \frac{s^2}{2}} \quad (1.14)$$

Експоненціальний розподіл, який також називають базовим законом надійності, застосовується для моделювання надійності виробу в період його нормальної експлуатації, коли поступові відмови ще не проявилися, а відбуваються лише раптові відмови. Такі відмови зумовлені несприятливим поєднанням багатьох чинників і характеризуються сталою інтенсивністю λ . У теорії надійності цей розподіл широко використовується завдяки простоті практичного застосування. Щільність розподілу у цьому випадку наведена на рисунку 1.9 і описується співвідношенням [109].

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1.15)$$

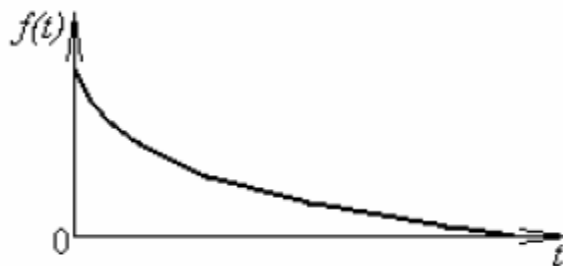


Рисунок 1.9 – Щільність експоненціального розподілу [109]

$$F(t)=1-e^{-\lambda t} \quad (1.16)$$

Функція розподілу дорівнює ймовірності відмови $Q(t)$ виробу в інтервалі часу (напрацювання) $(0, t)$.

Ймовірність безвідмовної роботи:

$$P(t)=1-Q(t)=e^{-\lambda t} \quad (1.17)$$

Математичне очікування M_t та середнє квадратичне відхилення:

$$M_t = \sigma_t = \frac{1}{\lambda} \quad (1.18)$$

Розподіл Вейбулла є двопараметричним і ефективно описує напрацювання до відмови. Його широке використання зумовлено універсальністю: закон Вейбулла здатний моделювати процеси з різними видами розподілів, зокрема нормальним, логарифмічно нормальним та експоненціальним [110].

Щільність розподілу згідно із законом Вейбулла рисунок 1.10 виражається залежністю виду:

$$f(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} \exp \left[-\frac{t^m}{t_0} \right] \quad (1.19)$$

де m - параметр форми кривої розподілу; t_0 – параметр масштабування.

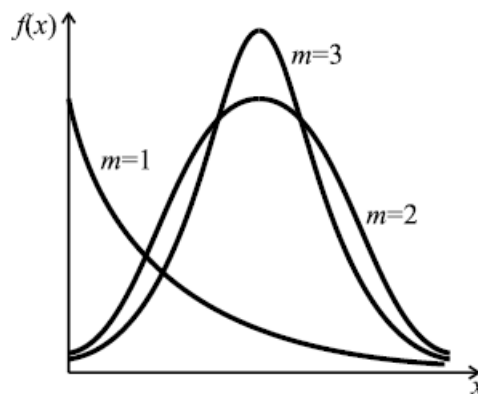


Рисунок 1.10 – Густина розподілу по закону Вейбулла [110]

Функція розподілу (імовірність відмови) описується співвідношенням:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\frac{t^m}{t_0}\right] \quad (1.20)$$

Ймовірність безвідмовної роботи

$$P(t) = \exp\left[-\frac{t^m}{t_0}\right] \quad (1.21)$$

Підбираючи значення параметрів m і t_0 , можна отримати найкраще співвідношення розрахункових значень експериментальних даних порівняно з нормальним та експоненційним законами. Для виробів із прихованими дефектами, що довго не старіють, ймовірність відмови найбільша на початковому етапі експлуатації та швидко знижується з часом. У таких випадках функцію безвідмовної роботи добре описує закон Вейбулла з параметром $m < 1$. Навпаки, якщо виріб майже позбавлений прихованих дефектів, але піддається швидкому старінню, функція надійності відповідає закону Вейбулла з $m > 1$. При $m = 3,3$ розподіл Вейбулла наближається до нормального, а при $m = 1$ він перетворюється на експоненціальний.

Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ визначається як ймовірність того, що протягом заданого часу або напрацювання виріб не зазнає відмов. Іншими словами, $P(t)$ – це ймовірність того, що напрацювання T виробу не менше заданого значення t , тобто $P(T \geq t)$.

Статистичну оцінку ймовірності безвідмовної роботи протягом напрацювання t визначають із співвідношення:

$$P(t) = \frac{N_p(t)}{N} = 1 - \frac{n(t)}{N} \quad (1.22)$$

де $N_p(t)$ - число працездатних виробів до кінця часу t випробувань або експлуатації; N – кількість виробів, поставлених на випробування чи експлуатацію; $n(t)$ – кількість виробів, які відмовилися протягом напрацювання t

Ймовірність відмови

$$Q(t) = 1 - P(t) = \frac{n(t)}{N} \quad (1.23)$$

Імовірність відмови дорівнює функції розподілу напрацювання до відмови $F(t)$:

$$Q(t) = P(T < t) = F(t) \quad (1.24)$$

Розподіл відмов у часі характеризується щільністю розподілу напрацювань до відмови $f(t)$:

$$f(t) = \frac{\Delta F}{\Delta t} = \frac{\Delta Q(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta n(t)}{N \cdot \Delta t} \quad (1.25)$$

де $\Delta n(t)$ – кількість виробів, що відмовили, протягом напрацювання Δt .

Оскільки $P(t) = 1 - Q(t)$, то

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt} \quad (1.26)$$

Інтенсивність відмов - умовна щільність імовірності виникнення відмови об'єкта, яка визначається за умови, щодо моменту часу відмова не виникла:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{N_p(t) \Delta t} \quad (1.27)$$

де $n(t)$ – кількість відмов в інтервалі напрацювання $[t; t + \Delta t)$.

Оскільки

$$\frac{N_p(t)}{N} = P(t)$$

то

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (1.28)$$

З формул (1.3) та (1.4) виводиться одне з основних рівнянь теорії надійності:

$$\begin{aligned} \lambda(x) = -\frac{dP(x)}{P(x)dx} \Rightarrow \frac{dP(x)}{P(x)} = -\lambda(x)dx \Rightarrow \ln P(t) = -\int_0^t \lambda(x)dx \Rightarrow \\ \Rightarrow P(t) = \exp \left[-\int_0^t \lambda(x)dx \right] \end{aligned} \quad (1.29)$$

Параметр потоку відмов є відношенням математичного очікування кількості відмов відновлюваного об'єкта до значення цього напрацювання:

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M\{m(t+\Delta t) - m(t)\}}{\Delta t} \quad (1.30)$$

де Δt – малий відрізок напрацювання; $m(t)$ – кількість відмов, що настали від початкового моменту часу до досягнення напрацювання t ; $m(t+\Delta t) - m(t)$ – є число відмов на відрізку Δt . Опосередкований параметр потоку відмов $\omega(t)$ визначають за формулою:

$$\varpi(t) = \frac{M\{m(t_2) - m(t_1)\}}{t_2 - t_1} \quad (1.31)$$

при $t_1 \leq t \leq t_2$.

Статистичну оцінку для параметра потоку відмов знаходять за формулою:

$$\hat{\omega} = \frac{m(t_2) - m(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (1.32)$$

Середнє напрацювання до відмови T_{cp} - це математичне очікування напрацювання виробу до першої відмови.

У ймовірнісному трактуванні:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t)dt \quad (1.33)$$

У статистичній трактовці:

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^k P(t_i) \Delta t_i \quad (1.34)$$

де $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$;

k – загальна кількість розглянутих інтервалів напрацювання;

$$P(t_i) = \frac{N_p(t_i)}{N} \quad (1.35)$$

де $N_p(t_i)$ – кількість працездатних виробів на момент напрацювання t_i ;

N – загальна кількість виробів, поставлених на випробування або експлуатацію.

Середнє напрацювання на відмову визначається як відношення загального напрацювання відновлюваного виробу до очікуваної кількості його відмов за цей період. Інакше кажучи, це математичне очікування тривалості роботи виробу до настання чергової відмови після початку експлуатації або ремонту [111].

Технічний ресурс (ресурс) виробу – це напрацювання від початку його експлуатації після виготовлення або ремонту до досягнення граничного стану. Він вимірюється в одиницях часу роботи, пробігу або випущеної продукції. Виділяють ресурс від введення в експлуатацію до першого капітального ремонту, між капітальними ремонтами та повний ресурс до списання.

Середній ресурс

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^N T_{pi}}{N} \quad (1.36)$$

де T_{pi} – ресурс i -го виробу;

N – кількість виробів, поставлених на випробування.

Час відновлення - календарна тривалість відновлення працездатного стану виробу або календарна тривалість його технічного обслуговування. У розрахунок не береться час на організаційні заходи (підготовка інструменту, матеріалу тощо).

Якщо на пошуки причин m відмов та їх усунення витрачено час $T_{e1}, T_{e2}, \dots, T_{em}$, то середній час відновлення:

$$T_v = \frac{\sum_{i=1}^m T_{vi}}{m} \quad (1.37)$$

Коефіцієнт готовності K_Γ – ймовірність того, що виріб буде працездатним у будь-який момент часу крім планових перерв у його роботі (планове технічне обслуговування, перерви між робочими змінами).

$$K_\Gamma = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + T_{\text{рем}}} \quad (1.38)$$

де $T_{\text{раб}}$ - сумарна напрацювання всіх виробів в одиницях часу; $T_{\text{рем}}$ – сумарний час, витрачений на відновлення працездатності.

Коефіцієнт технічного використання $K_{\text{т.в}}$ - відношення напрацювання виробу за певний період експлуатації до суми напрацювання та часу, витраченого на технічне обслуговування, планові ремонти та непланове відновлення за той же період експлуатації. Розраховують $K_{\text{т.в}}$ за формулою

$$K_{\text{ти}} = \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + T_{\text{рем}} + T_{\text{ТО}}} \quad (1.39)$$

де $T_{\text{ТО}}$ – сумарний час, витрачений на технічне обслуговування (ТО).

Метод інтегральних рівнянь застосовують для розрахунку надійності систем незалежно від виду розподілу часу безвідмовної роботи та часу відновлення. Показники надійності визначають шляхом складання та розв'язання інтегральних або інтегро-диференціальних рівнянь. При цьому зазвичай виділяють один або кілька нескінченно малих інтервалів часу, у яких аналізують складні події, що виникають внаслідок взаємодії кількох факторів.

Як приклад використання цього методу можна розглянути розрахунок надійності невідновлюваних технічних систем із резервуванням, за умови:

- індикатор відмови та перемикач є абсолютно надійними;
- резервні елементи не можуть відмовити до моменту включення в роботу;
- ремонт резервної системи під час її функціонування неможливий.

Така резервована система буде безвідмовно працювати протягом часу $(0, t)$ при двох можливих подіях:

- основний елемент не відмовив;

- основний елемент відмовив у момент $\tau < t$, а резервний елемент пропрацював безвідмовно протягом інтервалу (τ, t) . Позначимо можливість першої події $P_1(t)$. Очевидно, що ймовірність появи відмови основного елемента протягом малого інтервалу часу $(\tau, \tau + d\tau)$ дорівнює:

$$\omega_1(\tau) d\tau = -\dot{p}_1(\tau) d\tau \quad (1.40)$$

де $\omega_1(\tau)$ — густина ймовірності моменту i -го відмови. Ймовірність безвідмовної роботи системи за умови, що у момент τ відбулася відмова основного елемента та включився резервний, дорівнює:

$$p_2(t - \tau) \quad (1.41)$$

Таким чином, ймовірність здійснення другої події на інтервалі $(\tau, \tau + d\tau)$ дорівнює:

$$p_2(t - \tau) \cdot \omega_1(\tau) d\tau \quad (1.42)$$

Інтегруючи вираз (5.3) від 0 до t , отримаємо ймовірність здійснення другої події:

$$\int_0^t p_2(t-\tau) \cdot \omega_1(\tau) d\tau \quad (1.43)$$

Очевидно, що ймовірність дубльованої системи з резервом дорівнює сумі ймовірностей здійснення першого та другого подій:

$$p(t) = p_1(t) + \int_0^t p_2(t - \tau) \cdot \omega_1(\tau) d\tau \quad (1.44)$$

Метод диференціальних рівнянь метод заснований на припущенні, що час між відмовами та час відновлення підпорядковуються показовим розподілам. При цьому параметр потоку відмов $\Omega = \lambda = 1/T_{\text{ср}}$, а інтенсивність відновлення $\mu = 1/T_{\text{в}}$, де $T_{\text{ср}}$, $T_{\text{в}}$ – відповідно середній час до відмови та відновлення.

Цей метод може застосовуватися для розрахунку надійності, як систем, що відновлюються, так і не відновлюються. Для використання цього методу необхідно мати математичну модель як безліч станів системи, у яких може перебувати при відмови та відновлення.

Для визначення показників надійності складають систему диференціальних рівнянь для ймовірностей станів, відомих як рівняння Колмогорова. Для мінімізації обчислювальних витрат зазвичай приймають, що:

- відновлення об'єктів, що відмовили, починається негайно;
- кількість можливих відновлень не обмежена;
- засоби контролю вважаються абсолютно надійними.

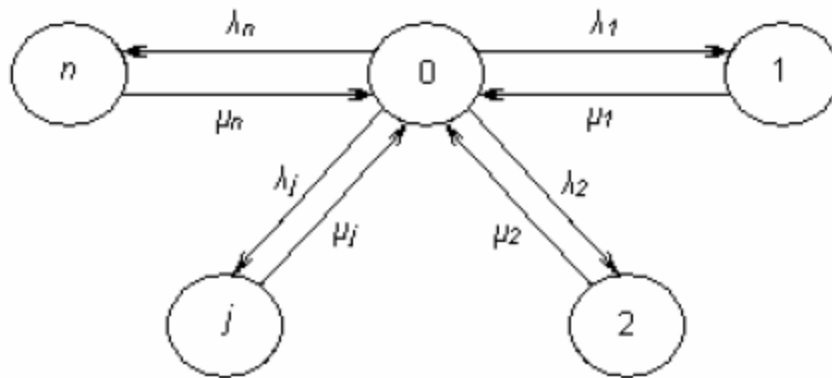


Рисунок 1.11 – Граф (діаграма) станів системи, що відновлюється

Математичну модель представляють у вигляді графа (діаграми) станів. На цьому графі кружечками позначають можливі стани системи при відмовах її елементів, а стрілками показують напрямки переходів системи між станами. Поруч із стрілками вказують інтенсивність переходів, наприклад λ та μ .

Отримана система диференціальних рівнянь доповнюється нормованою умовою:

$$\sum_{j=0}^n P_j(t) = 1 \quad (1.45)$$

де $P_j(t)$ - ймовірність знаходження системи в j -му стані, $n+1$ – кількість можливих станів.

Метод визначення надійності можливих станів системи базується на підході диференціальних рівнянь, де необхідно розв'язати систему лінійних алгебраїчних рівнянь. Структура визначників цієї системи дозволяє сформулювати правило для обчислення показників надійності безпосередньо за графом.

Згідно з цим правилом, для визначення стаціонарної ймовірності перебування системи в j -му стані проходять усі найкоротші шляхи (без повторного проходження) від крайніх станів до стану j за напрямком стрілок і перемножують усі інтенсивності переходів, враховуючи кожен інтенсивність лише один раз. Ймовірність перебування у j -му стані для графів без циклів визначається за формулою:

$$p_j(t) = \frac{\Delta_j}{\sum_{i=0}^K \Delta_i} \quad (1.46)$$

де: Δ_j, Δ_i – добутки інтенсивності переходів з усіх найкоротших станів відповідно в j -е та i -е при русі по найкоротшому шляху у напрямку стрілок;

$(K+1)$ – кількість станів системи.

Найкоротшими вважаються стани, які не мають вихідних стрілок при невідновлюваній системі і мають не більше однієї вихідної стрілки при системі, що відновлюється.

Застосовуючи це правило, можна отримати формулу для коефіцієнта готовності системи без складання та вирішення диференціальних рівнянь.

Проблема мінімізації логічних функцій вирішується на основі застосування законів склеювання та поглинання з наступним перебором одержуваних диз'юнктивних форм та вибором з них оптимальною (мінімальною). Існує велика кількість методів мінімізації логічних функцій.

Функцію розподілу напрацювань до відмови виробів на необмеженому інтервалі $(0, \infty)$ визначають за формулою

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \int_0^t \lambda(x) dx \right] \quad (1.47)$$

де $\lambda(x)$ – інтенсивність відмов,

$$\lambda(x) = \frac{dF(x)}{(1-F(x))dx} \quad (1.48)$$

На практиці функцію розподілу напрацювань повністю розглядають на обмеженому інтервалі $(0, b)$ і нехтують її правим "хвостом" на інтервалі (b, ∞) . При цьому інтеграл у степеню експоненти у формулі (1.8) дорівнює деякому позитивному числу M :

$$\int_0^b \lambda(x) dx = M \quad (1.49)$$

і формула (1.47) набуває вигляду

$$F(t) = 1 - \exp \left[-M \int_0^t f_0(x) dx \right] \quad (1.50)$$

де $f_0(x) = \lambda(x)/M$. Інтеграл у формулі (1.10) збільшується зі збільшенням t і при $t=b$ він дорівнює одиниці. Цей інтеграл є функцією розподілу $F_0(t)$ деякої випадкової величини z , визначеної на інтервалі $(0, b)$, а $f_0(t)$ – щільність її розподілу. Функція розподілу виробів до відмови на інтервалі $(0, b)$ може бути представлена у вигляді

$$F(t) = 1 - \exp[-MF_0(t)] \quad (1.51)$$

Ця функція залежить від двох параметрів: константи M та $F_0(t)$ – функції розподілу випадкової величини z .

Умовна функція розподілу напрацювання до відмови виробу (при умови, що в ньому знаходиться конкретний набір представляє собою розподіл мінімуму фіксованого числа випадкових величин:

$$F_j(t) = 1 - \prod_{i=j} [1 - F_i(t)] \quad (1.52)$$

Імовірності відповідних наборів розподілені за поліноміальному закону.

Безумовну функцію розподілу напрацювання виробів визначають за формулою повної ймовірності:

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^{N+1} [1 - p_i F_i(t)] \quad (1.53)$$

Особливістю формули (1.14) як моделі відмов є те, що до неї входять ймовірності p_i , що характеризують поточний стан технологічного процесу.

Розподіл напрацювання до відмови при малих значеннях ймовірностей

На практиці важливим є випадок, коли ймовірності достатньо незначні та, крім того, вони мають приблизно однакові значення.

Велике значення p_i говорить про те, що даний випадок розглянуто недостатньо докладно і його слід поділити на кілька частин з меншими значеннями ймовірностей (якщо це можливо), або про те, що необхідно забезпечити коригувальні зміни технологічного процесу, що зменшують значення такої ймовірності. Якщо це зробити неможливо, то такий випадок слід віднести до "ідеального" старіння, так як він "блокує" прояв у виробках інших, дрібніших, розвиток процесів деградації яких завершується відмовою виробу при більш тривалих напрацювань.

У роботах [112, 113, 114] застосовували ймовірнісні методи для оцінки оперативної обстановки в зоні відчуження Чорнобильської АЕС. Під оперативною обстановкою в цих дослідженнях розуміли сукупність чинників, що склалися у зоні відчуження протягом 2019 року та впливають на процес реагування на загрози. Одним із ключових чинників вважалася кількість пожежних автомобілів (X), залучених для обслуговування одного виклику. Для характеристики цієї випадкової величини були використані відповідні закони розподілу [115]:

$$P\{X = k\} = a_k \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (1.54)$$

де $P\{X = k\} = a_k$ - ймовірність того, що по виклику виїжджає (k) автоцистерн.

При цьому, повинна виконуватися умова:

$$\sum_{k=1}^{\infty} a_k = 1 \quad (1.55)$$

Другим важливим чинником оперативної обстановки є потік викликів пожежних підрозділів (P), продовж певного проміжку часу. Для опису потоку викликів пожежних підрозділів можливо використати лінійне диференціальне рівняння першого порядку [115]:

$$p_k(\tau) = \frac{(\gamma\tau)^k}{k} e^{-\gamma\tau} \quad (1.56)$$

де γ – параметр, що представляє середнє число викликів в одиницю часу;

τ – проміжок часу;

k – кількість викликів пожежних підрозділів.

Визначення потоку викликів пожежних підрозділів за певний проміжок часу можливо за допомогою закону Пуассона [115]:

$$M(P) = \gamma\tau \quad (1.57)$$

Рівняння (1.57) означає, що якщо випадкова величина P розподілена по закону Пуассона, то її математичне очікування $M(P)$ і дисперсія дорівнюють $\gamma\tau$.

Також існує комплексний критерій для оцінювання ефективності технічних систем. Комплексний критерій можна виразити у вигляді нерівності:

$$L = a_1Q + a_2E + a_3H + a_4P + a_5S + a_6C \quad (1.58)$$

де Q – оперативність;

E – ефективність;

H – перешкодостійкість;

P – надійність;

S – площа обслуговування;

C – економічна доцільність;

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ – відповідні коефіцієнти регресії, які встановлюють значущість кожного із перелічених факторів.

В новітніх дослідженнях використовуються різні підходи та методи щодо оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту та індивідуального пожежного ризику. Зокрема застосовні методи, що засновані на оцінці індексу ризику, як інструмент для оцінки пожежної безпеки в будівлях [116]. У роботах [117, 118] для оцінки пожежних ризиків використані статистично-ймовірнісні методи, як інструмент оцінки сталого розвитку політики управління пожежною безпекою в розумних містах та в умовах забудованого середовища на

основі статистичних даних та швидкому їх обробляння та аналізуванню, а також на основі результатів даних опитувань, наприклад забудовників.

В роботах [119-125] представлені дослідження, метою яких було проведення аналізування існуючих методів оцінювання пожежних ризиків, зокрема індивідуального пожежного ризику.

Ряд вчених працюють над теоретичними основами проектування пожежної безпеки із використанням ризик-орієнтованого підходу. Так у своїх роботах вони зазначають перспективу таких методів, як найбільш рушійного методу превентивних заходів виникнення та масштабного розвитку пожеж [126, 127]. У роботі [128] показано важливість етапу технічного обслуговування систем протипожежного захисту на їх ефективність.

У роботах [129, 130] зазначається, що важливим елементом з якого повинна розпочинатися процедура оцінювання будь-якого ризику, в тому числі пожежного, зокрема індивідуального пожежного ризику повинна розпочинатися з етапу ідентифікації ризику.

Деякі автори зазначають певні недоліки у використанні ризик-орієнтованого підходу під час оцінки рівня пожежної безпеки. Зокрема, зазначають, про наявність певних невизначеностей у вихідних даних під час оцінювання, що може знизить ефективність використання такого підходу або вплинути на достовірність отриманих даних [131]. У роботі [132] запропоновано алгоритм використання штучного інтелекту для оцінки пожежних ризиків. А у дослідженні [133] наведені розрахункові методи та розрахункові системи для прогнозування та дослідження поведінки лісових пожеж.

В таблиці 1.3 приведено результати аналізу кожного із вище розглянутих теоретичних методів аналізування ефективності технічних систем.

Таблиця 1.3 – Результати аналізу теоретичних методів аналізування ефективності технічних систем

Назва методу	Переваги	Недоліки
Ймовірнісний розподіл	Дозволяє оцінювати ефективність як системи в цілому так і її окремих компонентів	Складний у використанні. Трудомісткий. Потребує наявності детальних статистичних даних
Біноміальний розподіл	Простота у використанні, не трудомісткий. Передбачає поділ системи на не велику кількість суттєвих елементів.	Передбачає можливість наявності несправного елемента в технічній системі, що зумовлює появу розрахункової похибки.
Нормальний розподіл	Базується на доступних статистичних даних щодо відмов у технічній системі	Оцінює лише один елемент технічної системи, який згідно із статистичними даними найбільш часто є несправним
Логарифмічно-нормальний розподіл	Передбачає металізування системи на найпростіші в тому числі не суттєві елементи.	Не завжди втрата працездатності окремого елемента призводить до виходу із ладу системи в цілому, зазначену подію даний метод не враховує, що зумовлює похибки під час його використання
Експоненціальний розподіл	Дозволяє запобігти настанню несправностям в технічній системі	Має низькі економічні показники оскільки може визначати несправними елементи, які ще функціонують; не дає можливість встановити показник функціональної ефективності системи, а лише функціонує як «справність-несправність технічної системи»
Розподіл Вейбула	Є універсальним, оскільки описує процеси з розподілами: нормальним, логарифмічно-нормальним, експоненціальним	Має аналогічні недоліки розподілів: нормального, логарифмічно-нормального, експоненціального

За результатами проведених аналітичних досліджень встановлено, що оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту може здійснюватися за допомогою детерміністичних підходів, що базуються на теорії ймовірності, зокрема ймовірнісно-статистичних методів, із подальшою перевіркою отриманих результатів шляхом експерименту або підконтрольного експлуатування.

Ефективність функціонування таких систем може оцінюватися як окремо для кожної системи протипожежного захисту, так і комплексно для їхніх комбінацій із врахуванням синергетичного ефекту від спільної дії.

1.5. Висновки до розділу 1

Оцінювання індивідуального пожежного ризику для конкретного об'єкта здійснюється за допомогою розрахункового методу, визначеного у [2]. Відповідно до цього стандарту, вплив систем протипожежного захисту на величину індивідуального пожежного ризику враховується через ймовірність їх ефективного спрацювання. Значення таких ймовірностей визначається на основі технічної документації щодо ймовірності безвідмовної роботи систем. На практиці такі дані часто відсутні, тому стандарт допускає приймати ймовірність ефективного спрацювання кожної системи на рівні 0,5. Прийняття такого значення носить експертний характер і не має надійного наукового обґрунтування, а також не враховує особливості функціонування кожної окремої системи.

Наслідком цього є похибка при визначенні розрахункового значення індивідуального пожежного ризику, яка зумовлена неврахуванням фактичного впливу окремих систем протипожежного захисту або їхніх комбінацій на виникнення та розвиток пожежі, евакуацію людей і діяльність пожежно-рятувальних підрозділів. Існуючі підходи дозволяють враховувати лише окремі системи індивідуально, не забезпечуючи оцінку їхньої спільної дії. Аналіз функцій і завдань різних систем протипожежного захисту, а також узагальнення статистичних даних про їхнє функціонування, свідчить, що окремі системи впливають на рівень індивідуального пожежного ризику по-різному, а їхня спільна дія супроводжується синергетичним ефектом.

У зв'язку з цим запропоновано вдосконалену структурну схему систем протипожежного захисту, яка враховує рівні їх впливу на кількісне значення індивідуального пожежного ризику. Це створює умови для подальшого розвитку

методів оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням ефекту функціонування систем протипожежного захисту.

Аналіз нормативних документів, літературних джерел та зарубіжного досвіду показав, що на сьогодні досить широкого розвитку набула теоретична база щодо оцінювання ефективності функціонування та надійності різних технічних систем, окремих їх компонентів, технічних пристроїв та елементів, які як правило базуються на теорії ймовірності із використанням статистичної бази даних, або методи, що засновані на використанні польових моделей і реалізуються у сукупності із сучасними комп'ютерними розрахунковими комплексами.

Зазначені математичні моделі дозволяють оцінювати ефективність та надійність інженерних та технічних систем як індивідуальної так і у разі їх спільної дії. При цьому, приведений перелік показників надійності, які використовувалися різними вченими під час оцінювання ефективності та надійності інженерних та технічних систем та математичні моделі їх оцінки. Разом із цим на сьогоднішній день не дослідженими залишаються питання оцінювання впливу ефективності функціонування систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику, що обумовлює актуальність вибраного напрямку досліджень.

З урахуванням викладеного, проведення досліджень, спрямованих на обґрунтування впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику є актуальною науковою задачею, розв'язання якої дасть можливість удосконалити метод оцінювання індивідуального пожежного ризику.

Об'єктом досліджень є функціонування систем протипожежного захисту в умовах пожежі.

Предметом досліджень є вплив ефективності спрацювання систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику.

Метою досліджень є виявлення закономірності впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного

ризиків як наукового підґрунтя для удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- 1) Проаналізувати сучасний стан щодо впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику;
- 2) Обґрунтувати критерії впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику;
- 3) Обґрунтувати математичні моделі для дослідження закономірності впливу ефективності функціонування систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику та здійснити їх перевірку;
- 4) Обґрунтувати вплив систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику;
- 5) Дослідити закономірності впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику;
- 6) Розробити пропозиції щодо удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА ІНДИВІДУАЛЬНИЙ ПОЖЕЖНИЙ РИЗИК

У цьому розділі представлені результати щодо розв'язання другого та третього завдання дослідження, а саме обґрунтування критеріїв впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику та обґрунтування математичних моделей для дослідження закономірності впливу ефективності функціонування систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику.

2.1 Критерії для дослідження впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик

У розділі 1 зазначено, що при визначенні надійності та працездатності будь-якої технічної системи в дослідженнях та нормативних документах застосовуються різні комбінації показників, які відображають процеси її надійного функціонування. До основних показників належать безвідмовність, ефективне функціонування, довговічність, збереження та ремонтпридатність.

Показник безвідмовності визначається через такі критерії, як ймовірність безвідмовної роботи, відсоток наробітку, середнє напрацювання до відмови та інтенсивність відмов. Цей показник є ключовим при оцінюванні впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик, оскільки дозволяє кількісно визначити ймовірність спрацювання або неспрацювання конкретної системи.

Показник ефективного функціонування відображає кількісний вплив роботи певної системи протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику. Він визначається як співвідношення індивідуального пожежного ризику без функціонування системи до ризику з її функціонуванням. Цей показник дозволяє оцінити ефективність спрацювання системи.

Показник довговічності характеризується середнім терміном служби об'єкта. Хоча цей показник безпосередньо не впливає на оцінку індивідуального пожежного ризику, він пов'язаний із показником безвідмовності.

Показник збереження визначається терміном зберігання виробу і, подібно до довговічності, не має прямого впливу на оцінку індивідуального пожежного ризику, але взаємозв'язаний із безвідмовністю системи.

Показник ремонтпридатності включає ймовірність відновлення та середній час відновлення після відмови. Він не впливає безпосередньо на значення індивідуального пожежного ризику, однак також пов'язаний із безвідмовністю системи.

Згідно з [2], індивідуальний пожежний ризик визначається як кількісна характеристика ймовірності реалізації пожежної небезпеки, що може призвести до загибелі людини внаслідок впливу небезпечних чинників пожежі.

Відповідно до цього стандарту, розрахункове значення індивідуального пожежного ризику $R_{I,i}$ визначається за формулою:

$$R_{I,i} = Q_{п,i} \cdot P_{пр,i} \cdot (1 - P_{е,i}) \cdot (1 - K_{спз,i}) \cdot (1 - K_{о.з.}) \cdot (1 - K_{п.ф.}), \quad (2.1)$$

де $Q_{п,i}$ – частота виникнення пожежі в будівлі чи споруді впродовж року, що визначається на підставі статистичних даних;

$P_{пр,i}$ – ймовірність перебування людей у будівлі чи споруді, що визначається співвідношенням: $P_{пр,i} = t_{функц,i} / 24$, де $t_{функц,i}$ – термін перебування людей у будівлі в годинах. Значення параметра $P_{пр,i}$ приймається рівним $P_{пр,i} = 0,33$ при функціонуванні будівлі впродовж 8 годин і п'ятиденному робочому тижні та $P_{пр,i} = 1,0$ при цілодобовому функціонуванні будівлі впродовж тижня;

$P_{е,i}$ – ймовірність евакуації людей із будівлі чи споруди;

$K_{спз,i}$ – коефіцієнт, ймовірної ефективності спрацювання систем протипожежного захисту;

$K_{о.з.}$ – коефіцієнт запровадження організаційних заходів протипожежного захисту;

$K_{п.ф.}$ – коефіцієнт наявності протипожежних формувань.

Отже, такі параметри, як частота виникнення пожежі, ймовірність перебування людей у будівлі чи споруді, ймовірність евакуації людей, коефіцієнт впровадження організаційних заходів протипожежного захисту та коефіцієнт наявності протипожежних формувань у контексті індивідуального пожежного ризику взаємопов'язані з коефіцієнтом ймовірної ефективності спрацювання систем протипожежного захисту.

Аналіз кожного з цих параметрів дозволяє зробити такі узагальнення:

Частота виникнення пожежі залежить від ефективності функціонування систем протипожежного захисту та виступає лише як елемент перевірки впливу системи на наслідки пожежі. Тому для кількісного визначення впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик використання цього параметра є недоцільним.

Ймовірність перебування людей у будівлі чи споруді визначається тривалістю їх можливого перебування. Хоча цей параметр пов'язаний з коефіцієнтом ймовірної ефективності спрацювання систем через значення індивідуального пожежного ризику, прямого критерію взаємозв'язку між ними не існує. Тому його також не доцільно використовувати для кількісного обґрунтування впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик.

Ймовірність евакуації людей із будівлі чи споруди залежить від співвідношення трьох часових проміжків: тривалості евакуації людей у разі пожежі, часу початку евакуації та часу настання критичних значень небезпечних чинників для життя людини.

Ймовірність евакуації людей P_e із будівлі чи споруди розраховують за формулою:

$$P_e = \begin{cases} 0,999 \cdot \frac{0,8 \cdot t_{\text{бл}} - t_p}{t_{\text{пе}}}, & \text{якщо } t_p < 0,8 \cdot t_{\text{бл}} < t_p + t_{\text{пе}} \text{ та } t_{\text{ск}} \leq 6 \text{ хв} \\ 0,999, & \text{якщо } t_p + t_{\text{пе}} \leq 0,8 \cdot t_{\text{бл}} \text{ та } t_{\text{ск}} \leq 6 \text{ хв} \\ 0,000, & \text{якщо } t_p \geq 0,8 \cdot t_{\text{бл}} \text{ або } t_{\text{ск}} > 6 \text{ хв} \end{cases} \quad (2.2)$$

де t_p – розрахункова тривалість евакуації людей, хв;

$t_{\text{пе}}$ – тривалість початку евакуації (інтервал тривалості від виникнення пожежі до початку евакуації людей), хв;

$t_{\text{бл}}$ – тривалість блокування шляхів евакуації (інтервал тривалості від початку пожежі до блокування евакуаційних шляхів у результаті поширення на них НЧП, що мають гранично допустимі для людей значення), хв;

$t_{\text{ск}}$ – тривалість існування скупчень людей на i -ій ділянці.

Тривалість евакуації людей у разі пожежі визначається об'ємно-планувальними характеристиками будівлі або споруди, зокрема довжиною та шириною евакуаційних шляхів, кількістю виходів, а також чисельністю людей, які перебувають у приміщенні та підлягають евакуації. На цей параметр ефективність спрацювання систем протипожежного захисту безпосередньо не впливає.

Тривалість початку евакуації залежить від наявності автоматичних систем пожежної сигналізації та систем оповіщення про пожежу й управління евакуацією, а також від інерційності їх спрацювання. Отже, цей параметр прямо пов'язаний з ефективністю роботи зазначених систем протипожежного захисту.

Час настання критичних значень небезпечних чинників для життя людини визначається як об'ємно-планувальними характеристиками об'єкта (площа, висота, тип планування: коридорне, атріуми, об'єднані простори), так і конструктивно-технологічними особливостями (пожежна безпека матеріалів, вид і кількість пожежного навантаження – постійного та тимчасового). На цей проміжок часу впливають такі системи протипожежного захисту, як автоматичних системи пожежогасіння, внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопостачання, а також системи протидимного захисту шляхів евакуації та приміщень.

Таким чином, тривалість настання критичних значень для життя людини безпосередньо залежить від ефективності спрацювання систем протипожежного захисту і може бути використана при оцінюванні їхнього впливу на індивідуальний пожежний ризик. Стандарт [2] визначає перелік небезпечних чинників пожежі, що включає: полум'я та іскри, підвищену температуру оточуючого середовища,

токсичні продукти згоряння і термічного розкладу, дим, знижену концентрацію кисню. Для кожного з цих чинників встановлені гранично допустимі значення:

- за підвищеною температурою – 60 °С;
- за тепловим потоком – 2500 Вт/м²;
- за втратою видимості – 20 м (у разі, коли обидва горизонтальні лінійні розміри приміщення менше 20 м, гранично допустиму відстань щодо втрати видимості слід приймати рівною найбільшому горизонтальному лінійному розміру);
- за зниженим вмістом кисню – 0,226 кг/м³;
- за кожним з токсичних газоподібних продуктів згоряння (CO₂ – 0,11 кг/м³; CO – 1,16·10⁻³ кг/м³; HCL – 23·10⁻⁶ кг/м³).

За досвіду проведених численних розрахунків [134, 135, 136] встановлено, що найбільш швидким по настанню визначених вище гранично допустимих значень є критерій втрати видимості. Тому із зазначених небезпечних чинників пожежі саме критерій втрати видимості використовуємо в подальших наших дослідженнях.

Параметри, такі як коефіцієнт запровадження організаційних заходів протипожежного захисту та коефіцієнт наявності протипожежних формувань, залежать від організації виконання встановлених вимог пожежної безпеки керівником суб'єкта господарювання та створення ним на об'єкті відповідних протипожежних формувань [137]. Хоча ці коефіцієнти пов'язані з коефіцієнтом ймовірної ефективності спрацювання систем протипожежного захисту через значення індивідуального пожежного ризику, на прямому рівні взаємозалежності між ними немає. Тому для кількісного визначення впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик використання цих коефіцієнтів не доцільне.

З огляду на перелік систем протипожежного захисту, наведених у розділі 1.2, на значення індивідуального пожежного ризику безпосередньо впливають такі системи: системи пожежної сигналізації, системи оповіщення про пожежу та управління евакуацією людей, автоматичної системи пожежогасіння, системи протидимного захисту. У структурній схемі систем протипожежного захисту з урахуванням рівнів впливу на кількісне значення індивідуального пожежного

ризик у ці системи віднесені до II рівня. Додатково на індивідуальний пожежний ризик впливає ефективне функціонування систем внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопостачання.

Згідно із [2] значення коефіцієнту ймовірної ефективності спрацювання систем протипожежного захисту ($K_{спз}$) розраховується за формулою:

$$K_{спз} = (1 - K_{спс}) \cdot (1 - K_{аспг}) \cdot (1 - K_{пв}) \cdot (1 - K_{спс} \cdot K_{со}) \cdot (1 - K_{снс} \cdot K_{сндз}), \quad (2.3)$$

де: $K_{спз}$ – ймовірність ефективного спрацювання системи пожежної сигналізації;

$K_{аспг}$ – ймовірність ефективного спрацювання автоматичних систем пожежогасіння;

$K_{пв}$ – ймовірність ефективного спрацювання систем внутрішнього і зовнішнього водопостачання;

$K_{со}$ – ймовірність ефективного спрацювання систем керування евакуюванням (в частині систем оповіщення про пожежу і показників напрямку евакуювання);

$K_{сндз}$ – ймовірність ефективного спрацювання систем протидимного захисту.

Значення ймовірностей ефективного спрацювання кожної системи протипожежного захисту визначаються на основі технічної документації щодо ймовірності безвідмовної роботи. У разі відсутності таких даних допускається приймати ймовірність ефективного спрацювання кожної системи рівною 0,5.

Якщо відповідна система протипожежного захисту відсутня, її ймовірність ефективного спрацювання приймається рівною нулю.

Таким чином, системами протипожежного захисту, які безпосередньо впливають на значення індивідуального пожежного ризику є: система пожежної сигналізації, система оповіщення про пожежу та управління евакуацією людей, системи внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопостачання, а також система протидимного захисту. Важливими показниками надійності цих систем під час оцінювання їхнього впливу на індивідуальний пожежний ризик є безвідмовність та ефективність функціонування.

При цьому показники надійності можна виражати через тривалість досягнення граничного стану небезпечним чинником пожежі, таким як втрата видимості. Порівняння результатів здійснюється для двох варіантів: оцінювання індивідуального пожежного ризику з функціонуванням відповідної системи протипожежного захисту та без її впливу.

У таблиці 2.1 наведено перелік систем протипожежного захисту, які впливають на індивідуальний пожежний ризик, та ймовірностей ефективного їх спрацювання, значення яких підлягають визначенню у подальших дослідженнях.

Таблиця 2.1 – Значення ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту

Вид системи протипожежного захисту	Значення ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту
Система пожежної сигналізації	потребує дослідження
Автоматична система пожежогасіння	потребує дослідження
Система внутрішнього і зовнішнього протипожежного водопостачання	потребує дослідження
Система керування евакуюванням (в частині систем оповіщення про пожежу і показників напрямку евакуювання)	потребує дослідження
Система протидимного захисту	потребує дослідження

Як було зазначено раніше, для оцінки впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик необхідно порівняти два сценарії: перший сценарій передбачає виникнення пожежі без функціонування відповідної системи протипожежного захисту, при цьому кількісно оцінюються наслідки пожежі; другий сценарій передбачає виникнення пожежі з ефективним спрацюванням системи, і також оцінюються наслідки. Порівняння результатів за двома сценаріями дозволяє визначити ймовірності ефективного спрацювання відповідних систем.

Детальніше розглянемо кожний із варіантів для окремих систем протипожежного захисту.

Варіант I: пожежа відбувається за відсутності функціонування систем протипожежного захисту

Система пожежної сигналізації та система оповіщення про пожежу та управління евакуацією людей

Порівняльним критерієм є час, коли люди виявляють пожежу та починають процес евакуації. В якості граничного критерію приймають втрату видимості на рівні 1,7 м від підлоги. Час виявлення визначають як момент появи ознак пожежі (диму) у суміжному приміщенні відносно приміщення з модельним вогнищем, на висоті нижче підвісної стелі, що дозволяє легко спостерігати дим. Простір над підвісною стелею приймається спільним для обох приміщень.

Автоматична система пожежогасіння.

Порівняльним критерієм є зміна показника видимості в приміщенні з модельним вогнищем та у суміжному приміщенні.

Системи внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопостачання

Ефективність цих систем доцільно прирівняти до системи пожежної сигналізації та системи оповіщення, оскільки їхнє функціонування без оператора в автоматичному режимі неможливе. Обслуговуючий персонал може приступити до гасіння лише після отримання сигналу про пожежу.

Варіант II: пожежа відбувається за умови ефективного функціонування систем протипожежного захисту. Система пожежної сигналізації та система оповіщення про пожежу та управління евакуацією людей.

Порівняльним критерієм є час виявлення пожежі людьми та початок процесу евакуації. Для визначення часу виявлення слід брати момент спрацювання зазначених систем та подачі сигналу тривоги. Сигнал тривоги вводиться за алгоритмом «і» – спрацювання пожежного сповіщувача у приміщенні з модельним вогнищем пожежі і у просторі над підвісною стелею.

Автоматична система пожежогасіння.

Порівняльним критерієм є зміна показника видимості як у приміщенні з модельним вогнищем пожежі, так і у суміжному приміщенні.

На основі цих положень розроблено опис сценаріїв розвитку пожеж, які дозволяють досліджувати залежність значення індивідуального пожежного ризику від ефективного функціонування систем протипожежного захисту (див. таблицю 2.2). Вибір зазначених сценаріїв є обов'язковим під час постановки розрахункової задачі та під час експериментальних досліджень [138, 139].

Таблиця 2.2 – Опис сценаріїв розвитку пожеж під час, яких доцільно досліджувати залежності значення індивідуального пожежного ризику від ефективного функціонування систем протипожежного захисту

№ п/п	Сценарій пожежі	Критерій для дослідження
1	Система пожежної сигналізації, система оповіщення про пожежу та управління евакуацією людей, системи зовнішнього та внутрішнього протипожежного водопостачання	Час виявлення людьми пожежі та початок процесу евакуації. Без системи – ознаки пожежі фіксують у суміжному приміщенні, із приміщенням розташування осередку пожежі, нижче рівня підвісної стелі.
2	Автоматична система пожежогасіння	Зміна показника видимості в часі. Даний показник видимості фіксується на рівні 1,7 м від рівня приміщення у двох частинах випробувального боксу. Здійснюється порівняння закономірності зміни зазначеного показника для варіанту функціонування автоматичної системи пожежогасіння та у випадку її не функціонування

Отже, ключовими показниками надійності при оцінюванні впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик є безвідмовність та ефективність функціонування цих систем. Ці показники доцільно виражати через час досягнення граничних значень небезпечних чинників пожежі для людини, найшвидшим із яких є втрата видимості, яка оцінюється за допомогою коефіцієнта задимленості. Разом із показником критичної для життя людини температури ці критерії слугують основою для подальших досліджень [140].

Визначено перелік систем протипожежного захисту, що впливають на індивідуальний пожежний ризик: системи пожежної сигналізації, системи оповіщення та управління евакуацією людей, автоматичні системи пожежогасіння та системи протидимного захисту. Згідно зі структурною схемою систем із урахуванням рівнів їх впливу на індивідуальний пожежний ризик, вони належать до систем II рівня. Додатково на ризик впливає ефективне функціонування систем внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопостачання.

Обґрунтовано, що оцінювання ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту, який визначає їх кількісний вплив на індивідуальний пожежний ризик, доцільно проводити шляхом порівняння двох сценаріїв розвитку пожежі: із функціонуванням відповідної системи та без її участі.

2.2 Математична модель для дослідження закономірності впливу ефективності функціонування систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику

2.2.1 Імовірісно-статистична математична модель

У роботах [141–143] ризик визначається як добуток ймовірності настання небезпечної події та середнього збитку від неї. При цьому як зарубіжні, так і вітчизняні дослідження з проблематики ризиків і безпеки спираються на єдиний формалізований підхід до оцінювання ризику [144], який можна виразити рівнянням:

$$R=P \cdot U \quad (2.4)$$

де P – ймовірність настання небезпечної події;

U – математичне очікування (середнє значення) збитку від такої події.

Із рівняння (2.4) значення ймовірності настання такої небезпечної події, як гибель людини від пожежі можна визначити із наступного рівняння:

$$P_i=(1-P_e) \cdot (1-P_{пз}) \quad (2.5)$$

де P_e – ймовірність успішної евакуації людей в безпечне місце;

$P_{пз}$ – ймовірність ефективної роботи систем протипожежного захисту.

Виходячи з рівняння (2.5), системи протипожежного захисту виступають одним із числових параметрів, що використовуються при оцінюванні індивідуального пожежного ризику. Ймовірність ефективного функціонування окремих елементів таких систем можна представити як відношення значення індивідуального пожежного ризику для об'єкта без відповідної системи протипожежного захисту R_6 до значення індивідуального пожежного ризику для об'єкта, оснащеного цією системою R_c , що формалізується наступною залежністю:

$$K_{\text{спз},i} = R_6 / R_c, \quad (2.6)$$

Значення індивідуального пожежного ризику R_6 та R_c можна визначити двома способами: через польову модель або за допомогою ймовірнісно-статистичних методів із використанням наявних статистичних даних. З двох отриманих значень ймовірної ефективності спрацювання систем протипожежного захисту обирається те, яке відповідає найменшому зниженню рівня індивідуального пожежного ризику, і саме воно використовується для подальшої апробації.

Застосовні в даному випадку методи теорії ймовірності викладені у роботах [145-147] та базуються на використанні рівняння:

$$R_{6,c} = N_{\text{п}} / N_{\text{ум}}, \quad (2.7)$$

де $N_{\text{п}}$ – кількість відтворювань небезпечної події при певних умовах;

$N_{\text{ум}}$ – повторюваність заданих умов.

Для реалізації рівняння (2.7) необхідна достовірна статистика пожеж та фактів спрацювання наявних на об'єкті систем протипожежного захисту, при цьому з чітким розмежуванням об'єктів, на яких відсутні системи протипожежного захисту або вони перебувають у несправному стані та об'єктів, які оснащені системами протипожежного захисту. Як правило, такі статистичні дані відсутні, тому оцінювання індивідуального пожежного ризику для двох випадків типових об'єктів із використанням зазначеного підходу теоретично має місце, але фактично на сьогодні не реалізовано.

В роботах [148-150] наведені методичні підходи, які встановлюють порядок розрахунку показників надійності роботи систем оповіщення про пожежу та управління евакуацією людей під час пожежі. Основу зазначених методичних підходів складають: аналіз показників надійності в результаті порівняння різних варіантів технічних рішень та вибір окремого варіанта, що найбільше задовольняє заданим вимогам щодо заданих показників надійності. Для оцінювання надійності в даних роботах використовуються ймовірнісні характеристики функціонування

окремої системи від початку експлуатації до першої технічної відмови. Розподіл ймовірності першої технічної відмови можна описати рівнянням:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (2.8)$$

де $f(t)$ – функція розподілу ймовірності першої технічної відмови;

λ – інтенсивність технічних відмов;

t – функція надійності безвідмовної роботи.

У роботі [151] зазначено, що інтенсивність технічних відмов окремої системи протипожежного захисту (λ) можна визначити за формулами:

$$\lambda = \sum \lambda_i \quad (2.9)$$

$$i = 1/T_o \quad (2.10)$$

де T_o – тривалість функціонування системи від початку експлуатації до першої технічної відмови;

i – інтенсивність технічних відмов i -го елемента системи протипожежного захисту.

2.2.2 Польова математична модель

Для оцінки передачі тепла від полум'я пожежі до конструкційних елементів або матеріалів суміжних будівель доцільно застосовувати чисельну гідродинамічну модель тепломасопереносу під час горіння. Вона забезпечує розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса для низькошвидкісних потоків з температурною залежністю, зосереджуючи особливу увагу на процесах теплопередачі під час пожежі.

Модель складається зі системи диференціальних рівнянь із частинними похідними для збереження маси, імпульсу та енергії [152, 153], і вирішується на тривимірній регулярній сітці. Теплове випромінювання враховується методом кінцевих об'ємів на тій самій сітці.

Вона описує просторово-часовий розподіл температури, швидкостей газового середовища (кисню, продуктів горіння), тисків та густин. Рівняння збереження маси формулюється через густину

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = \dot{m}_b^m, \quad (2.11)$$

де t – час; ρ – 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 2.11 можна записати для індивідуальних газових компонентів (закон збереження окремих компонентів), в такому випадку воно набуває вигляду:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_a) + \nabla \cdot \rho Y_a u = \nabla \cdot \rho D_a \nabla Y_a + \dot{m}_a^m + \dot{m}_{b,a}^m, \quad (2.12)$$

де Y_a – концентрація a -го компонента реакції горіння, D_a – дифузійний коефіцієнт a -го компонента $D_a = \frac{\mu_a}{\rho S_{ct}}$, μ_a – молекулярна динамічна в'язкість a -го компонента, S_{ct} – турбулентне число Шмідта

Рівняння збереження імпульсу записується як:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot \rho u u + \nabla p = \rho g + f_b + \nabla \cdot \tau_{ij}, \quad (2.13)$$

де p – тиск, f_b – зовнішня сила, наприклад, такі як опір руху через каплі рідини, τ_{ij} – тензор напруги визначається за формулою

$$\tau_{ij} = \mu(2S_{ij} - \frac{2}{3}\delta_{ij}(\nabla \cdot u)); \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (2.14)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2.15)$$

де S_{ij} - симетричний тензор швидкості деформації, μ – молекулярна динамічна в'язкість

Рівняння збереження енергії може бути виражене через ентальпію (h_s)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s u = \frac{D_p}{D_t} + \dot{q}^m - \dot{q}_e^m - \nabla \dot{q}^n - \varepsilon, \quad (2.16)$$

де h_s – ентальпія є функцією температури $h_s = \sum_a Y_a h_{s,a}$, $h_{s,a}(T) = \int_{T_0}^T C_{p,a}(T') dT'$

$$\frac{D_p}{D_t} = \frac{dp}{dt} + u \nabla p \quad (2.17)$$

$\dot{q}^m$ - швидкість виділення тепла на одиницю об'єм із хімічної реакції;

$\dot{q}_e^m$ - витрачена енергія на випаровування крапель;

$\dot{q}^n$ - конвективні та радіаційні теплові потоки;

ε - енергія розсіювання $\varepsilon = \tau_{i,j} \nabla u = \mu (2S_{i,j} S_{i,j} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u)^2)$.

Конвективні та радіаційні теплові потоки ($\dot{q}^n$) можна визначити за рівнянням

$$\dot{q}^n = -k \nabla T - \sum_a h_{s,a} \rho D_a \nabla Y_a + \dot{q}_r^n, \quad (2.18)$$

де k – теплопровідність.

Рівняння стану газу можна записати у вигляді:

$$p = \frac{\rho RT}{W} \quad (2.19)$$

де R – універсальна газова стала.

Розв'язання описаної математичної моделі теплообміну між об'єктами під час пожежі в рамках газодинаміки може бути виконане за допомогою програмного комплексу Fire Dynamics Simulator (FDS). Для відображення та візуалізації результатів моделювання використовується додаткове програмне забезпечення Smokeview (SMV) [154–161].

Основу алгоритму становить схема методу предиктора-коректора другого порядку точності щодо координат, температури та часу.

Модель горіння

Рівняння, що описують горіння у двофазному потоці повітря й часток рідкого палива. Горіння представляє узагальнена хімічна вуглеводнева формула $C_xH_yO_z$ (C_6H_6O). Теплоту згорання рідкого палива визначають за такою формулою:

$$LHV_{liq, fuel} = h_{liq, fuel}^0 - h_{CO_2}^0 \frac{44x}{12x + y + 16z} - h_{H_2O}^0 \frac{9y}{12x + y + 16z}, \quad (2.20)$$

де $h_{lic, fuel}^0$, $h_{CO_2}^0$, $h_{H_2O}^0$ – теплоти утворення, вуглекислого газу й води;

x , y , z – стехіометричні коефіцієнти для гасу, що дорівнюють відповідно 6, 6 і 0.

Газова фаза являє собою суміш із п'яти газів, тому основна система рівнянь 2.11, 2.13, 2.15 доповнена ще п'ятьма рівняннями для кожного зі складників суміші газів: летких $C_xH_yO_z$, O_2 , N_2 , H_2O і CO_2 , що мають вигляд:

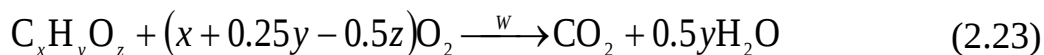
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) + \nabla(\rho u Y_k) = \nabla \left(\left(\rho D_i + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_k \right) + Q_i^P + Q_i^{chem}, \quad (2.21)$$

де Q_i^{chem} - дорівнює швидкості бруutto-реакції газофазного горіння для першого рівняння летких, для інших – рівний нулю.

$$Q_i^P = \sum_j (m_{i,in} - m_{i,out}) \frac{N_{pj}}{\Omega_{cell}} \quad (2.22)$$

де індекс i стосується газового компонента, а індекс j – відповідної траєкторії частки; N_{pj} – число часток, що пролітають за секунду по траєкторії; Ω_{cell} – об'єм розрахункового осередку.

Модель горіння визначають й витратами палива, окисника і продуктів згорання. Кількісні співвідношення визначені за узагальненим хімічним рівнянням:



Швидкість реакції W визначають за стехіометричним коефіцієнтом:

$$i_{chem} = \frac{32(x + 0.25y - 0.5z)}{12x + y + 16z} \quad (2.24)$$

Граничні умови

Оскільки диференціальні рівняння газодинамічної моделі описують процеси теплопередачі в загальному вигляді, для повного математичного опису конкретного розглядуваного процесу до них додають опис усіх його особливостей. Такі характеристики, що в поєднанні з диференціальними рівняннями забезпечують повний опис процесу передачі тепла, називають граничними умовами. Вони можуть включати:

- геометричні умови, що визначають форму та розміри об'єктів дослідження;
- фізичні умови, які характеризують властивості матеріалів об'єктів;

- початкові умови, що описують початковий розподіл температур у об'єкті;
- умови взаємодії об'єкта з навколишнім середовищем.

Основним завданням під час розробки математичної моделі є максимально точне відтворення параметрів моделі відповідно до реальних умов процесу та взаємозв'язків між об'єктами, що беруть у ньому участь, зокрема: об'ємно-планувальні та конструктивні рішення, геометричні розміри та масштабування об'єктів, характеристики матеріалів, параметри навколишнього середовища, пожежне навантаження та реакція матеріалів на горіння, сценарії виникнення та розвитку пожежі, наявність або відсутність систем протипожежного захисту.

При математичному описанні геометричних граничних умов задають форму та лінійні розміри об'єкта у масштабі місцевих умов і враховують відстані між об'єктами.

Фізичні граничні умови визначають фізичні параметри об'єкта та характеристики пожежної навантаги.

Початкові граничні умови включають опорну точку, до якої прив'язується система координат (x , y , z – ширина, довжина, висота) для встановлення початкового розподілу температури в об'єкті. В загальному вигляді початкові умови можна представити як:

$$t = f(x, y, z) \quad (2.25)$$

Під час рівномірного розподілу температури початкові умови (при $\tau=0$) мають такий математичний вигляд:

$$t = t_0 = \text{const} \quad (2.26)$$

Граничні умови, що характеризують взаємодію об'єкта дослідження із навколишнім середовищем можуть бути задані декількома способами.

Граничні умови першого роду. Задається розподіл температури на поверхні тіла для кожного моменту часу:

$$\Theta_c = f(x, y, z, \tau), \quad (2.27)$$

де Θ_c - температура на поверхні тіла; x, y, z - координати поверхні тіла.

Граничні умови другого роду. Задаються значення теплового потоку для кожної точки поверхні тіла і будь-якого моменту часу.

Аналітично це можна представити таким чином:

$$q_n = f(x, y, z, \tau), \quad (2.28)$$

де q_n - щільність теплового потоку на поверхні тіла.

У найпростішому випадку щільність теплового потоку по поверхні і в часі залишається незмінною:

$$q_n = q_0 = \text{const} \quad (2.29)$$

Граничні умови третього роду передбачають задання температури навколишнього середовища $t_{\text{ж}}$ та закону теплообміну між поверхнею тіла і середовищем. Цей тип граничної умови описує процес передачі тепла під час нагрівання або охолодження тіла через контакт із навколишнім середовищем. Для математичного опису теплообміну застосовують закон Ньютона–Рихмана.

Згідно з цим законом, кількість теплоти, що передається одиницею поверхні тіла за одиницю часу, пропорційна різниці температур між поверхнею t_c та навколишнім середовищем $t_{\text{ж}}$ ($t_c > t_{\text{ж}}$):

$$q = \alpha (t_c - t_{\text{ж}}), \quad (2.30)$$

де α - коефіцієнт пропорційності, що називається коефіцієнтом тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$,

Коефіцієнт пропорційності α визначає інтенсивність теплообміну між поверхнею тіла та навколишнім середовищем. Його числове значення відповідає

кількості теплоти, що передається або поглинається одиницею поверхні за одиницю часу при різниці температур у 1°C між поверхнею тіла та середовищем.

Згідно з законом збереження енергії, кількість теплоти, що відводиться з одиниці поверхні за рахунок конвекції, дорівнює кількості теплоти, що підводиться до одиниці поверхні за рахунок теплопровідності, тобто:

$$\alpha(t_c - t_{\text{ж}}) = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_c, \quad (2.31)$$

де n - нормаль до поверхні тіла; індекс "с" вказує на те, що температура і градієнт відносяться до поверхні тіла (при $n = 0$).

Остаточну граничну умову третього роду можна записати у вигляді:

$$\left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_c = -\frac{\alpha}{\lambda} (t_c - t_{\text{ж}}) \quad (2.32)$$

Рівняння (2.32) по суті є вираженням закону збереження енергії для поверхні тіла.

Коефіцієнт тепловіддачі залежить від численних факторів, проте в багатьох практичних випадках його можна вважати сталим.

Іноді не можливо задати всі зазначені граничні умови, і тоді для визначення теплової взаємодії між тілами вирішують споріднену задачу. У таких випадках необхідно забезпечити рівність температур та теплових потоків по обидва боки межі розділу. Загально умови спорідненості можна подати у вигляді:

$$\begin{cases} \lambda_1 \left(\frac{\partial t_1}{\partial n} \right)_\Gamma = \lambda_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial n} \right)_\Gamma + q_v(x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, \tau); \\ t_1(x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, \tau) = t_2(x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, \tau) \end{cases} \quad (2.33)$$

де $q_v(x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, \tau)$ - джерела теплоти на поверхні межі;

$t_1, t_2, \lambda_1, \lambda_2$ - відповідно температури і коефіцієнти теплопровідності дотичних середовищ;

$x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma$ - координати поверхні розділу середовищ.

При відсутності на межі розділу процесів з виділенням або поглинанням теплоти умови спорідненості приймають вид:

$$\begin{cases} \lambda_1 \left(\frac{\partial t_1}{\partial n} \right)_\Gamma = \lambda_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial n} \right)_\Gamma \\ t_1(x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, \tau) = t_2(x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, \tau) \end{cases} \quad (2.34)$$

Числова апроксимація

Розв'язання основних рівнянь теплообміну між об'єктами під час пожежі здійснюється шляхом апроксимації розрахункової області за допомогою адаптивної локально уточненої сітки. У такій апроксимованій формі для розрахункової області рівняння набувають вигляду:

$$\frac{(TC \cdot f)^{n+1} - (TC \cdot f)^n}{\tau} = \frac{1}{TC} \nabla_h (DC \cdot \nabla_h f^{n+1}) + SST \quad (2.35),$$

$$\frac{(TC \cdot f)^{n+1} - (TC \cdot f)^n}{\tau} \nabla^{(k,s)} (CC \cdot VF^{n+1}) = \frac{1}{PC} \nabla_h (DC \cdot \nabla_h f^{n+1}) + SST \quad (2.36),$$

де t – часовий крок;

$TC \cdot f$ – різницева апроксимація конвективного оператора, при цьому $k=1$ (1-й порядок точності), а $s = 0$ (невраховане перенесення через ребра й вершини осередку);

$\nabla_h (DC \cdot \nabla_h f^{n+1})$ – різницева апроксимація дифузійного оператора.

В результаті проведення послідовних ітерацій визначаються значення аналізованих функцій для конкретного моменту часу. Аналогічним чином здійснюються розрахунки для всіх інших моментів часу.

Таким чином, чисельна реалізація математичних моделей теплообміну між об'єктами під час пожежі дозволяє точно й ефективно моделювати процес передачі

тепла від горючого об'єкта до матеріалів суміжних об'єктів, що дає змогу обґрунтовано визначити мінімально необхідні протипожежні відстані між ними методом параметричних досліджень.

Процедура вирішення польової математичної моделі тепломасопереносу під час горіння представлена наступним чином. FDS застосовує кінцево-різницеві наближення другого порядку точності для основних рівнянь (2.11, 2.13, 2.15) на групі взаємопов'язаних прямокутних сіток. Зміни газового потоку оновлюються у часі за допомогою явної схеми Рунге–Кутта другого порядку. Для кожної клітинки сітки на початковому кроці часу розраховуються параметри: густина, масові частки компонентів, швидкості та тиск, з подальшим визначенням цих величин у наступний момент часу, наприклад, за кроком Ейлера. Далі здійснюється обмін величинами на межах сіток із урахуванням граничних умов та обчислюється їх дивергенція порівняно з граничними умовами.

Модель турбулентності

Для оцінки динамічної в'язкості (μ) застосовують різні підходи, що залежать від способів визначення опосередкованих та флуктуаційних складових величин, які входять до рівнянь Нав'є–Стокса. Такі підходи відомі як моделі турбулентності. Найбільш розповсюдженою є стандартна k - ε модель турбулентності, згідно з якою динамічну в'язкість обчислюють за формулою:

$$\mu = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.37)$$

де $C_\mu = 0,09$ – сталий коефіцієнт;

ε – швидкість дисипації турбулентної енергії;

k – турбулентна енергія.

Для визначення величин ε і k використовують рівняння, які доповнюють систему рівнянь Нав'є – Стокса, що мають вигляд:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho u k) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon, \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho u \varepsilon) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_2 f_1 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.39)$$

$$\text{де } G = D_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\nabla \cdot \mathbf{V} + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \delta_{ij}, \quad S_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

Турбулентні процеси моделюються із застосуванням моделі Смагоринського – «масштабне моделювання вихрів» (LES). Пряме чисельне моделювання (DNS) можливо лише за умови достатньої точності обчислювальної сітки, що закладена у розрахунках. За замовчуванням використовується режим масштабного моделювання вихрів.

Променистий теплообмін

Для врахування променистого теплообміну в газовому середовищі, а також взаємного теплового обміну між газом і твердими частками доцільно застосовувати дифузійну модель випромінювання газу. Модель ґрунтується на припущенні ізотропності оптичного середовища, при якому процес радіаційного теплопереносу описується рівнянням:

$$\nabla \left(\frac{1}{\alpha + \beta} \nabla E_r \right) + 3(\alpha E_b - \alpha E_r) = 0, \quad (2.40)$$

де E_r – щільність енергії випромінювання;

E_b – рівноважна щільність енергії випромінювання $\alpha E_b = \alpha_m E_{b,m} + \alpha_p E_{b,p}$;

α – інтегральний за спектром коефіцієнт поглинання $\alpha = \alpha_m + \alpha_p$;

β – інтегральний за спектром коефіцієнт розсіювання $\beta = \beta_m + \beta_p$;

α_m, α_p – коефіцієнти поглинання відповідно до газового середовища й часток;

β_m, β_p – коефіцієнти розсіювання відповідно до газового середовища й часток;

$E_{b,m}$, $E_{b,p}$ – рівноважна щільність енергії випромінювання для газової фази та фази часток розсіювання відповідно до газового середовища й часток.

Вказані вище величини визначають за формулами:

$$E_{b,m} = \sigma T_m^4, \quad (2.41)$$

$$\alpha_p E_{b,p} = \frac{1}{\Omega_{cell}} \sigma \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j T_{pj}^4, \quad (2.42)$$

$$\alpha_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j, \quad (2.43)$$

$$\beta_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} (2 - \varepsilon_p) \sum_j \pi r_j^2 N_j, \quad (2.44)$$

де σ – стала Стефана – Больцмана;

T_{pj} – температура j – тої частки;

N_j – кількість часток у комірці;

ε_p – ступінь чорноти часток.

Моделювання потоків та частинок

Для врахування тепломасопереносу [162] під час пожежі застосовується метод частинок Лагранжа [163, 164]. За цим методом положення кожної частинки описується рівнянням:

$$\frac{d\mathbf{x}_p}{dt} = \mathbf{u} \quad (2.45)$$

Вектор положення частинок визначається за допомогою чисельного інтегрування за схемою «предиктор-коректор» [165] наступним чином:

$$\mathbf{x}_p^{(n+1)_e} = \mathbf{x}_p^n + \delta t \bar{\mathbf{u}}^n, \quad (2.46)$$

$$\mathbf{x}_p^{n+1} = 0.5(\mathbf{x}_p^n + \mathbf{x}_p^{(n+1)_e} + \delta \bar{\mathbf{u}}^{(n+1)_e}) \quad (2.47)$$

Передача теплової енергії шляхом випромінювання визначаються за формулою

$$\chi_f = \frac{1}{8\Omega^f} \int_0^{\mu^l} \int_0^{\mu^l} \int_{\mu_{d,0}}^{\mu_{d,\pi}} \frac{P_0(\theta_d)}{(1-\mu^2)(1-\mu'^2) - (\mu_d - \mu\mu')^2} d\mu_d d\mu d\mu', \quad (2.48)$$

де μ_d – косинус кута розсіювання θ_d ;

$P_0(\theta_d)$ – фазова функція розсіювання одної краплини:

$$P_0(\theta_d) = \frac{\lambda^2 (|S_1(\theta_d)|^2 + |S_2(\theta_d)|^2)}{2C_s(r, \lambda)} \quad (2.49)$$

де $S_1(\theta_d)$ та $S_2(\theta_d)$ амплітуди розсіювання відповідно до теорії Мі.

Границя інтегрування μ^l визначається за формулою:

$$\mu^l = \cos(\theta^l) = 1 - \frac{2}{N_\Omega} \quad (2.50)$$

Границі внутрішнього інтеграла визначаються за формулами:

$$\mu_{d,0} = \mu\mu' + \sqrt{1-\mu^2}\sqrt{1-\mu'^2}; \quad \mu_{d,\pi} = \mu\mu' - \sqrt{1-\mu^2}\sqrt{1-\mu'^2} \quad (2.51)$$

Спершу обчислюють температуру частинок, після чого визначають їх поточну масу. Отримані дані інтегрують у кожну комірку робочої сітки, в результаті чого змінюється температура цих комірок.

Втрати маси та теплообмін у частинках визначається за рівняннями:

$$\frac{dm_l}{dt} = -Ah_m \rho (Y_l - Y_g); \quad (2.52)$$

$$m_l c_l \frac{dT_l}{dt} = Ah(T_g - T_l) + Ah(T_s - T_l) + \dot{q}_r + \frac{dm_l}{dt} h_v \quad (2.53)$$

Останнє рівняння в апроксимованому вигляді за методом кінцевих різниць записується у вигляді:

$$\frac{T_l^{n+1} - T_l^n}{\delta t} = \frac{1}{m_l c_l} \left[Ah \left(T_g - \frac{T_l^{n+1} + T_l^n}{2} \right) - Ah_m \rho \left(\frac{Y_l^{n+1} + Y_l^n}{2} - Y_g \right) h_v \right] \quad (2.54)$$

Рівноважна масова фракція Y_l є функція температури і визначається за виразом:

$$Y_l = \frac{X_l}{X_l(1 - W_a/W_l) + W_a/W_l}, \quad X_l = \exp \left(\frac{h_v W_l}{\mathcal{R}} \left[\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_l} \right] \right) \quad (2.55)$$

Для апроксимації останніх рівнянь використовується вираз:

$$Y_l^{n+1} \approx Y_l^n + \left(\frac{dY_l}{dT_l} \right)^n (T_l^{n+1} - T_l^n) \quad (2.56)$$

Тут похідна $\frac{dY_l}{dT_l}$ визначається такими послідовними обчисленнями:

$$\frac{dY_l}{dT_l} = \frac{dY_l}{dX_l} \frac{dX_l}{dT_l} = \frac{W_a/W_l}{(X_l(1 - W_a/W_l) + W_a/W_l)^2} \frac{h_v W_l}{\mathcal{R} T_l^2} \exp \left(\frac{h_v W_l}{\mathcal{R}} \left[\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_l} \right] \right) \quad (2.57)$$

Кількість тепла складає:

$$\delta q = \delta Ah \left(T_g - \frac{T_l^{n+1} + T_l^n}{2} \right) \quad (2.58)$$

2.3 Методика теоретичних досліджень обґрунтування ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захистку на індивідуальний пожежний ризик

Для оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту на першому етапі слід визначити для кожного типу систем перелік подій, що характеризують ефективне або неефективне виконання їхніх функцій. Наприклад, об'єкт може бути оснащений системою протипожежного захисту, але вона не спрацювала під час пожежі, або система реагує на небезпечні чинники пожежі, але функціонує не повністю.

Для оцінювання ефективності роботи систем протипожежного захисту запропоновано аналізувати такі події:

- кількість пожеж, ліквідованих на початковій стадії без залучення пожежно-рятувальних підрозділів;
- кількість пожеж, ліквідованих із залученням пожежно-рятувальних підрозділів;
- кількість пожеж, для ліквідації яких залучалися додаткові сили та засоби пожежно-рятувальних підрозділів;
- кількість пожеж, унаслідок яких загинули люди.

Зазначені події враховуються лише у випадках, коли об'єкт оснащений відповідними системами протипожежного захисту, і ці системи під час пожежі відреагували на небезпечні чинники або на сигнали спонукальних систем, які приводять їх у дію.

Події, що пов'язані з залученням додаткових сил і засобів або загибеллю людей, відносяться до зони неприпустимого рівня індивідуального ризику.

Ймовірність реалізації кожної з перелічених подій для відповідних систем протипожежного захисту визначається за формулою:

$$P_{pi} = \frac{N_{\text{пож.}pi}}{N_{\text{пож}}} \quad (2.59)$$

де $N_{\text{пож.}pi}$ - кількість пожеж на об'єктах, які оснащені відповідною системою протипожежного захисту під час, яких мала реалізацію i -та подія;

$N_{\text{пож}}$ - загальна кількість пожеж на об'єктах, які оснащені відповідною системою протипожежного захисту.

Дані щодо кількості пожеж на об'єктах, які оснащені відповідною системою протипожежного захисту під час, яких мала реалізацію i -та подія ($N_{\text{пож.}pi}$) та загальної кількості пожеж на об'єктах, які оснащені відповідною системою протипожежного захисту ($N_{\text{пож}}$) встановлюються на підставі використання статистичних даних.

Для визначення впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик необхідно, використовуючи формулу (2.59) та відповідні статистичні дані, встановити перелік небезпечних подій, які характеризують ефективність функціонування кожної системи. Надалі для цих подій слід зібрати статистичні дані по кожній системі протипожежного захисту, зокрема:

- кількість об'єктів, оснащених відповідною системою;
- кількість об'єктів, які згідно з нормативними документами повинні бути оснащені такою системою;
- кількість систем, щодо яких дотримуються регламентів технічного обслуговування;
- кількість спрацювань систем під час пожеж.

Для встановлення залежності індивідуального пожежного ризику від систем протипожежного захисту, відповідно до формули (2.6), необхідно ідентифікувати конкретні ризики, які враховуються під час оцінювання ймовірностей ефективного спрацювання систем протипожежного захисту. На основі аналізу досвіду

зарубіжних країн [166–171] у сфері цивільного захисту та пожежної безпеки визначено, що такими ризиками можуть бути:

- ризик загибелі людини;
- ризик виникнення небезпечної події (пожежі);
- ризик поширення пожежі на сусідні об'єкти;
- ризик шкоди навколишньому природному середовищу.

Статистичні дані щодо пожеж в Україні [4] показують, що найбільш динамічними є ризики загибелі людини та виникнення пожежі. Оскільки метою дослідження є оцінювання впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик, подальші розрахунки ймовірностей ефективного спрацювання слід виконувати, зосередившись на ризику загибелі людини внаслідок пожежі.

Вплив системи протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик можливий лише за умови, що система виконала свою функцію ефективно.

Ймовірність ефективного спрацювання системами протипожежного захисту ($K_{е.ф.}$) встановлюється як добуток двох ймовірностей: ймовірності оснащення об'єкту відповідно системою протипожежного захисту ($K_{осн.}$) та ймовірності справності відповідної системи протипожежного захисту ($K_{спр.}$), що можна виразити через відповідне рівняння

$$K_{е.ф.} = K_{осн.} \cdot K_{спр.} \quad (2.60)$$

де $K_{осн.}$ - ймовірність оснащення об'єкту відповідно системою протипожежного захисту;

$K_{спр.}$ - ймовірність справності відповідної системи протипожежного захисту.

Ймовірність ефективності виконання функцій системами протипожежного захисту ($K_{е.ф.}$) також можна визначити на підставі відповідних статистичних даних,

як співвідношення кількості спрацювань відповідних систем протипожежного захисту під час пожеж ($N_{с.СПЗ}$) до загальної кількості пожеж на об'єктах, які оснащені відповідними системами протипожежного захисту ($N_{п.СПЗ}$). Зазначене можна виразити у вигляді рівняння

$$K_{е.ф.} = \frac{N_{с.СПЗ}}{N_{п.СПЗ}} \quad (2.61)$$

де $N_{с.СПЗ}$ - кількості спрацювань відповідних систем протипожежного захисту під час пожеж;

$N_{п.СПЗ}$ - загальної кількості пожеж на об'єктах, які оснащені відповідними системами протипожежного захисту.

Відповідно використовуючи відповідні статистичні дані можна також встановити ймовірність оснащення об'єктів відповідними системами протипожежного захисту ($K_{осн.}$) та ймовірність справності відповідних систем протипожежного захисту ($K_{спр.}$) згідно із рівнянь:

$$K_{осн.} = \frac{N_{осн.}}{N_{п.б.осн.}} \quad (2.62)$$

$$K_{спр.} = \frac{N_{д.то}}{N_{осн.}} \quad (2.63)$$

де $N_{осн.}$ - кількість об'єктів, які оснащені відповідною системою протипожежного захисту;

$N_{п.б.осн.}$ - кількість об'єктів, які згідно із нормативними документами повинні бути оснащені відповідною системою протипожежного захисту;

$N_{д.то}$ - кількість об'єктів, на яких щодо систем протипожежного захисту дотримуються регламентів технічного обслуговування.

Використовуючи формули (2.60) та (2.61) встановлюємо ймовірність ефективного спрацювання систем протипожежного захисту ($K_{е.ф.}$). Із отриманих значень для подальшої апробації приймаємо значення, яке має найменший вплив на значення індивідуального пожежного ризику.

Для встановлення закономірності впливу ефективності спрацювання систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику використовується повнофакторний експеримент, базований на даних ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту ($K_{\text{е.ф.}}$), отриманих із застосуванням методів теорії ймовірності та польових методів моделювання.

Процедура встановлення цієї закономірності передбачає виконання таких етапів [172]:

1. Визначення найбільш значущих параметрів об'єктів, які впливають на досліджувані процеси, зокрема визначення найбільш впливових систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику.
2. Побудова універсальної апроксимаційної моделі розрахунку із змінними параметрами, що є найбільш значущими.
3. Створення математичної моделі на основі прийнятої регресійної залежності.
4. Формування плану повного факторного обчислювального експерименту.
5. Проведення повного факторного експерименту з використанням розробленого плану та апроксимаційних моделей із змінними параметрами.
6. Визначення констант числової регресійної залежності та побудова математичної моделі впливу ефективності функціонування систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик.
7. На основі побудованої математичної моделі формується таблиця ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику.

Для побудови плану повного факторного експерименту встановлюється перелік параметрів, що мають найбільший вплив на значення індивідуального пожежного ризику при функціонуванні систем протипожежного захисту. Ці параметри разом із вибраними інтервалами значень заносяться до таблиці 2.3 і використовуються як фактори експерименту.

Таблиця 2.3 – Інтервали параметрів в експерименті, що вибрані в якості факторів

Параметр № 1			Параметр № 2			Параметр № 3		
Мінімальне значення параметра	Середнє значення параметра	Максимальне значення параметра	Мінімальне значення параметра	Середнє значення параметра	Максимальне значення параметра	Мінімальне значення параметра	Середнє значення параметра	Максимальне значення параметра

В якості критерію приймаємо прийнятне значення індивідуального пожежного ризику, яке становить 10^{-5} .

Математична модель за зробленим нами припущеннями відповідає лінійній залежності ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику та факторами, яка має такий вигляд [173].

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3, \quad (2.64)$$

де x_1, x_2, x_3 – параметри, що враховують вибрані фактори, які зазначені у таблиці 2.3;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$ – константи рівняння числової регресії.

Для визначення констант рівняння числової регресії відповідно до формули (2.64) необхідно провести 8 чисельних експериментів [174] за складеною для цього матриці планування, що записана у вигляді таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Типова матриця планування повного факторного експерименту для побудування математичної моделі

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	-	-	-	+	+	+	-

Для проведення повного факторного експерименту використовуємо дані, що визначені із використанням формул (2.60) та (2.61).

Узагальнення отриманих результатів дозволяє встановити ймовірність ефективного спрацювання систем протипожежного захисту щодо впливу на значення індивідуального пожежного ризику. На основі цих даних розробляється алгоритм, який забезпечує обґрунтування необхідності улаштування конкретної системи протипожежного захисту для об'єкта з урахуванням управління індивідуальним пожежним ризиком. Алгоритм дозволяє оцінити, наскільки впровадження тієї чи іншої системи зменшує ризик загибелі людей та інші небезпечні наслідки пожежі, і на цій підставі приймати обґрунтовані рішення щодо комплексу заходів протипожежного захисту для конкретного об'єкта.

2.4 Узагальнення теоретичного алгоритму дослідження впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик

Процедура дослідження впливу функціонування систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику може бути представлена у вигляді послідовного алгоритму:

1. Визначаємо перелік параметрів, що характеризують вплив систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику та наслідки пожеж [175].

2. Розробляємо опитувальну анкету для збору статистичних даних, необхідних для обґрунтування ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту.

3. Здійснюємо узагальнення та обробку зібраних статистичних даних.

4. Обираємо математичний метод для обробки даних, наприклад теорія ймовірності або методи польового моделювання та обчислювальної газогідродинаміки [176].

5. Створюємо геометричні моделі об'єктів із застосуванням граничних умов та обґрунтовуємо сценарії розрахунку.

6. Організовуємо цикл зміни чинників, що характеризують вплив систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик.

7. Визначаємо та обробляємо зазначені чинники.

8. Під час розгляду різних сценаріїв пожежі фіксуємо наявність або відсутність впливу системи протипожежного захисту на результати дослідження.

9. Проводимо порівняння результатів дослідження наслідків пожежі з урахуванням наявності системи протипожежного захисту та без її впливу.

10. Встановлюємо ймовірність ефективного спрацювання систем протипожежного захисту щодо впливу на індивідуальний пожежний ризик [177].

Структурна схема дослідження включає (рисунок 2.1):

- визначення параметрів, що впливають на індивідуальний пожежний ризик;
- вибір математичного методу для оцінки ефективності систем (теорія ймовірності на основі статистичних даних, польові моделі та обчислювальна газогідродинаміка);
- побудову моделей із застосуванням граничних умов та сценаріїв розрахунку;
- організацію циклу зміни чинників, що впливають на ризик;
- обробку та аналіз результатів із урахуванням або без впливу систем протипожежного захисту;
- встановлення впливу систем на індивідуальний пожежний ризик.

У якості критеріїв для оцінки впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний ризик обираються температура та концентрація диму, оскільки вони найбільш швидко впливають на життя та здоров'я людини.

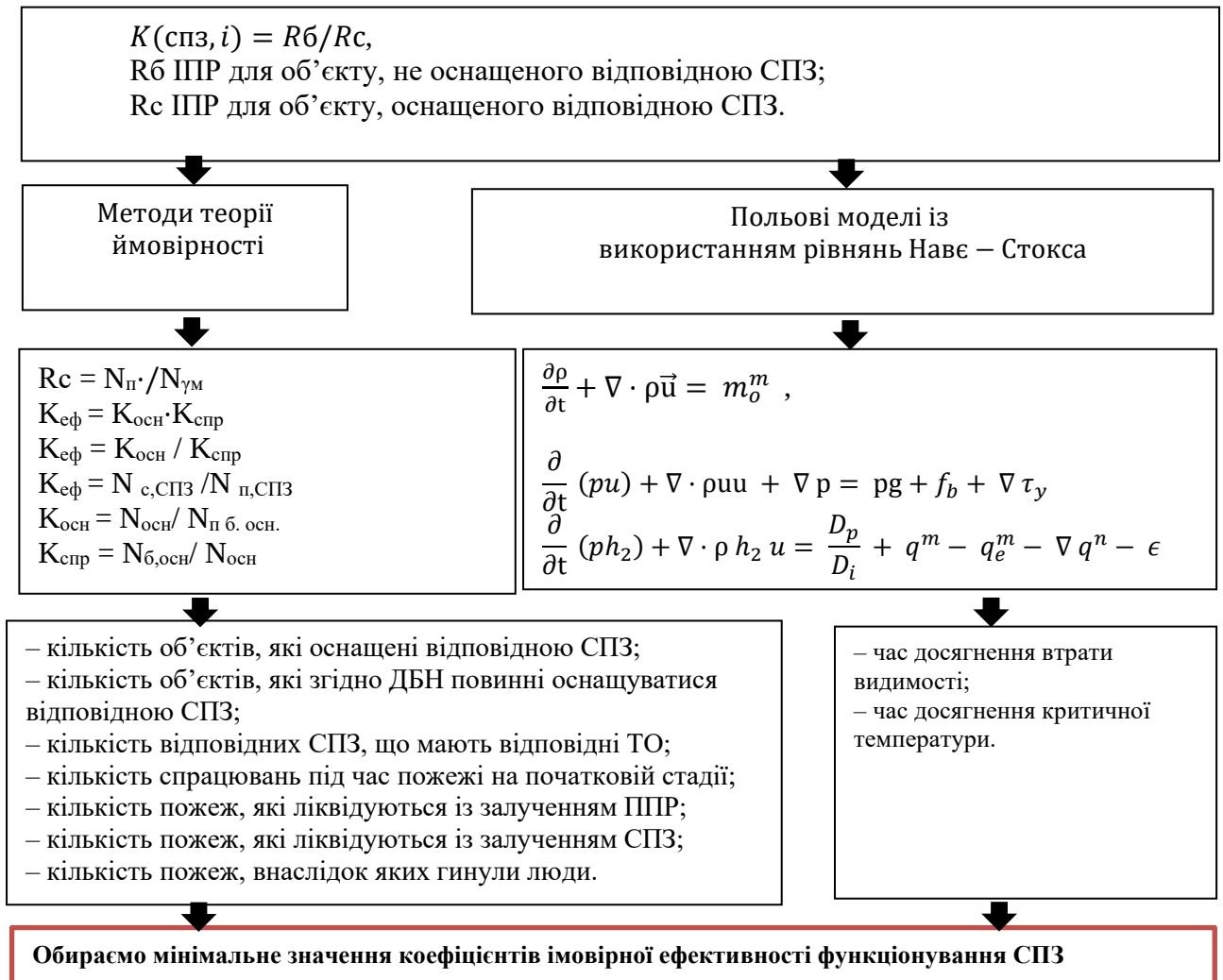


Рисунок 2.1 – Структурна схема дослідження ймовірностей ефективного спрацювання систем протипожежного захисту [178]

2.5 Висновки за розділом 2

Результати досліджень, що наведені у цьому розділі дозволяють зробити такі висновки:

1. Визначено основні параметри, що впливають на значення індивідуального пожежного ризику, серед яких найбільш суттєвими є безвідмовність та ефективність роботи систем протипожежного захисту. Надійність цих систем оцінюється через час досягнення граничних значень небезпечних чинників для життя людини.

Найшвидший з таких чинників – втрата видимості, що аналізується за допомогою коефіцієнта задимленості.

2. Ідентифіковано основні системи протипожежного захисту, які впливають на індивідуальний ризик: системи пожежної сигналізації, системи оповіщення та управління евакуацією, автоматичні системи пожежогасіння та системи протидимного захисту. Згідно зі структурною схемою, вони належать до систем II рівня впливу на індивідуальний ризик. Додатково на цей ризик впливає ефективність роботи внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопостачання.

3. Розроблено сценарії розвитку пожежі для оцінки впливу систем протипожежного захисту, що охоплюють випадки функціонування системи та її відсутності або неспрацювання. Це дозволяє кількісно оцінити ефективність кожної системи. Порівняння результатів за двома сценаріями забезпечує обґрунтоване визначення впливу систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику.

4. Продемонстровано, що вплив систем протипожежного захисту на індивідуальний ризик можна оцінювати двома підходами: через теорію ймовірності на основі статистичних даних або за допомогою методів польових моделей з використанням обчислювальної газогідродинаміки. Статистичний підхід дозволяє враховувати історичні дані, а моделювання – фізичні процеси пожежі. Комбінація цих методів забезпечує комплексний і точний аналіз.

5. Запропоновано алгоритм дослідження, що включає збір та обробку статистичних даних, побудову моделей, моделювання різних сценаріїв пожежі та порівняння результатів із урахуванням і без урахування систем протипожежного захисту. Це дозволяє визначати ймовірність ефективного спрацювання систем. Отримані значення використовуються для управління індивідуальним пожежним ризиком та обґрунтування встановлення систем.

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА ІНДИВІДУАЛЬНИЙ ПОЖЕЖНИЙ РИЗИК

У цьому розділі представлені результати щодо розв'язання четвертого та п'ятого завдання дослідження, а саме обґрунтування коефіцієнтів впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику та дослідження закономірності впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику.

3.1 Моделювання процесу поширення небезпечних чинників пожеж залежно від функціонування систем протипожежного захисту із використанням польових методів

3.1.1 Моделювання пожежі в громадських будинках

Проведемо моделювання пожежі в таких громадських будинках, як офісний центр та торгівельно-розважальний комплекс з метою дослідження зміни параметрів небезпечних чинників пожежі в часі залежно від функціонування відповідної системи протипожежного захисту.

Для побудови полів утворення небезпечних чинників пожежі, проводимо експертний вибір сценаріїв пожежі, при яких очікуються найгірші наслідки для людей.

Формулювання сценарію розвитку пожежі включає в себе наступні етапи:

- вибір причини та місця перебування початкового осередку пожежі і закономірностей його розвитку;
- задавання розрахункової області, а саме вибір даних щодо характеристик системи протипожежного захисту приміщень та геометричних характеристик зовнішніх об'єктів (за наявності), визначення елементів які враховуються при розрахунку внутрішнього об'єму приміщень, стану світлових прорізів;

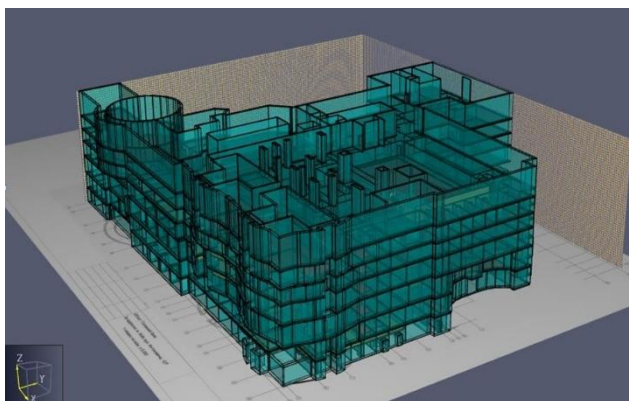
- задавання параметрів навколишнього середовища і початкових значень параметрів всередині приміщень, також формується математична модель розвитку пожежі і проводиться моделювання її динаміки розвитку.

Під час формування сценаріїв поширення пожежі, реакцій горіння та відтворення пожежного навантаження всередині приміщень використано підходи описані в [179].

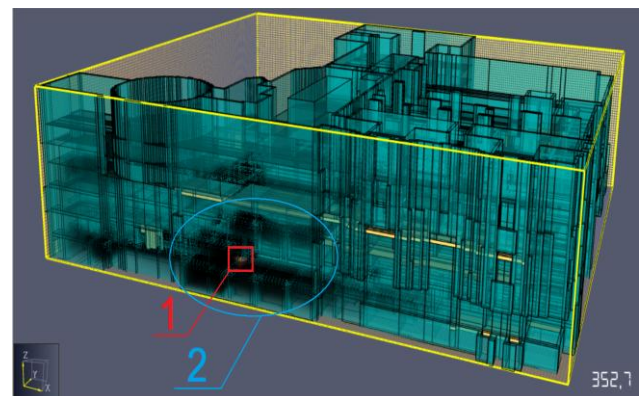
Під час проведення розрахунків розглядаємо чотири розрахункові сценарії, а саме:

- розвиток пожежі без врахування функціонування систем протипожежного захисту;
- розвиток пожежі із функціонуванням системи протидимного захисту;
- розвиток пожежі із функціонуванням спринклерної автоматичної системи пожежогасіння.
- розвиток пожежі з функціонуванням спринклерної автоматичної системи пожежогасіння та системи протидимного захисту.

Перший приклад визначення ймовірності ефективного спрацювання системи протипожежного захисту проведений для офісного центру. На рисунку 3.1 наведено фрагмент створеної FDS моделі для розрахунку, а також сам фрагмент візуалізації поширення небезпечних чинників пожежі в середині досліджуваного об'єкту.



а)



б)

Рисунок 3.1 – Фрагменти візуалізації моделі під час визначення ефективності функціонування окремих систем протипожежного захисту: а) загальний вигляд

моделі; б) візуалізація поширення небезпечних чинників пожежі в середині об'єму об'єкту на 352 секунді; 1 – місце осередку пожежі; 2 – зона поширення небезпечних чинників пожежі.

Результати розрахунку тривалості досягнення критичних значень для життя людини небезпечними чинниками пожежі ($t_{\text{бл}}$) представлені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Тривалість досягнення критичних значень небезпечних чинників пожежі на основному шляху евакуації за результатом розрахунків

Розрахунковий сценарій	$t_{\text{бл}}, \text{с}$
Без врахування СПЗ	249
Наявність системи протидимного захисту	354
Наявність систем спринклерного автоматичного пожежогасіння	573
Наявність систем спринклерного автоматичного пожежогасіння та протидимного захисту	Не настає

На рисунку 3.2 наведено результати щодо зміни значення втрати видимості в зоні основного евакуаційного виходу з будівлі для чотирьох розрахункових сценаріїв.

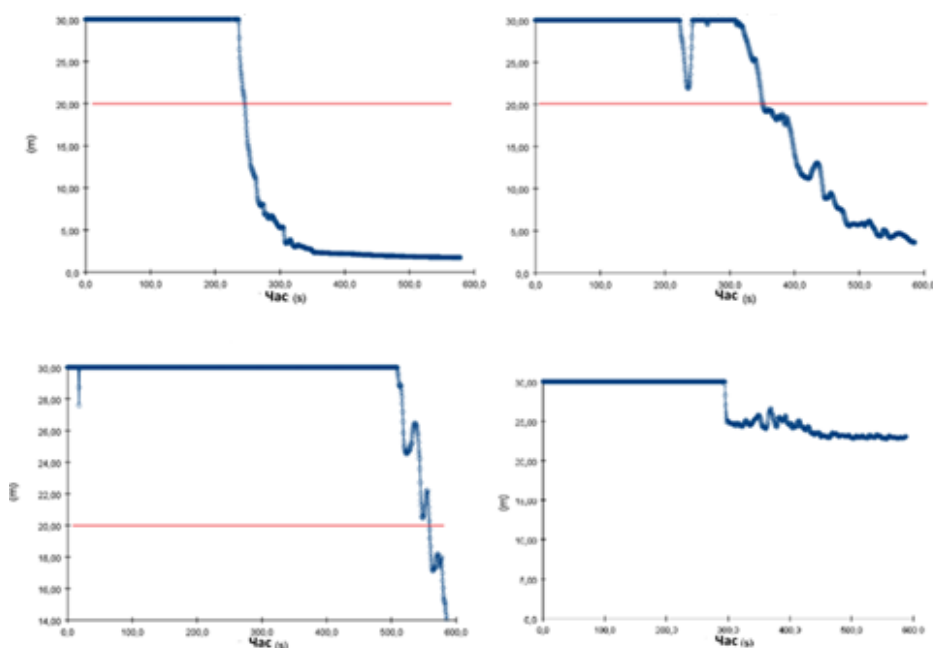


Рисунок 3.2 – Графіки досягнення критичних значень небезпечних чинників пожежі на основному шляху евакуації для 4 розрахункових сценаріїв

Для дослідження більшого діапазону багатофункціональних громадських будівель та споруд проведено аналогічні типи розрахунків для торгово-розважального центру та лікарні, які враховували сценарії наявності того чи іншого типу систем протипожежного захисту та їх відсутність. На рисунку 3.3 наведено візуалізацію фрагментів розрахункових моделей.

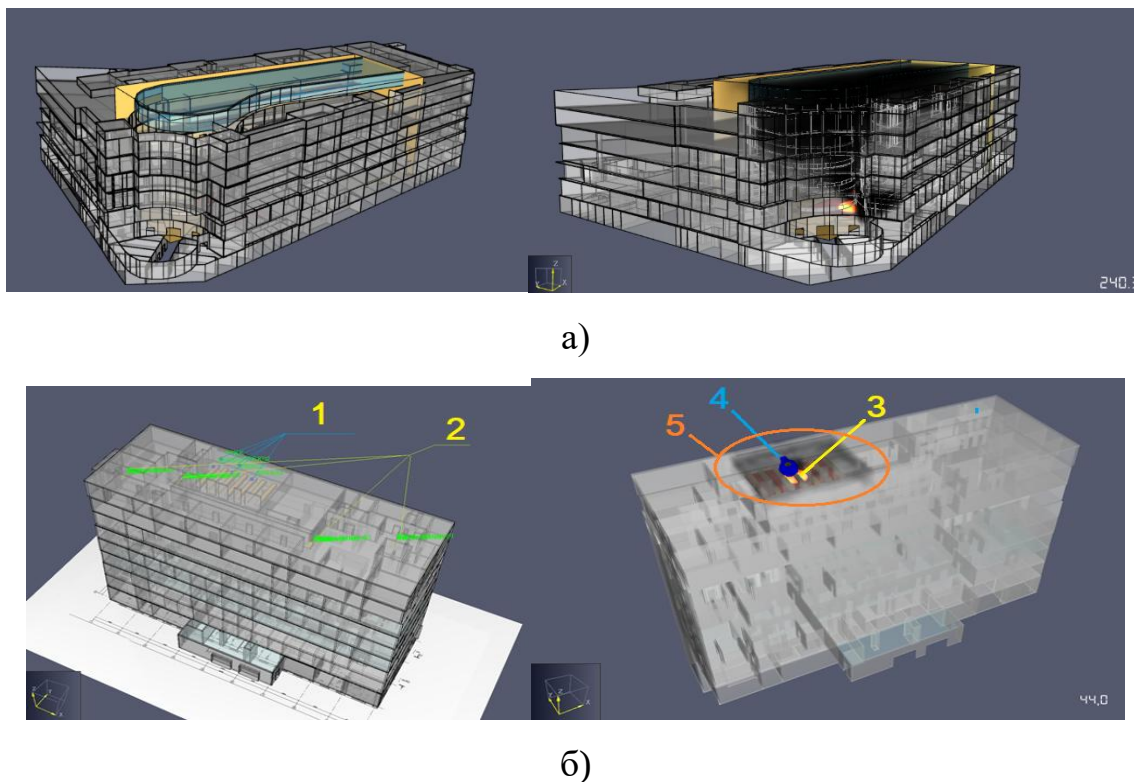


Рисунок 3.3 – Фрагменти моделей під час проведення розрахунків під час визначення ефективності спрацювання окремих систем протипожежного захисту: а) розрахункова модель торгово-розважального центру; б) розрахункова модель лікарні, де 1 – система спринклерного автоматичного пожежогасіння, 2 – датчики вимірювачів небезпечних чинників пожежі на основних евакуаційних шляхах; 3 – осередок пожежі під час моделювання; 4 – спрацювання спринклерної системи; 5 – зона поширення небезпечних чинників пожежі.

В таблиці 2 наведено отримані результати щодо блокування небезпечними чинниками пожежі основних евакуаційних виходів для досліджуваних типів будівель обладнаних СПЗ.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку $t_{\text{бл}}$ для підвального поверху та торговельного будинку

Розрахунковий сценарій	$t_{\text{бл}}, \text{с}$
Торговельний центр	
Без врахувань СПЗ	136
Наявність систем протипожежного захисту	161
Наявність спринклерної системи пожежного гасіння	334
Наявність систем протипожежного захисту та спринклерної системи автоматичного пожежогасіння	412
Лікарня	
Без врахувань СПЗ	128
Наявність системи протидимного захисту	233
Наявність спринклерної системи автоматичного пожежогасіння	378
Наявність систем протипожежного захисту та спринклерних систем автоматичного пожежогасіння	614

Використовуючи залежність (2.6) здійснюємо розрахунки, щоб отримати дані щодо ймовірностей ефективного спрацювання систем протипожежного захисту для кожного із розглянутих вище розрахункових сценаріїв розвитку пожежі. Результати розрахунків з визначення ймовірностей ефективного спрацювання систем протипожежного захисту для розглянутих будівель громадського призначення наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Значення ймовірностей ефективного спрацювання систем протипожежного захисту для обраних сценаріїв пожежі

Вид СПЗ	Ймовірність ефективного спрацювання СПЗ			
	Офісний центр	Торговельний центр	Лікарня	Середнє значення
Димовидалення	0,8	0,85	0,84	0,83
Спринклерна система автоматичного пожежогасіння	0,45	0,4	0,36	0,4
Димовидалення та спринклерна система автоматичного пожежогасіння	0,2	0,33	0,25	0,26

Аналізуючи дані таблиці 3.3 можна встановити залежність, яка дозволяє визначити ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту при їх одночасному функціонуванні, яку можна описати формулою:

$$K_{\text{спз}}^{\text{сп}} = \prod K_{\text{спз}}^i \quad (3.1)$$

де $K_{\text{спз}}^{\text{сп}}$ - коефіцієнт ймовірної ефективності спрацювання систем протипожежного захисту при їх одночасному функціонуванні;

$K_{\text{спз}}^i$ - коефіцієнт ймовірності ефективного спрацювання «і»-ї системи протипожежного захисту.

Таким чином, результати розрахунків за встановленими критеріями [2] дозволили визначити вихідні дані щодо ймовірності ефективного функціонування систем протипожежного захисту. Ці результати можна представити у вигляді коефіцієнта ймовірної ефективності спрацювання систем протипожежного захисту ($K_{\text{спз},i}$). Це свідчить про те, що кожна окрема система протипожежного захисту безпосередньо впливає на величину індивідуального пожежного ризику на об'єкті захисту [175].

3.1.2 Моделювання пожежі в торговельному комплексі «Епіцентр К» у м. Первомайськ 02.02.2021 р.

02 лютого 2021 року виникла пожежа у торговельному комплексі ТОВ «Епіцентр К» за адресою: Миколаївська область, м. Первомайськ, вул. Федора Достоєвського, 2-Б/2. Об'єкт суб'єкта господарювання згідно [180] відноситься до високого ступеня прийнятності ризику. О 12:57 до диспетчера 23 ПЗЧ 23 ДПРЧ ГУ ДСНС у Миколаївській області надійшло повідомлення про пожежу. О 13:05 до місця пожежі прибув перший пожежно-рятувальний підрозділ.

Наслідки даної пожежі представляють науковий інтерес, оскільки відомі дані щодо спрацювання систем протипожежного захисту що дає можливість оцінити наслідки та індивідуальний пожежний ризик за результатами функціонування як кожної окремої системи, так і комплексу протипожежного захисту в цілому. Так, наприклад, в результаті цієї пожежі ефективно спрацювали такі системи, як система

пожежної сигналізації, система оповіщення про пожежу та управління евакуацією людей та система протидимного захисту, що вплинуло на ефективну евакуацію людей та забезпечило в цілому безпечні умови для роботи пожежно-рятувальних підрозділів під час гасіння пожежі та як наслідок в результаті пожежі відсутні загиблі та травмовані особи. Разом із цим, не спрацювала автоматична система пожежогасіння через знеструмлення персоналом об'єкту пожежних насосів системи водопостачання, як наслідок пожежа набула великих масштабів (площа пожежі близько 4000 м³), від теплової дії пожежі зруйновані несучі будівельні конструкції об'єкту та конструкції покриття, матеріальні втрати від пожежі склали 4 млн 800 тис. 639 грн (із них прямі збитки - 2 млн 400 тис. грн; побічні – 2 млн 400 тис. 639 грн).

Тому дану пожежу можемо прийняти як приклад для створення комп'ютерної моделі із подальшою її апробацією на основі реальних даних про наслідки від пожежі із урахуванням ефективності функціонування відповідних систем протипожежного захисту.

Пожежа виникла орієнтовно о 12:43. Будівля, в якій виникла пожежа, одноповерхова, II ступеня вогнестійкості, розміром 132,8 м х 36 м, прямокутної форми, рисунок 3.3. Несучою основою будівлі є комбінований каркас із залізобетонними збірними колонами, крок колон становить 12 м × 12 м, що несуть покриття, виконане з металокаркасних балок, покриття – із зварних двотаврів. Стіни тришарові типу «сандвіч», покрівля з рулонним покриттям типу ПХВ мембрани, укладена по напівжорсткому утеплювачу. Стійкість каркаса в повздовжньому та в поперечному напрямку забезпечується рамами, з жорстким закріпленням залізобетонних колон до фундаменту. Просторова жорсткість будівлі забезпечується за рахунок створення покриття з профлиста, закріпленого до балок. Вхідна група та рампа відокремлені від основної будівлі та виконані у рамному варіанті, з жорстким кріпленням колон до фундаментів.



Рисунок 3.4 – Зображення будівлі Епіцентру до пожежі

По функціональному призначенню будівля умовно поділяється на три частини: торгівельна зала продуктових товарів, торгівельна зала промислових та будівельних товарів з допоміжними приміщеннями, майданчик з будівельними матеріалами. План-схема щодо розподілу будинку по функціональному призначенню зображена на рисунку 3.5.

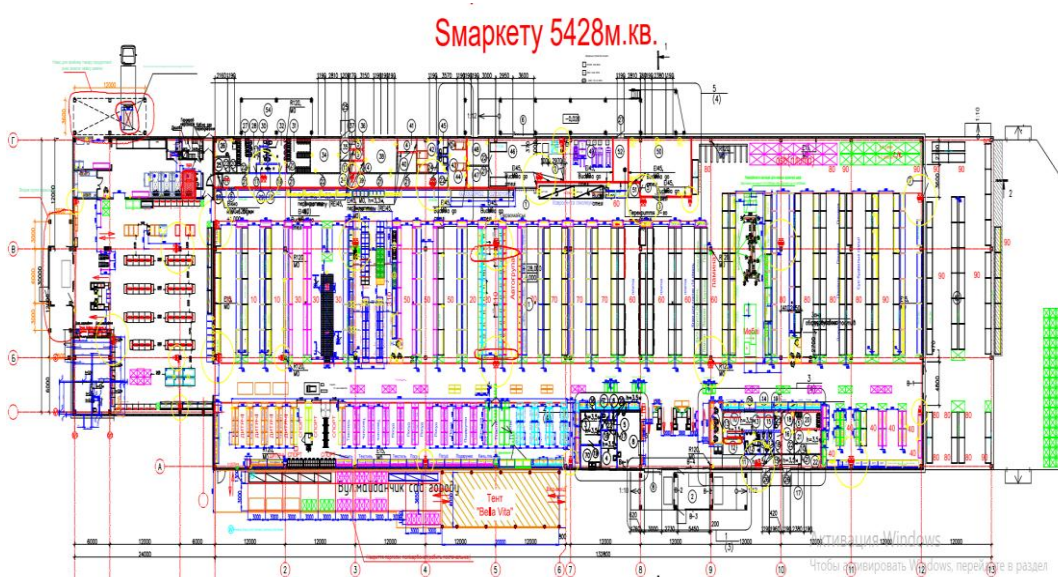


Рисунок 3.5 – План-схема щодо розподілу будинку по функціональному

призначенню

Електропостачання торговельного комплексу, здійснюється окремо та має два незалежних ведення: перший – від дизельної електростанції; другий – від міської лінії електропостачання до трансформаторної підстанції, яка не приєднана до централізованої електромережі.

Дизельна електростанція (DJ 250 PR) (ДЕС) 250 кВт перемінної напруги 380/220В. Монтаж лінії електропостачання здійснюється мідним 3-жильним кабелем. Далі кабель йде до приміщення електричної щитової, розташованої у торговельному комплексі, де знаходиться головний розподільчий щит. Споживачами розподільчого щита є побутові пристрої, електричне обладнання торговельних залів, світильники внутрішнього та зовнішнього освітлення, електроприводи турнікетів, рухомих дверей, стелажів, вентиляційних приладів, апаратура комп'ютерних мереж та мереж зв'язку тощо. Електрична проводка у торговельному комплексі виконана як під опорадженням за підвісними стелями, так і відкритим шляхом по електричних лотках.

Освітлення території та приміщень комбіноване: природне та штучне, яке здійснюється з використанням денного світла та LED-світильників.

Опалення приміщень торговельного комплексу повітряне, за рахунок систем вентиляції від установок, що генерують тепло (клімат-контроль) газові установки (руфтопи). Вентиляція природна та припливно-витяжна з механічним спонуканням. Газопостачання здійснюється від централізованого газопроводу. Водопостачання забезпечується від міської системи водопостачання.

Протипожежне водопостачання забезпечується від двох протипожежних резервуарів об'ємом по 200 м³, від яких за допомогою насосів з насосної станції забезпечується зовнішнє та внутрішнє протипожежне водопостачання комплексу. Об'єкт обладнано внутрішнім протипожежним водопроводом від пожежних кранів-комплектів та зовнішньою кільцевою об'єктовою мережею протипожежного водопостачання із встановленням 6 пожежних гідрантів по периметру території. Під час виникнення пожежі торговельний комплекс відключено від електропостачання,

у зв'язку з цим тиску води у пожежних гідрантах не було, що унеможливило підключення до них пожежних автоцистерн та ускладнило ліквідацію пожежі аварійно-рятувальними підрозділами.

Об'єкт обладнано системами протипожежного захисту:

1. Система пожежної сигналізації - під час пожежі свої функції виконала, про що свідчить надходження сигналу про пожежу на пульт централізованого спостереження ТОВ «АПС – Київ».

2. Система мовленнєвого оповіщення про пожежу та управління евакуацією людей «VELLEZ» типу СО 4 [29]. Система оповіщення свої функції виконала. Евакуацію відвідувачів та персоналу торговельного комплексу проведено вчасно.

3. Автоматична система спринклерного водяного пожежогасіння. З усних пояснень співробітників торговельного комплексу з'ясовано, що під час виникнення пожежі у відділі лакофарбових речовин і матеріалів (один із осередків пожежі), де у значній кількості на стелажах знаходились легкозаймисті та горючі рідини, відбулося спрацювання спринклерів системи автоматичного пожежогасіння над місцем найбільшого термічного впливу. Але через незначний проміжок часу персоналом торговельного комплексу вручну зупинена дизельна електростанція з метою знеструмлення об'єкта. У зв'язку з чим знеструмлені насоси станції пожежогасіння, оскільки інші джерела її електроживлення під час пожежі були відсутні, система автоматичного пожежогасіння свої функції не виконала, що призвело до швидкого розповсюдження пожежі та значного збільшення її масштабів.

4. Система протидимного захисту виконана із природним спонуканням через протипожежні клапани у покрівлі об'єкту. Під час пожежі відбулося спрацювання та відкриття протипожежних клапанів, що забезпечило можливість проведення заходів по ліквідації пожежі пожежно-рятувальними підрозділами.

За свідченнями очевидців відомо, що задимлення торгівельної зали відбулося приблизно за 4 хв з моменту виникнення пожежі. Також відомо про спрацювання клапанів системи протидимного захисту приблизно через 1,5÷2 хв з моменту початку пожежі.

При огляді місця пожежі та з усних пояснень співробітників торговельного комплексу встановлено таке: пожежа виникла у внутрішньому просторі торговельного комплексу у двох місцях торговельної зали непродовольчої групи товарів за незначний проміжок часу (відбулося задимлення торгівельної зали приблизно за 4 хв), а саме: стелаж із матеріалів покриття для підлоги (лінолеум, ковrolін тощо), та стелаж лакофарбних матеріалів (висота розташованих товарів на стелажах до пожежі сягала близько 4 м. Приблизна відстань між осередками пожежі становить 26 м. Як свідчать усні пояснення співробітників, найбільш інтенсивне і швидке розповсюдження горіння розпочалося саме по стелажу лакофарбових матеріалів, силами персоналу гасіння пожежі на початковій стадії її виникнення первинними засобами пожежогасіння було неможливим через швидке розповсюдження полум'я та задимлення. У зв'язку із відключенням насосної станції системи пожежогасіння від електроживлення і через велику кількість горючих речовин та матеріалів (непродовольчі товари) пожежа отримала швидке розповсюдження, при цьому орієнтовний час вільного розвитку пожежі з початку її виникнення до прибуття перших аварійно-рятувальних підрозділів становив 15-20 хв.

За візуальним спостереженням характеру протікання процесу розвитку пожежі від початкової стадії до моменту ліквідації встановлено, що процес найбільш інтенсивного горіння на початковій стадії розвитку пожежі протікав у лівій частині торговельної зали непродовольчих товарів відносно основного входу у комплекс ближче тильної стіни будівлі, а саме – у місці розташування лакофарбових матеріалів та матеріалів покриття для підлоги. Також під час огляду внутрішнього простору торговельної зали продовольчих товарів, а саме – місця початкового виникнення пожежі (осередків пожежі), виявлено найбільші конструктивні пошкодження з подальшим знищенням, а саме – металеві конструкції, деформовані з повним вигоранням кіптяви від дій високої, залізобетонні колони з чітким розшаруванням бетону та нахилом у бік осередкових зон пожежного навантаження. Вищевикладене вказує на надмірну та найдовшу дію високої температури горіння та відкритого полум'я на конструктивні елементи будівлі. Під час з'ясування обставин

пожежі, а саме її поширення, було встановлено, згідно з журналом пункту зв'язку пожежно-рятувальної частини (23 ДПРЧ), що о 13 годині 50 хвилин надійшла інформація від керівника гасіння пожежі про обвал покрівлі та збільшення площі пожежі до 4000 м². З матеріалів справи по пожежі встановлено, що пожежа виникла орієнтовано о 12 годині 43 хвилин, збільшення площі пожежі з конструктивним руйнуванням сталося о 13 годині 50 хвилин, що складає приблизно 1 год. 07 хв. З актів вогнезахисної обробки відомо, що межа вогнестійкості металевих конструкції будівлі становить R 30.

Під час огляду внутрішньої електромережі торговельної зали непродуктових товарів виявлено, що електричні проводи зазнали термічного ушкодження у вигляді обгорання сплавлення жил між собою та часткового знищення ділянок. При детальному огляді електромережі в місцях ймовірних осередків пожежі виявлено аварійний режим роботи у вигляді бульб на кінцівках жил, зварювання між собою та знищення частково ділянок.

Під час огляду приміщення охорони (пультової) встановлено, що обладнання частково знищено і має сліди впливу високої температури та термічного впливу.

При огляді торговельної зали продуктових товарів виявлено, що стіни, стеля та прилавки з торговельною продукцією мають шар кіптяви та часткового обуглення. Приміщення побутового призначення зазнали значних пошкоджень у вигляді: шару кіптяви, обуглення на поверхнях внутрішнього оздоблення приміщень, часткового обвалення (знищення) стелі та суміжних перегородок.

За інформацією керівника гасіння пожежі відомо, що на момент прибуття першого пожежно-рятувального підрозділу пожежа розповсюджувалася на торговельний зал та покрівлю, автоматична система пожежогасіння в торговельному залі не працювала, склалась загроза обвалення покрівлі. Керівником гасіння пожежі першочергово встановлено, що усіх людей (до 150 осіб) адміністрацією торгового комплексу евакуйовано, загрози для життя персоналу та відвідувачів немає. На момент прибуття підрозділів ДСНС площа пожежі склала біля 800 м².

О 13 год. 06 хв. Керівник гасіння пожежі приймає рішення встановити АЦ першого відділення 23 ДПРЧ на пожежний гідрант, прокласти магістральну лінію до

центрального входу та в складі ланок ГДЗС подати стволи "ПРОТЕКС" на проведення розвідки та гасіння пожежі: один ствол "ПРОТЕКС" в складі ланки ГДЗС подати через центральний вхід, другий ствол "ПРОТЕКС" в складі ланки ГДЗС з боку продуктового магазину. АЦ другого відділення 23 ДПРЧ встановити на резервуар протипожежного водопостачання, прокласти магістральну лінію до тильного входу продуктового магазину та подати три ствола "ПРОТЕКС": два ствола "ПРОТЕКС" на гасіння пожежі через продуктивний магазин, один ствол "ПРОТЕКС" на гасіння пожежі через вхід з тильної сторони будівлі. О 13 год. 50 хв. керівник гасіння пожежі передав інформацію на пункт зв'язку частини, що стався обвал покрівлі, площа пожежі збільшилась та становить 4000 м². О 14 год. 20 хв. керівник гасіння пожежі передав на пункт зв'язку частини інформацію, пожежу локалізовано на площі 4000 м².

Таким чином для подальшої побудови комп'ютерної моделі відмічаємо такі події, які мали місце під час пожежі :

- пожежа виникла у відділі матеріалів покриття для підлоги та лако-фарбувальних матеріалів;
- система пожежної сигналізації спрацювала та подала сигнал на евакуацію людей (відвідувачі, персонал) та до пожежно-рятувальної частини;
- за 4 хв відбулося заповнення торгівельної зали димом. Таку подію приймаємо як досягнення небезпечними чинниками пожежі критичних значень для життя людини, в тому числі біля основних евакуаційних виходів, де потрібно встановити датчики виміру втрати видимості;
- за 1,5÷2 хв спрацювали клапани системи протидимного захисту, що свідчить про досягнення температури близько 70 °С на рівні покриття, зазначене потребує встановлення датчика температури в місці розташування димових клапанів;
- через 22 хв до місця пожежі прибув перший пожежно-рятувальний підрозділ та подав стволи на локалізацію та гасіння пожежі. Зазначене потребує врахування під час створення комп'ютерної моделі;

- приблизно через 1 год 07 хв відбулося руйнування колон та обвалення покриття об'єкту. Зазначене потребує встановлення температурних датчиків в місці розташування несучих елементів об'єкту (колон) та елементів покриття будівлі, яке обвалилося.

Комп'ютерна модель створена відповідно до реальної пожежі, відтворені об'ємно-планувальні рішення, для стелажів відтворені відповідні матеріали, відтворено місце займання, а саме – у відділі матеріалів покриття для підлоги та лако-фарбувальних матеріалів, відтворена система протидимного захисту із природним спонуканням через протипожежні клапани у покрівлі об'єкту, відтворена подача води зі стволів після приїзду рятувальних підрозділів, а також відтворено обвалення будівельних конструкцій колон та покрівлі.

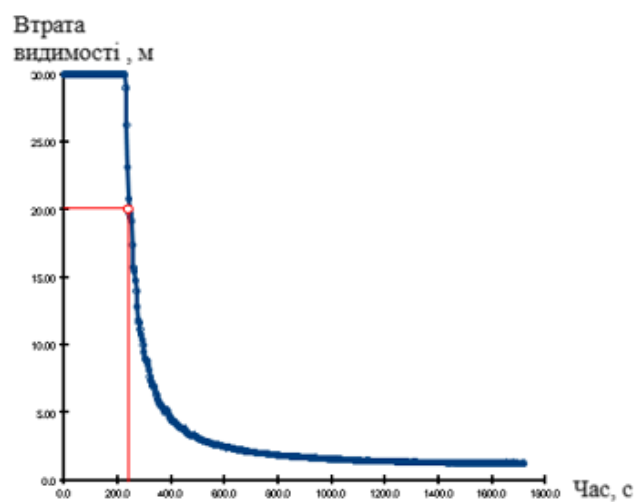
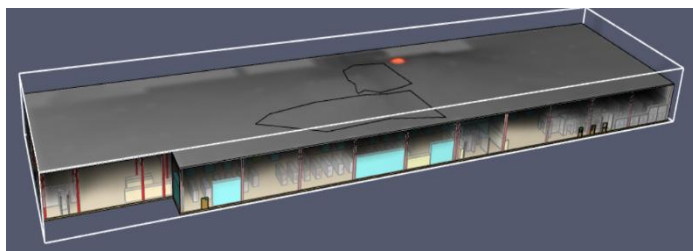
В якості критерію оцінювання рівня безпеки прийняті два параметри: втрата видимості для людини (з цією метою в комп'ютерній моделі на основних евакуаційних виходах встановлені датчики втрати видимості) та досягнення температури в зоні розташування клапанів димовидалення (з цією метою в комп'ютерній моделі в зазначеній зоні встановлені датчики температури).

Під час проведення розрахунків запропоновано розглянути три варіанти розрахункових сценаріїв, а саме:

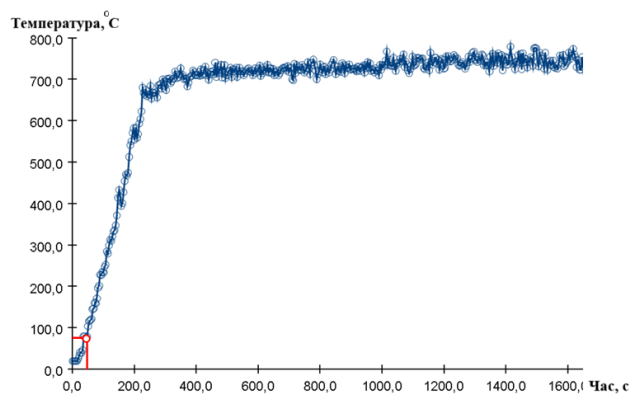
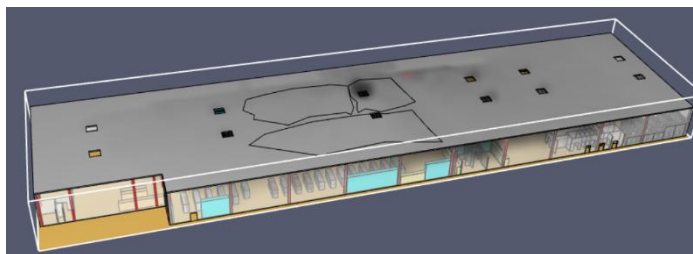
- розвиток пожежі за реальними даними подій, які мали місце під час пожежі (задимлення приміщення торгівельної зали, досягнення температури на рівня розташування клапанів димовидалення, подача води пожежно-рятувальними підрозділами);

- розвиток пожежі без функціонування системи протипожежного захисту (час досягнення втрати видимості та час досягнення температури спрацювання систем протидимного захисту в місці їх розташування);

- розвиток пожежі при функціонуванні всіх систем протипожежного захисту в тому числі системи автоматичного спринклерного пожежогасіння (з подальшим порівнянням результатів розрахунку та встановлення відповідних ймовірностей ефективного спрацювання систем протипожежного захисту та впливу на значення індивідуального пожежного ризику).



а)



б)

Рисунок 3.7 – Результати розрахунку: а) втрати видимості на шляхах евакуації, б) температура в місці улаштування протидимного клапана

У таблиці 3.4 наведено результати порівняння наслідків від пожежі та результатів моделювання за сценарієм розвитку пожежі.

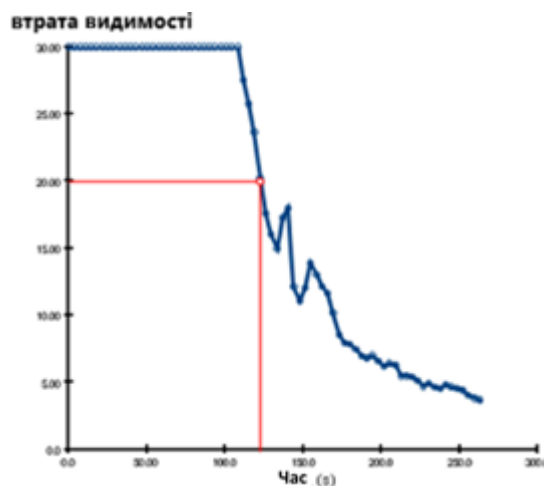
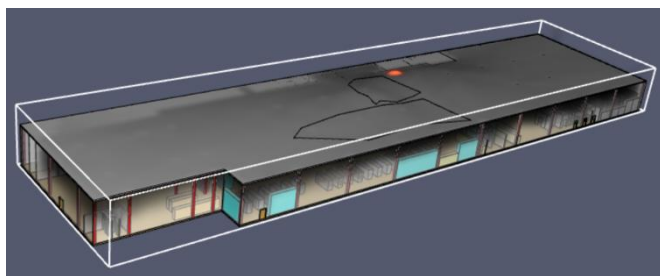
Таблиця 3.4 – Результати порівняння наслідків від пожежі та результатів моделювання за сценарієм розвитку пожежі

Сценарії	Час досягнення досліджуваними параметрами граничних значень, с	
	За втратою видимості	За температурою в місці улаштування протидимного клапана
За результатами пожежі	240	90
Розрахунок за реальними даними подій, які мали місце під час пожежі	220	70

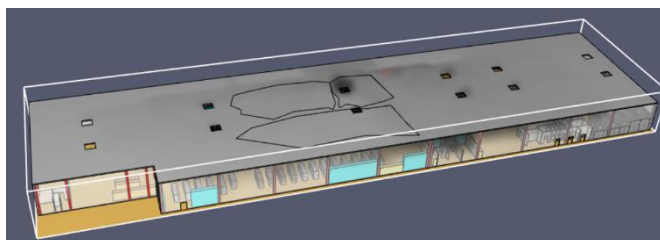
Таким чином абсолютні відхилення результатів розрахунку із реальними наслідками пожежі становлять 20 с для часу досягнення втрати видимості та 20 с для часу досягнення температури спрацювання протидимних клапанів у місці їх розташування, що у відносних показниках не перевищує 10 % та 20 % відповідно. Зазначене дозволяє використати параметри цієї комп'ютерної моделі для розрахунку часу досягнення досліджуваних параметрів із іншими комбінаціями функціонування систем протипожежного захисту та на підставі цих даних дослідити їх ефективність функціонування.

Розрахунок динаміки розвитку пожежі за сценарієм коли системи протипожежного захисту не функціонують

Результати розрахунку тривалості блокування шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі ($t_{\text{бл}}$) та тривалості досягнення температурою в місцях улаштування протидимних клапанів температури їх спрацювання представлені на рисунку 3.8.



а)

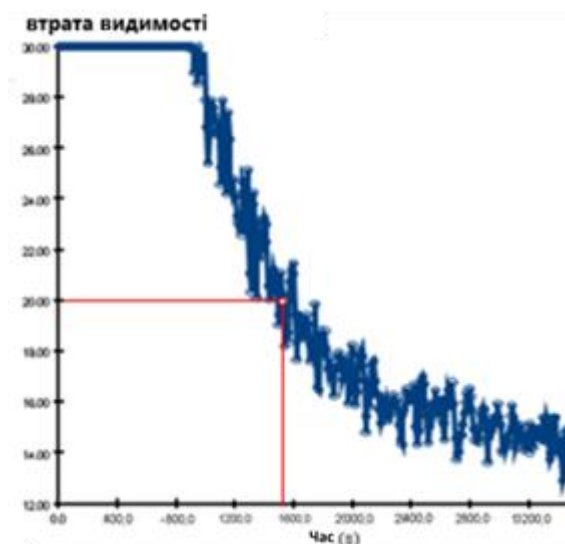
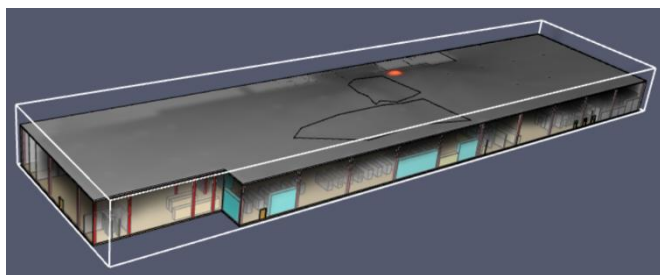


б)

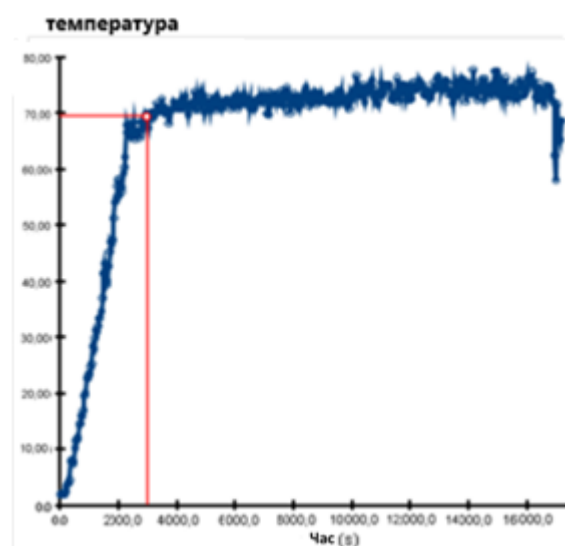
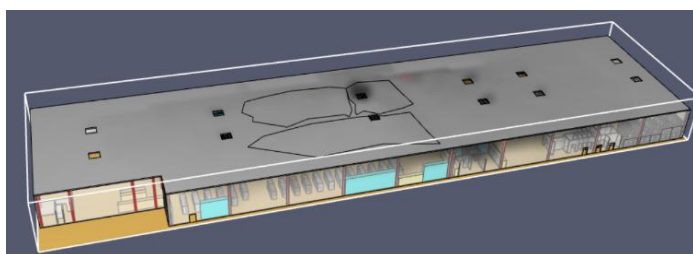
Рисунок 3.8 – Результати розрахунку: а) втрати видимості на шляхах евакуації, б) температура в місці улаштування протидимного клапана

Розрахунок динаміки розвитку пожежі за сценарієм функціонування всіх систем протипожежного захисту

Результати розрахунку тривалості блокування шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі ($t_{\text{бл}}$) та тривалості досягнення температурою в місцях улаштування протидимних клапанів температури їх спрацювання представлені на рисунку 3.9.



а)



б)

Рисунок 3.9 – Результати розрахунку: а) втрати видимості на шляхах евакуації, б) температура в місці улаштування протидимного клапана

В таблиці 3.5 наведено отримані результати часу блокування небезпечними чинниками пожежі основних евакуаційних виходів для досліджуваних сценаріїв та часу досягнення температурою значень спрацювання протидимного клапана у місці його улаштування.

Таблиця 3.5 – Результати розрахунку часу блокування небезпечними чинниками пожежі основних евакуаційних виходів для досліджуваних сценаріїв та часу досягнення температурою значень спрацювання протидимного клапана у місці його улаштування

Розрахунковий сценарій	Час досягнення досліджуваними параметрами граничних значень, с	
	За втратою видимості	За температурою в місці улаштування протидимного клапана
За результатами пожежі	240	90
Розрахунок за реальними даними подій, які мали місце під час пожежі	220	70
Розрахунок без функціонування системи протипожежного захисту	120	35
Розрахунок із функціонуванням систем протипожежного захисту в тому числі спринклерної системи автоматичного пожежогасіння	1571	3307

Використовуючи залежність (2.6) здійснюємо розрахунки, щоб отримати дані щодо ймовірностей ефективного спрацювання систем протипожежного захисту для кожного із розглянутих вище розрахункових сценаріїв розвитку пожежі. Результати розрахунків з визначення ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту для розглянутого випадку пожежі в торговельному закладі наведено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Значення ймовірностей ефективного спрацювання систем протипожежного захисту для розглянутого випадку пожежі в торговельному закладі

Функціонування СПЗ	Значення ймовірностей ефективного спрацювання СПЗ
Система пожежної сигналізації та оповіщення	0,54
Систем димовидалення	0,5
Спринклерна автоматична система пожежогасіння	0,86

Таким чином, використовуючи комп'ютерну FDS модель, яка побудована на основі вихідних даних реальної пожежі встановлено ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику, які становлять згідно проведених досліджень: для системи пожежної сигналізації 0,54; для системи оповіщення про пожежу та системи протидимного захисту 0,5; для автоматичної системи пожежогасіння 0,86 [181].

3.2 Дослідження впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик на основі імовірнісно-статистичних методів

3.2.1 Збір та узагальнення статистичних даних для дослідження впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику

З метою встановлення для відповідної системи протипожежного захисту ймовірності її ефективного спрацювання використовуючи формулу (2.59) необхідно зібрати статистичні дані по компонентах зазначеної формули, а саме про кількість пожеж на об'єктах, які оснащені відповідною системою протипожежного захисту та під час яких мали реалізацію наступні події:

- пожежа ліквідувалася на початковій стадії її розвитку без залучення пожежно-рятувальних підрозділів;
- пожежа ліквідувалася із залученням пожежно-рятувальних підрозділів;
- на ліквідацію пожежі залучалися додаткові сили і засоби пожежно-рятувальних підрозділів;

- на пожежі гинули люди.

Для обґрунтування ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику, відповідно до формули (2.61), необхідно зібрати статистичну інформацію щодо: кількості об'єктів, що мають бути оснащені системами протипожежного захисту за нормативними документами; кількості об'єктів, фактично оснащених цими системами; кількості об'єктів, на яких дотримуються регламентів технічного обслуговування систем; а також кількості систем, які успішно функціонували під час пожежі. Для систематизації цих даних розроблено опитувальну анкету у вигляді табличної форми, приклад якої наведено у таблиці 3.7.

Опитувальну анкету направлено до територіальних підрозділів ДСНС України.

Таблиця 3.7 – Опитувальна анкета щодо ефективного функціонування систем протипожежного захисту

№ за/п	Вид системи протипожежного захисту (СПЗ)	Кількість об'єктів, які оснащені СПЗ	Кількість об'єктів, які згідно із нормативними документами повинні оснащуватися СПЗ	Кількість СПЗ, які дотримуються регламенту технічного обслуговування	Кількість спрацювання СПЗ	Кількість пожеж на об'єктах, які оснащені СПЗ
1.	Система пожежної сигналізації					Загальна кількість ____; * кількість пожеж, які ліквідовані на початковій стадії без виклику пожежних підрозділів ____; * кількість пожеж, які ліквідовано із залученням пожежних підрозділів ____; * кількість пожеж на ліквідацію яких залучалися додаткові сили ____; * кількість пожеж на яких загинула людина _____.
2.	Автоматична система пожежогасіння					Загальна кількість ____; * кількість пожеж, які ліквідовані на початковій стадії без виклику пожежних підрозділів ____; * кількість пожеж, які ліквідовано із залученням пожежних підрозділів ____; * кількість пожеж на ліквідацію яких залучалися додаткові сили ____; * кількість пожеж на яких загинула людина _____.
3.	Система протидимного захисту					Загальна кількість ____; * кількість пожеж, які ліквідовані на початковій стадії без виклику пожежних підрозділів ____; * кількість пожеж, які ліквідовано із

						залученням пожежних підрозділів ____; * кількість пожеж на ліквідацію яких залучалися додаткові сили ____; * кількість пожеж на яких загинула людина _____.
4.	Система оповіщення про пожежу					Загальна кількість ____; * кількість пожеж, які ліквідовані на початковій стадії без виклику пожежних підрозділів ____; * кількість пожеж, які ліквідовано із залученням пожежних підрозділів ____; * кількість пожеж на ліквідацію яких залучалися додаткові сили ____; * кількість пожеж на яких загинула людина _____.
5.	Система зовнішнього протипожежного водопроводу					Загальна кількість ____; * кількість пожеж, які ліквідовані на початковій стадії без виклику пожежних підрозділів ____; * кількість пожеж, які ліквідовано із залученням пожежних підрозділів ____; * кількість пожеж на ліквідацію яких залучалися додаткові сили ____; * кількість пожеж на яких загинула людина _____.
6.	Система внутрішнього протипожежного водопроводу					Загальна кількість ____; * кількість пожеж, які ліквідовані на початковій стадії без виклику пожежних підрозділів ____; * кількість пожеж, які ліквідовано із залученням пожежних підрозділів ____; * кількість пожеж на ліквідацію яких залучалися додаткові сили ____; * кількість пожеж на яких загинула людина _____.

Узагальнення статистичних даних для дослідження впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику

Статистичні дані щодо ефективного функціонування систем протипожежного захисту надані територіальними підрозділами ДСНС України, проведено їх узагальнення. Узагальнені статистичні дані (наведені у таблиці 3.8) щодо кількості пожеж на об'єктах, які оснащені відповідною системою протипожежного захисту та під час яких мала місце реалізація наступних подій: пожежа ліквідувалася на початковій стадії її розвитку без виклику пожежно-рятувальних підрозділів; пожежа ліквідувалася із залученням пожежно-рятувальних підрозділів; на ліквідацію пожежі залучалися додаткові сили і засоби пожежно-рятувальних підрозділів; на пожежі загинули люди.

Таблиця 3.8 – Узагальнені статистичні дані щодо кількості пожеж

Події, які мали реалізацію під час пожежі	Кількість пожеж на об'єктах оснащених відповідною СПЗ					
	АПС	АСПГ	СПДЗ	СО	ЗВ	ВВ
Пожежа погашена на початковій стадії	80	91	3	57	7	22
Пожежу погашено із залученням ПРП	1409	48	63	529	4979	226
Пожежу погашено із залученням додаткових сил	92	35	19	111	217	58
На пожежі гинули люди	14	11	5	4	107	5
Загальна кількість пожеж	1595	185	90	701	5310	311

Узагальнені статистичні дані про об'єкти, зокрема щодо: кількості об'єктів, які повинні бути оснащені системами протипожежного захисту згідно із нормативними документами; кількості об'єктів, які оснащені системами протипожежного захисту; кількості об'єктів, на яких для систем протипожежного захисту дотримуються регламентів технічного обслуговування; кількості об'єктів, на яких спрацювали системи протипожежного захисту наведені у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Узагальнені статистичні дані про об'єкти

Кількість пожеж на об'єктах, що оснащені СПЗ						Кількість пожеж ліквідованих на початковій стадії						Кількість пожеж ліквідованих із залученням пожежних підрозділів						Кількість пожеж до ліквідації, яких викликалися додаткові сили						Кількість пожеж на яких гинули люди					
АПС	АСПГ	СПДЗ	СО	ППВ		АПС	АСПГ	СПДЗ	СО	ППВ		АПС	АСПГ	СПДЗ	СО	ППВ		АПС	АСПГ	СПДЗ	СО	ППВ		АПС	АСПГ	СПДЗ	СО	ППВ	
				З	В					З	В					З	В					З	В					З	В
1595	185	90	701	5310	311	103	21	3	57	7	22	1409	141	76	644	5301	271	211	35	19	111	217	58	14	11	5	4	107	5

3.2.2 Розрахунки щодо дослідження впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику на основі статистичних даних

Використовуючи дані таблиці 3.7 можна визначити відносну кількість пожеж при оснащенні будинків відповідними системами протипожежного захисту, як передумову для обґрунтування ефективності функціонування відповідної системи протипожежного захисту. Отримані результати наведені у таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Відносна кількість пожеж при оснащенні будинку відповідними системами протипожежного захисту

Етапи розвитку пожежі	Відповідна кількість пожеж					
	АПС	АСПГ	СПДЗ	СО	ЗВ	ВВ
Пожежа погашена на початковій стадії	0,05	0,49	0,03	0,08	0,01	0,07
Пожежу погашено із залученням ПРП	0,88	0,26	0,64	0,75	0,93	0,72
Пожежу погашено із залученням додаткових сил	0,06	0,19	0,21	0,16	0,04	0,19
На пожежі гинули люди	0,01	0,06	0,12	0,01	0,02	0,02

Використовуючи дані таблиці 3.10 можна побудувати залежності ефективності функціонування відповідної системи протипожежного захисту від умов гасіння пожежі. Зазначені залежності наведені на рисунку 3.10.

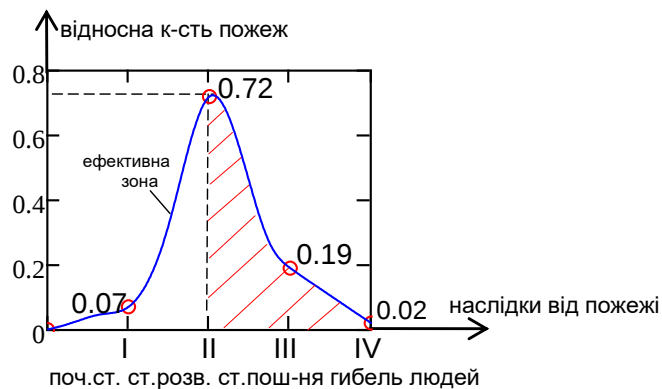
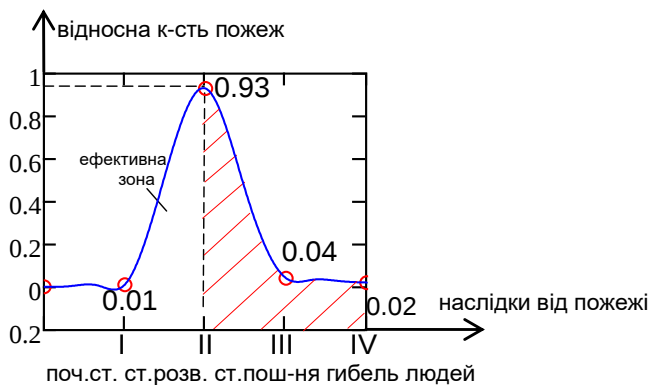
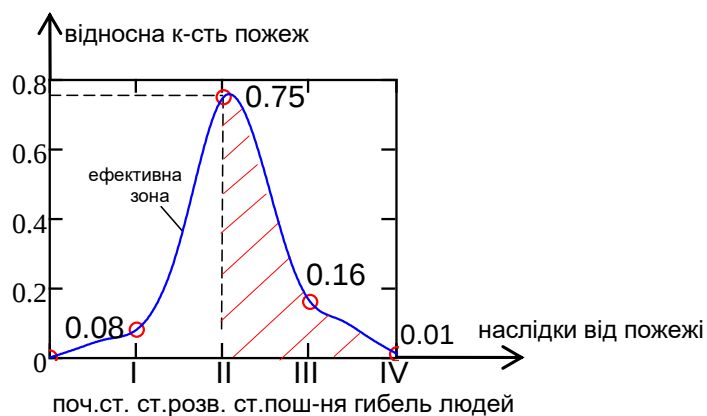
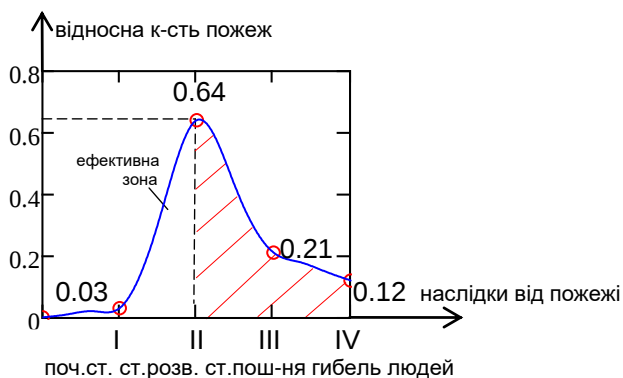
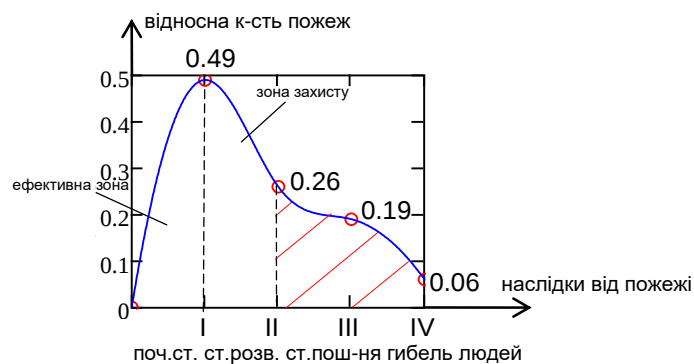
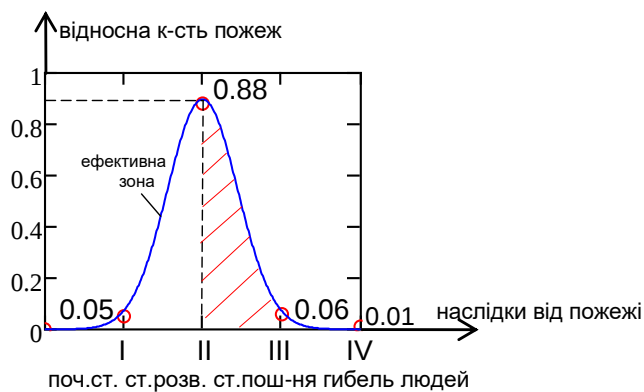


Рисунок 3.10 – Залежності ефективності функціонування відповідної системи протипожежного захисту від умов гасіння пожежі: а) для АПС, б) для АСПГ, в) для СПДЗ, г) для СО, д) для ЗВ, е) для ВВ.

Аналізуючи залежності, які наведені на рисунку 3.10 можна зробити такі висновки.

Для кожної системи протипожежного захисту ефективність її функціонування обумовлюється (характеризується) відповідними умовами гасіння пожежі, які пов'язані із виконанням функцій відповідною системою протипожежного захисту. Наприклад, ефективність функціонування автоматичних систем пожежогасіння обумовлюється (характеризується) ліквідацією пожеж на їх початкових стадіях. Відносна кількість таких випадків становить 0,49.

Ефективність функціонування систем пожежної сигналізації, систем оповіщення, протидимного захисту, зовнішнього та внутрішнього протипожежного водопостачання обумовлюється (характеризується) ліквідацією пожеж із залученням пожежно-рятувальних підрозділів. Відносна кількість таких випадків становить 0,88; 0,64; 0,75; 0,93 та 0,72 відповідно. Такі події, як пожежа для ліквідації якої залучаються додаткові сили і засоби та пожежа, на якій мала місце загибель людини відносимо до подій із неприйнятним ступенем ризику. Таким чином в подальших дослідженнях під час обґрунтування ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику слід провести оцінювання індивідуальних пожежних ризиків саме для цих подій.

Слід також відмітити, що відносна кількість пожеж для випадків на яких мала місце загибель людей та коли об'єкти оснащені системами пожежної сигналізації та системами оповіщення становить 0,01. Це пояснюється тим, що якщо система пожежної сигналізації та система оповіщення ефективно спрацювали на етапі початкової стадії пожежі, то відбувається своєчасне сповіщення людей про пожежу та своєчасна їх евакуація і, як наслідок, відсутність загиблих людей на пожежі.

Також слід відмітити досить високу ефективність впливу функціонування таких систем як автоматична система пожежогасіння, протидимного захисту, внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопостачання на таку небезпечну подію як ліквідація пожежі із залученням додаткових сил і засобів. Це можна пояснити можливістю ефективного використання зазначених систем на різних стадіях розвитку пожежі та різних масштабах їх розвитку [182].

Далі проводимо узагальнення статистичних даних, що приведені у таблиці 3.8. Для цього використовуємо математичну модель обробки статистичних даних, сутність якої полягає у наступному.

Перед початком розрахунку статистичні дані перевіряються, відповідно до [102], на наявність викидів та квазівикидів застосовують критерій Граббса.

Перевірку отриманих даних проводимо за одним показником. Набір даних, отриманих для відповідних видів робіт, розташовують у порядку зростання. Далі для встановлення того, чи є найбільший результат в ранжованому ряду $x_{j\max}$ викидом чи квазівикидом, розраховують статистику Граббса, $G_{j\max}$

$$G_{j\max} = \frac{x_{j\max} - \bar{x}_j}{S_j}, \quad (3.2)$$

де $\bar{x}_j$ і S_j – відповідно середнє значення та середньоквадратичне відхилення, розраховані для відповідних видів робіт.

Для перевірки значимості відхилення найменшого значення в упорядкованому ряду, $x_{j\min}$, розраховують критерій Граббса, $G_{j\min}$:

$$G_{j\min} = \frac{\bar{x}_j - x_{j\min}}{S_j} \quad (3.3)$$

Розраховані таким чином значення $G_{j\max}$ та $G_{j\min}$ для кожного виду робіт порівнюють з 5 % ($G_{\text{кр. 5\%}}$) та 1 % ($G_{\text{кр. 1\%}}$) критичними значеннями.

Якщо після порівняння $G_{j\max}$ або $G_{j\min}$ з їх критичними значеннями виявиться, що ці розраховані значення коефіцієнтів становлять більше ніж 5 %-ве критичне значення ($G_{\text{кр. 5\%}}$) і менше (або дорівнює) 1 %-го ($G_{\text{кр. 1\%}}$) критичного значення ($G_{\text{кр. 1\%}}$), тоді значення $x_{j\max}$ або $x_{j\min}$ вважають квазівикидом.

Якщо розраховане значення $G_{j\max}$ або $G_{j\min}$ більше 1 %-го критичного значення ($G_{\text{кр. 1\%}}$), то відповідно $x_{j\max}$ або $x_{j\min}$ вважають викидом.

Якщо розраховані значення G_{jmax} та G_{jmin} виявляються меншими (або рівними) за критичні значення 5 %, то дані не містять викидів та квазівикидів.

Для визначення граничних навантажень проводиться побудова емпіричних функцій розподілу досліджуваних навантажень на основі гістограм, із подальшою оцінкою параметрів розподілу, зокрема середнього значення та середньоквадратичного відхилення.

Загальний теоретичний підхід до побудови гістограм і обчисленню їх параметрів описані в [183, 184].

Обчислення параметрів розподілу навантажень проводяться наступним чином. Формується вибірка випадкових величин навантажень $\{x\} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, де N – розмір вибірки випадкових величин. По ній будується згрупований статистичний ряд. Для визначення кількості інтервалів груп L використовується формула Брукса:

$$L = 5 \lg N \quad (3.4)$$

Знаходиться мінімальне та максимальне значення вибірки $x_{\min} = \min\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ і $x_{\max} = \max\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ та визначається довжина інтервалу групи (крок гістограми) за формулою:

$$\Delta x = (x_{\max} - x_{\min}) / (L - 1), \quad (3.5)$$

Межі k -го інтервалу гістограми визначаються за формулами:

$$x_{k-1} = x_{\min} - 0,5 \Delta x, \quad (3.6)$$

$$x_k = x_{k-1} + \Delta x \quad (3.7)$$

Визначаємо n_k випадкових величин з вибірки $\{x\}$, які потрапили в k -й інтервал $[x_{k-1}, x_{k-1} + \Delta x]$. Для зручності межі інтервалів можуть округлятися, але обов'язково повинна дотримуватися сталість кроку гістограми Δx .

Для побудови групованого статистичного ряду відносних частот обчислюються відносні частоти $p_k = n_k/N$ та перевіряється умова

$$\frac{n_1}{N} + \frac{n_2}{N} + \dots + \frac{n_L}{N} = 1 \quad (3.8)$$

Для графічного представлення гістограми обчислюються висоти H_k прямокутників гістограми і визначається максимальне значення висоти $H_{\max} = \max\{H_1, H_2, \dots, H_L\}$.

$$H_k = n_k/\Delta x \quad (3.9)$$

На осі абсцис графіків гістограм вибирається початкова точка x_0 і такий масштаб, щоб повністю помістився відрізок $[x_0, x_L]$. На осі ординат вибирається початок відліку в точці 0 і такий масштаб, щоб повністю помістився відрізок $[0, H_{\max}]$. Для кожного інтервалу $[x_{k-1}, x_k]$ будується прямокутник висотою H_k з основою Δx . В результаті отримуємо гістограму абсолютних частот. Для побудови гістограми відносних частот в якості висоти k -го прямокутника використовується величина $p_k/\Delta x = n_k/N/\Delta x$.

Математичне очікування гістограми μ_Γ визначається за формулою:

$$\mu_\Gamma = x_0 + \Delta x \left(\sum_{k=1}^L p_k K - \frac{1}{2} \right) \quad (3.10)$$

Дисперсія гістограми σ_Γ^2 визначається за формулою:

$$\sigma_\Gamma^2 = (\Delta x)^2 \left[\frac{1}{12} + \sum_{k=1}^L p_k K^2 - \left(\sum_{k=1}^L p_k K \right)^2 \right] \quad (3.11)$$

Відповідно, середньоквадратичне відхилення дорівнює:

$$\sigma_{\Gamma} = \sqrt{\sigma_{\Gamma}^2} \quad (3.12)$$

Щоб врахувати фактори, які впливають на результат запропоновано використовувати граничне значення v_{Γ} – результати, з урахуванням факторів, що впливають на них [185]:

$$v_{\Gamma} = \mu_{\Gamma} - \sigma_{\Gamma} \quad (3.13)$$

Зведені дані розрахунків наведені у таблиці 3.10.

Таблиця 3.11 – Зведені статистичні дані про кількість об'єктів, на яких функціонують відповідні системи протипожежного захисту

Об'єкти, на яких функціонують СПЗ	Тип СПЗ	Кількість об'єктів
Об'єкти, які повинні бути оснащені СПЗ згідно із нормативними документами	АПС	11180
	АСПГ	885
	СПДЗ	916
	СО	10172
	ЗВ	5674
	ВВ	4186
Об'єкти, які оснащені СПЗ	АПС	7591
	АСПГ	472
	СПДЗ	424
	СО	7101
	ЗВ	4528
	ВВ	3469
Об'єкти, на яких для СПЗ дотримують регламентних робіт із технічного обслуговування	АПС	5760
	АСПГ	467
	СПДЗ	220
	СО	5300
	ЗВ	3339
	ВВ	3107
Об'єкти, на яких СПЗ спрацювали під час пожежі	АПС	972
	АСПГ	160
	СПДЗ	36
	СО	378
	ЗВ	2548
	ВВ	121

Використовуючи дані таблиці 3.11 та формули 2.61-2.62 визначимо ймовірність ефективності виконання функцій систем протипожежного захисту, ймовірність оснащеності об'єктів системами протипожежного захисту та ймовірність справності систем протипожежного захисту. Отримані дані наведені у таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Дані щодо ймовірностей, які визначають ефективність спрацювання відповідних систем протипожежного захисту

Коефіцієнти	Системи протипожежного захисту					
	АПС	СПГ	ПДЗ	СО	ЗВ	ВВ
Ймовірність оснащеності	0,67	0,58	0,72	0,7	0,85	0,82
Ймовірність справності	0,74	0,98	0,52	0,76	0,74	0,89
Ймовірність ефективного спрацювання	0,75	0,87	0,58	0,54	0,6	0,7
Ймовірність ефективного спрацювання визначений із використанням формули 2.60	0,5	0,6	0,37	0,5	0,5	0,5

Зведемо всі отримані дані проведених обчислень ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту при їх одночасному функціонуванні на значення індивідуального пожежного ризику до таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Зведені результати щодо ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захистку на значення індивідуального пожежного ризику

Попередньо проведені обчислення	Ймовірності ефективного спрацювання СПЗ на значення індивідуального пожежного ризику					
	АПС	АСПГ	СПДЗ	СО	ЗВ	ВВ
Моделювання пожежі в Епіцентрі	0,61	0,97	0,56	0,56	-	-
Моделювання пожеж в громадських будинках	-	0,6	0,57	-	-	-
Обчислення на основі статистичних даних	0,75	0,87	0,5	0,5	0,6	0,7

Із таблиці 3.13 вибираємо значення ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захистку на значення індивідуального пожежного ризику, яке найменше знижує значення індивідуального пожежного ризику та встановлюємо значення ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту. При цьому слід врахувати, що система оповіщення про пожежу не функціонує без системи пожежної сигналізації тому ймовірність ефективного спрацювання таких систем доцільно об'єднати. Системи протидимного захисту, внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопостачання реалізують одну із основних функцій щодо забезпечення безпеки пожежно-рятувальних підрозділів під час проведення рятувальних робіт та робіт щодо ліквідації пожежі, тому ймовірності ефективного спрацювання таких систем також доцільно об'єднати.

Отримані дані щодо ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту наведені у таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 – Значення ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту

Вид системи протипожежного захисту	Значення ймовірності ефективного спрацювання СПЗ
Систем пожежної сигналізації та система оповіщення про пожежу	0,61
Автоматична система пожежогасіння	0,87
Система протидимного захисту, системи внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопроводу	0,5

Таким чином в роботі встановлено, що значення ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту становлять для систем пожежної сигналізації та оповіщення про пожежу – 0,61, для системи автоматичного пожежогасіння – 0,87, для систем протидимного захисту, внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопроводу – 0,5.

3.3 Проведення повнофакторного експерименту

З метою встановлення залежності значення індивідуального пожежного ризику від ефективності спрацювання систем протипожежного захисту проведемо факторний експеримент.

Для побудови плану факторного експерименту використано попередньо обґрунтований перелік систем протипожежного захисту, які мають найбільший потенційний вплив на значення індивідуального пожежного ризику. До них належать системи пожежної сигналізації та оповіщення (СПС і СО), системи автоматичного пожежогасіння (АСПГ), системи протидимного захисту, а також внутрішнього і зовнішнього протипожежного водопостачання (СПДЗ, ВВ, ЗВ). У таблиці 3.15 наведено інтервали параметрів експерименту та ефективності впливу

зазначених систем на значення індивідуального пожежного ризику, визначені у попередніх розділах.

Таблиця 3.15 – Інтервали параметрів в експерименті, ефективності впливу визначених систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику

АПС та СО			АСПГ			СПДЗ, ЗВ, ВВ		
Найменше значення	Середнє значення	Найбільше значення	Найменше значення	Середнє значення	Найбільше значення	Найменше значення	Середнє значення	Найбільше значення
0,61	0,7	0,75	0,6	0,87	0,97	0,5	0,6	0,7

Для реалізації факторного експерименту проведено розрахунки значень індивідуального пожежного ризику для всіх варіантів, наведених у таблиці 3.16. При цьому прийнято припущення: імовірність перебування людей в об'єкті становить 1, імовірність їх евакуації дорівнює 0, а коефіцієнти впровадження організаційних заходів та наявності протипожежних формувань прийняті рівними 0. Отримані результати наведені у таблиці 3.16.

Таблиця 3.16 – Розраховані значення індивідуального пожежного ризику для всіх варіацій визначених ймовірностей

Частота виникнення пожежі у будівлі	Розрахункове значення індивідуального пожежного ризику для відповідного номера експерименту згідно із таблицею 2.4							
	1	2	3	4	5	6	7	8
10^{-1}	$4,75 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$9,9 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
10^{-2}	$4,75 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$
10^{-3}	$4,75 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$6,3 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$9,9 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$
10^{-4}	$4,75 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$9,9 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$
10^{-5}	$4,75 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$6,3 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$9,9 \cdot 10^{-9}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$

Інтерполюючи дані, представлені в таблиці, за прийнятим рівнем індивідуального пожежного ризику, можна визначити відповідну частоту виникнення пожеж. Результати такого обчислення наведені в таблиці 3.17.

Таблиця 3.17 – Частота виникнення пожежі

Номер експерименту	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота виникнення пожежі	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	10^{-2}	$4 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$

Використовуючи дані таблиці 3.17 визначені константи рівняння числової регресії, які наведені у таблиці 3.18.

Таблиця 3.18 – Константи рівняння числової регресії

Коефіцієнт	b_0 ,	b_1 ,	b_2 ,	b_3 ,	b_4 ,	b_5 ,	b_6 ,	b_7
Значення	0,0005	-0,0255	-0,0034	0,0075	0,16	-0,19	0,039	0,52

Таким чином використовуючи дані математичної моделі процесу поширення небезпечних чинників пожежі у приміщенні, а також статистичні дані, які обчислені із використанням методів теорії ймовірності та провівши факторний експеримент встановлена залежність значення індивідуального пожежного ризику від ефективності спрацювання систем протипожежного захисту, що має вигляд рівняння:

$$R=0,0005-0,0255x_1-0,0034x_2+0,0075x_3+0,16x_1x_2-0,19x_1x_3+0,039x_2x_3+0,52x_1x_2x_3 \quad (3.14)$$

де x_1 – ефективність спрацювання систем пожежної сигналізації та оповіщення про пожежу;

x_2 – ефективність спрацювання автоматичної системи пожежогасіння;

x_3 – ефективність спрацювання систем протидимного захисту, внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопроводу.

3.4 Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що результати розрахунків із використанням розробленої комп'ютерної моделі відрізняються від реальних наслідків від пожежі в торгівельно-розважальному центрі «Епіцентр» у абсолютних величинах 10 с для часу досягнення втрати видимості та 80 с для часу досягнення температури спрацювання протидимних клапанів у місці їх розташування, що у відносних величинах не перевищує 10 % та 20 % відповідно. Зазначене дозволяє використати параметри цієї комп'ютерної моделі для дослідження ефективності функціонування систем протипожежного захисту.

2. Встановлено, що система оповіщення про пожежу не функціонує без системи пожежної сигналізації тому ймовірності ефективного спрацювання таких систем доцільно об'єднати. Системи протидимного захисту, внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопостачання реалізують одну із основних функцій щодо забезпечення безпеки пожежно-рятувальних підрозділів під час проведення рятувальних робіт та робіт щодо ліквідації пожежі, тому ймовірності ефективного спрацювання таких систем також доцільно об'єднати.

3. Встановлено, що значення ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту становлять для систем пожежної сигналізації та оповіщення про пожежу – 0,61, для системи автоматичного пожежогасіння – 0,87, для систем протидимного захисту, внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопроводу – 0,5.

4. Використовуючи дані математичної моделі процесу поширення небезпечних чинників пожежі у приміщенні, а також статистичні дані, які обчислені із використанням методів теорії ймовірності та провівши факторний експеримент встановлена залежність значення індивідуального пожежного ризику від ефективності спрацювання систем протипожежного захисту, що має вигляд рівняння:

$$R=0,0005-0,0255x_1-0,0034x_2+0,0075x_3+0,16x_1x_2-0,19x_1x_3+0,039x_2x_3+0,52x_1x_2x_3$$

РОЗДІЛ 4 ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ВПЛИВУ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА ІНДИВІДУАЛЬНИЙ ПОЖЕЖНИЙ РИЗИК

У цьому розділі представлені результати перевірки розроблених математичних моделей для дослідження закономірності впливу ефективності функціонування систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику.

Результати теоретичних досліджень впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик були верифіковані шляхом проведення експериментальних досліджень. Експериментальна перевірка виконувалася відповідно до розробленої програми та методики досліджень.

4.1 Програма та методика експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження базуються на концепції, викладеній у розділі 3, зокрема на визначенні часу досягнення критичних для життя людини значень таких небезпечних чинників пожежі, як температура та втрата видимості. Дослідження проводяться для двох сценаріїв: без системи протипожежного захисту та за її наявності. У другому випадку окремо аналізуються ефекти системи пожежної сигналізації, системи протидимного захисту та автоматичної системи пожежогасіння.

Обладнання для досліджень

Обладнання для проведення експериментальних досліджень включає: споруда ВБК-220, вогнище пожежі, засоби вимірювальної техніки, обладнання для проведення фото та відео зйомок.

Споруда ВБ-40

Споруда ВБ-40 являє собою одноповерхову споруду (рисунок 4.1) розмірами в плані 4920 мм х 3420 мм х 2620 мм. Площа підлоги споруди ВБ-40 становить 16,83 м². Об'єм споруди становить 43 м³. Споруда ВБ-40 оснащена дверними прорізами та отворами у стінах, які доцільно використати, в якості системи природного протидимного захисту. Розмір дверного прорізу становить ширина 700 мм, висота 1900 мм.

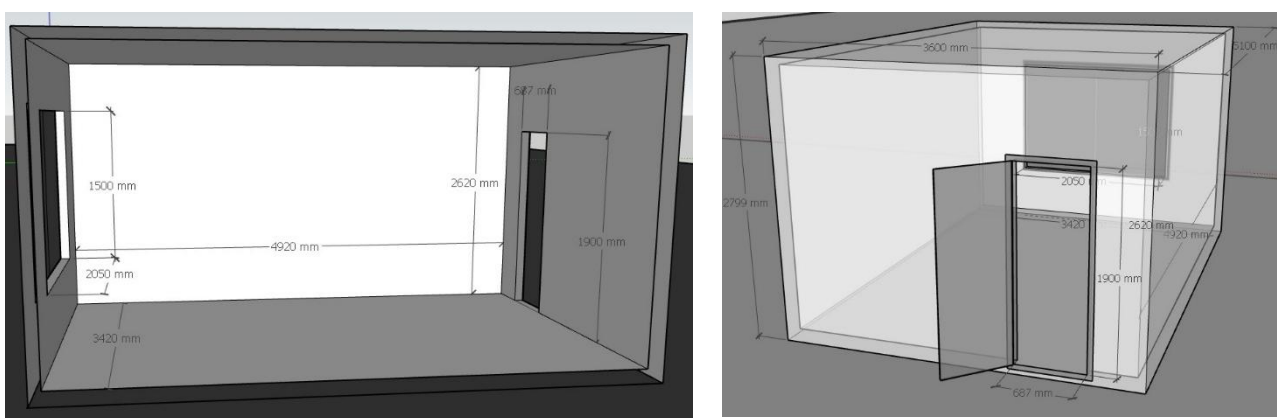


Рисунок 4.1 – Схематичне зображення споруди ВБ-40

На рисунку 4.2 наведено фото споруди ВБ-40



Рисунок 4.2 – Фото споруди ВБ-40

Вогнище пожежі

Для моделювання пожежної навантаги використано тверді горючі матеріали (вогнище класу А) у вигляді дерев'яних брусків розміром 50×50×250 мм, укладених у п'ять рядів. Бруски кожного ряду розташовуються з рівними проміжками 6 мм між ними для забезпечення однорідного горіння. Деревина має вологість 10–15 % за масою та густину від 0,40 до 0,65 кг/дм³, а вогнище встановлено на металеву опору відповідних розмірів згідно з [187], при цьому вологість контролюється електровологоміром [188]. Фото модельного вогнища пожежі класу А зображено на рисунку 4.3.



Рисунок 4.3 – Фото модельного вогнища пожежі

Засоби вимірювальної техніки

Під час проведення експериментальних досліджень вимірюємо температуру та задимлення в об'ємі споруди ВБ-40.

Для вимірювання температури в споруді ВБ-40 на висоті 1,7 м від підлоги встановлюємо термопари. В споруді ВБ-40 слід встановити дві термопари на протилежних довгих стінах споруди ВБ-40 на відстані 100 мм від огорожувальних стін. На рисунку 4.4 зображено фото місця розташування термопари для вимірювання температури у споруді ВБ-40.



Рисунок 4.4 – Фото місця розташування термопар у споруді ВБ-40

Для контролю задимлення у споруді ВБ-40 на висоті 1,7 м від підлоги з одного боку довшої стіни встановлюють лазерний випромінювач, а з протилежного боку – приймач променя. Обидва прилади розташовуються так, щоб промінь лазера проходив перпендикулярно до осі входних дверей споруди. Фото розташування випромінювача та приймача в споруді ВБ-40 наведено на рисунку 4.5.



Рисунок 4.5 – Фото місця розташування лазерного випромінювача та приймача у споруді ВБ-40

Загальна схема розташування засобів вимірної техніки у споруді ВБ-40 наведено на рисунку 4.6. На рисунку 4.7 наведено фото лазерного випромінювача та приймача.

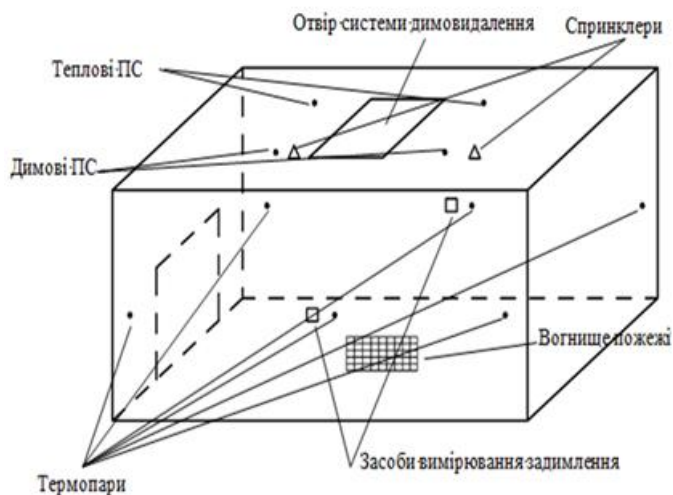


Рисунок 4.6 - Загальна схема розташування засобів виміральної техніки у споруді ВБ-40



Рисунок 4.7 – Фото лазерного випромінювача та приймача

Споруда ВБ-40 оснащувалася системою пожежної сигналізації рисунок 4.8 та автоматичною спринклерною системою водяного пожежогасіння рисунок 4.9

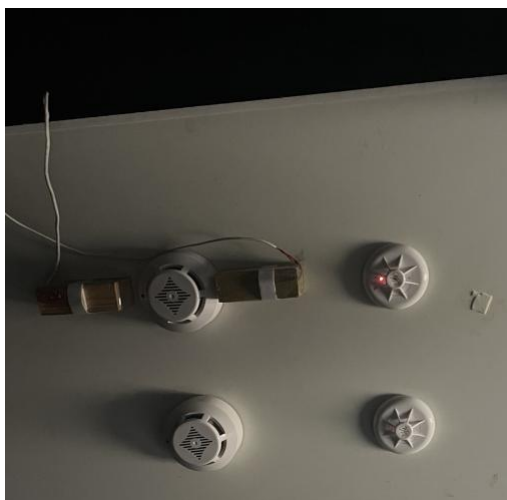


Рисунок 4.8 – Фото системи пожежної сигналізації в споруді ВБ-40



Рисунок 4.9 – Фото автоматичної спринклерної системи водяного пожежогасіння в споруді ВБ-40

Перелік вимірювальних приладів, задіяних у ході експериментальних досліджень, разом із їхніми технічними характеристиками наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики обладнання для досліджень

№ п/п	Найменування обладнання для досліджень	Характеристика	Значення характеристики	Одиниці вимірювання	Похибка
1.	Лазерний випромінювач d 6 мм Н4А3	потужність	5	мВт	±0,01 %
2.	Фоторезистр GL 5516 5-10 КОМ	потужність	5	мВт	±0,01 %
3.	Термопари	Температура	-40÷1350	°С	±2,5 %
4.	Вимірювально-обчислювальна система «Термоконт»	Температура	0÷1200	°С	±0,6 %
5.	Блок регулятор	Сила струму	30	А	
6.	Вологомір для деревини ВПК-12	Вологість	6÷100	%	±2 %
7.	Рулетка Р10 УЗК	Метр	0÷10	м	2 кл. точн.
8.	Психрометр аспіраційний МВ-4М	Температура Вологість	-10÷50 6÷100	°С %	±0,2 % ±4 %
9.	Барометр-анероїд М67	Тиск	600÷800	мм.рт.ст.	±1 мм.рт.ст.
10.	Анемометр крильчастий АСО-3	Швидкість	0,3÷5	м/с	±1 (0,1+ 0,05V _{вим}) м/с

Вимоги до проведення досліджень

Експериментальні дослідження виконувалися за наступними умовами: приміщення без систем протипожежного захисту, приміщення із системою пожежної сигналізації, приміщення із системою протидимного захисту та приміщення з автоматичною системою пожежогасіння. Кожен етап дослідження, наведений у таблиці 4.2, проводився щонайменше тричі для забезпечення достовірності результатів.

Експериментальні дослідження слід проводити в послідовності, що наведена в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Послідовність проведення експериментальних досліджень

№ з/п	Етап експериментального дослідження	Сценарій експериментального дослідження
1	1.1	Споруда ВБ-40 не оснащена системами протипожежного захисту
	1.2	
	1.3	
2.	2.1	Споруда ВБ-40 оснащена системою пожежної сигналізації
	2.2	
	2.3	
3.	3.1	Споруда ВБ-40 оснащена системою протипожежного захисту
	3.2	
	3.3	
4.	4.1	Споруда ВБ-40 оснащена автоматичною системою пожежогасіння
	4.2	
	4.3	

Підготовка для проведення досліджень

1. Готуються та встановлюються згідно із схемою рисунок 4.6 вогнище пожежі та засоби вимірювальної техніки.

2. Підготовка випробувального боксу.

2.1. Споруду ВБ – 40 не оснащуємо системою протипожежного захисту: всі отвори споруди ВБ-40 зачиняємо.

2.2. Споруду ВБ – 40 оснащуємо автоматичною системою пожежогасіння: всі отвори споруди ВБ-40 зачиняємо, на стелі споруди ВБ-40 монтуємо два пожежні сповіщувачі димові та два пожежні сповіщувачі теплові згідно із рисунком 4.6. Сигнали від пожежних сповіщувачів виводимо на пульт пожежний – контрольний приймальний.

2.3. Споруду ВБ – 40 оснащуємо системою протидимного захисту: всі отвори споруди ВБ-40 відчиняємо.

2.4. Споруду ВБ – 40 оснащуємо автоматичною спринклерною системою водяного пожежогасіння: всі отвори споруди ВБ-40 зачиняємо на стелі споруди ВБ-40 встановлюємо спринклерні зрошувачі згідно із схемою рисунок 4.6, які підключені до пожежного насоса та пожежного резервуару.

3. Термопари з'єднуємо із інформаційно-вимірювальною системою «Термоконт», а лазерні приймачі із персональною обчислювальною машиною, що обладнане відповідним програмним забезпеченням і перевіряється їх працездатність.

4. Готуємо обладнання для проведення фото- та відео зйомок.

5. Готуємо первинні засоби пожежогасіння.

Послідовність проведення досліджень:

1. Виконуємо вимірювання та фіксацію параметрів зовнішнього середовища, а саме: температури повітря, швидкості вітру, вологості та атмосферного тиску.

1.1. Температуру та вологість повітря вимірюємо психрометром аспіраційним МВ-4М за такою процедурою:

- пристрій виноситься за 15 хвилин до початку вимірювань і встановлюється на висоті 2 м з навітряної сторони будівлі;

- знімається зовнішній екран термометра та резервуар очищується чистою водою;

- батист обертається навколо резервуара термометра одним шаром, фіксується нитками та обрізається 2–3 мм нижче резервуара;

- батист змочується дистильованою водою за 4 хв до початку вимірювань за допомогою гумового балона з піпеткою, вода вводиться в трубку і утримується затискувачем;

- вмикається вентилятор психрометра;

- через 4 хв після запуску вентилятора знімаються показники термометрів з точністю 0,25 поділки, округляються до 0,1 °С;

- температура зовнішнього повітря визначається за сухим термометром;

- відносна вологість повітря розраховується за відповідною формулою

$$f = \frac{E_m - A \cdot P \cdot d_{\theta} \cdot 100\%}{E_c} \quad (4.1)$$

де E_m – насичена пружність водяного пара при температурі змоченого термометра;

E_c - насичена пружність водяного пара при температурі сухого термометра;

A – психрометричний коефіцієнт, дорівнює $6,62010\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$;

P – тиск повітря;

d_{θ} – різниця між значеннями температур сухого термометра та змоченого термометра, $^{\circ}\text{C}$

1.2. Атмосферний тиск вимірюється барометром-анероїдом М67 за такою процедурою:

- барометр встановлюється на горизонтальну поверхню, шкалою вгору, у місці, захищеному від прямих сонячних променів;
- усувається тертя механізмів легкими ударами по корпусу або склу;
- відлік показів проводиться, коли горизонтальна стрілка збігається з віддзеркаленням на дзеркальній поверхні шкали;
- точність відліку – до 0,3 поділки шкали, при цьому показники коригуються з урахуванням температурної поправки, що обчислюється за відповідною формулою

$$P_{\theta} = a + b\theta + c\theta_2 + d\theta_3 + K(\theta - 20)(P_k - P_{sl}), \quad (4.2)$$

де a , b , c , d , K – коефіцієнти типової температурної залежності ($a=0,18$ мм рт. ст., $b=-0,009$ мм рт. ст., $c=-0,000014$ мм рт. ст., $d=0,000002$ мм рт. ст., $K=0,000312$);

P_k - 97592 Па (732 мм рт. ст.);

P_{sl} – значення тиску, що визначено по барометру;

θ – температура оточуючого середовища.

Шкальна поправка визначається згідно із паспортом барометра анероїда М67.

1.3. Швидкість вітру вимірюється крильчастим анемометром АСО-3 за такою процедурою:

- перед початком роботи відключають передаточний механізм і фіксують показники лічильника за трьома шкалами;

- анемометр встановлюють в повітряному потоці так, щоб вітроприймач дивився назустріч потоку, а вісь крильчатки була паралельна напрямку повітряного потоку;

- після 10–15 секунд одночасно вмикають передаточний механізм і секундомір, витримують пристрій у потоці 1–2 хвилини, після чого знімають показники лічильника; швидкість повітря визначають за графіком анемометра, зіставляючи поділки лічильника з вертикальною та горизонтальною осями графіка для отримання значення в м/с.

2. Виконуємо вимірювання та фіксацію початкових значень температур за показниками всіх термопар та лазерного приймача.

3. Виконуємо включення вимірювально-обчислювальних пристроїв у режим реєстрації, запускаємо відеозйомку та підпалюємо вогнище пожежі.

4. Виконуємо вимірювання та реєстрацію температури і задимленості за допомогою інформаційно-вимірювальної системи.

5. Виконуємо реєстрацію даних вимірювань з інтервалом не більше 10 секунд.

6. Виконуємо фіксацію даних термопар і лазерного приймача у момент спрацювання системи пожежної сигналізації за показами індикатора приймального контрольного пожежного приладу.

7. Виконуємо дослідження до моменту досягнення температури 60 °С хоча б на одній термопарі, 0,1 ДБ на лазерному приймачі або до повного вигорання вогнища пожежі класу А.

Оцінка результатів досліджень

За результатами досліджень для кожного моменту часу t_j вимірювання визначають температуру θ_j на відповідній термопарі покази лазерного випромінювача (q_j). Експериментальні дані заносяться до журналу.

За отриманими даними визначається похибка досліджень за формулою

$$\Delta A = \pm k \sqrt{(\Delta A_1)^2 + (\Delta A_2)^2} \quad (4.3)$$

де ΔA – абсолютна похибка досліджуваних величин;

ΔA_1 – похибка датчиків (термопар, датчика теплового потоку, інструментальна);

ΔA_2 – похибка вимірювальних пристроїв (вимірювально-обчислювальна система «Термоконт», пристрій для вимірювання теплового потоку, похибка зняття результатів для вимірювання розмірів (зазвичай дорівнює половині ціни поділки засобів вимірювань));

k – коефіцієнт, який залежить від імовірності ($k=1,1$ при $P=0,95$).

Визначаються середні значення температур та задимленості. У графічній формі будуються залежності температур, задимленості. За результатами експериментальних досліджень встановлюється час досягнення у споруді ВБ-40 критичних значень температури (60°C) та задимленості (0,1 дБ) для різних сценаріїв експериментального дослідження.

Вимоги безпеки

Під час проведення експериментальних робіт необхідно дотримуватися вимог [189], інструкцій ІНДЦЗ НУЦЗ України та інших нормативних документів з охорони праці, що регламентують безпеку на робочому місці.

Серед персоналу має бути призначена відповідальна особа за охорону праці, а до робіт допускаються лише ті учасники, які пройшли загальний та спеціальний інструктаж, ознайомилися з процедурою досліджень та розподілом обов'язків.

Перед початком робіт визначаються та обгороджуються небезпечні зони, забороняється доступ сторонніх осіб, забезпечується достатня кількість засобів пожежогасіння для ліквідації вогнища класу А, а оператори екіпіруються захисним одягом, каскою, поясом, рукавицями та спеціальним взуттям; у зоні досліджень розташовують переносні водні (ВВ-5) та порошкові (ВП-5) вогнегасники [190].

4.2 Результати експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проведені у порядку та послідовності, що передбачені програмою та методикою експериментальних досліджень, яка описана у розділі 4.1. Експериментальні дослідження проведено із метою перевірки достовірності теоретичних результатів досліджень щодо впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик.

На рисунку 4.10 зображені фото під час проведення експериментального дослідження.



Рисунок 4.10 – Фото експериментальних досліджень

Під час експериментального дослідження спостерігалось наростання температури та зниження зони задимлення у споруді ВБ-40, при цьому така зміна в часі для кожного із сценаріїв експериментального дослідження відбувалась по різному.

Результати трьох експериментів по кожному із запропонованих сценаріїв представлені на рисунку 4.11 за небезпечним чинником пожежі підвищеної температури та на рисунку 4.12 за небезпечним чинником пожежі втрата видимості.

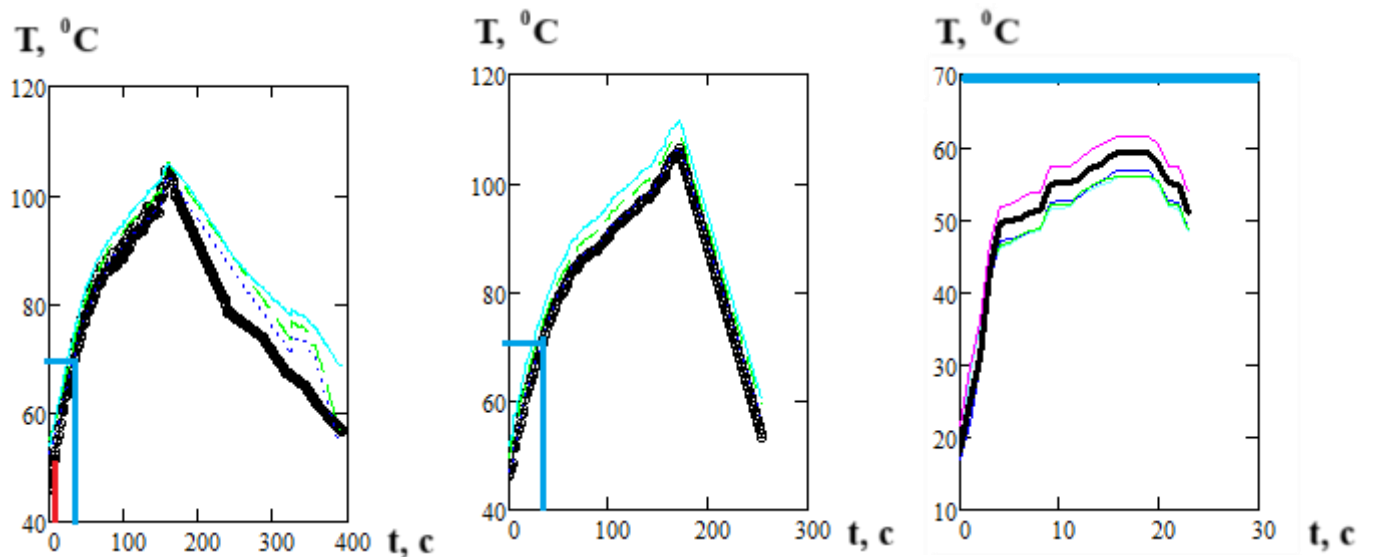


Рисунок 4.11 – Результати експериментальних досліджень за небезпечним чинником пожежі підвищена температура: а) споруда ВБ-40 не оснащена системами протипожежного захисту, б) споруда ВБ-40 оснащена системою протидимного захисту, в) споруда ВБ-40 оснащена автоматичною системою пожежогасіння

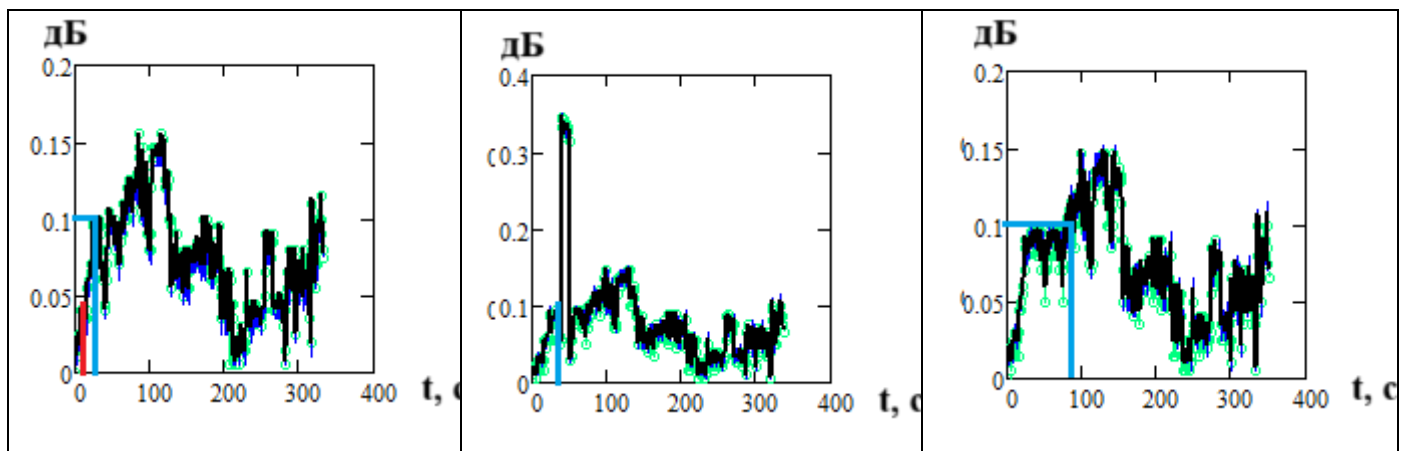


Рисунок 4.12 – Результати експериментальних досліджень за небезпечним чинником пожежі втрата видимості: а) споруда ВБ-40 не оснащена системами протипожежного захисту, б) споруда ВБ-40 оснащена системою протидимного захисту, в) споруда ВБ-40 оснащена автоматичною системою пожежогасіння

Отримані дані за кожним окремим експериментом оцінені на наявність в них викидів та квазівикидів із використанням критерія Граббса [191].

Для встановлення того, чи є найбільший результат в ранжованому ряду y_{jmax} викидом чи квазівикидом, розраховуємо критерій Граббса, G_{jmax} за формулою 4.4.

$$G_{j\max} = \frac{y_{j\max} - \bar{y}_j}{S_j}, \quad (4.4)$$

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

Для перевірки значимості відхилення найменшого значення в упорядкованому ряду, $y_{j\min}$, розраховуємо критерій Граббса, $G_{j\min}$ за формулою 4.5.

$$G_{j\min} = \frac{\bar{y}_j - y_{j\min}}{S_j} \quad (4.5)$$

Розраховані таким чином значення $G_{j\max}$ та $G_{j\min}$ порівнюємо з 5 % ($G_{кр.5\%}$) та 1 % ($G_{кр.1\%}$) критичними значеннями, заданими в таблицях [191], які для трьох досліджень відповідно становлять 1,155.

Якщо після порівняння $G_{j\max}$ або $G_{j\min}$ з їх критичними значеннями виявиться, що ці розраховані значення коефіцієнтів становлять більше ніж 5 %-ве критичне значення ($G_{кр.5\%}$) і менше (або дорівнює) 1 %-го ($G_{кр.1\%}$) критичного значення ($G_{кр.1\%}$), тоді значення $y_{j\max}$ або $y_{j\min}$ вважають квазівикидом.

Якщо розраховане значення $G_{j\max}$ або $G_{j\min}$ більше 1 %-го критичного значення ($G_{кр.1\%}$), то відповідно $y_{j\max}$ або $y_{j\min}$ вважають викидом.

Якщо розраховані значення $G_{j\max}$ та $G_{j\min}$ є меншими (або рівними) за критичні значення 5% ($G_{кр.5\%}$), то результати випробувань не містять викидів та квазівикидів.

Результати перевірки на наявність у експериментальних дослідженнях викидів та квазівикидів за критерієм Граббса показані на рисунку 4.13 за небезпечним чинником пожежі підвищеної температури та на рисунку 4.14 за небезпечним чинником пожежі втрата видимості.

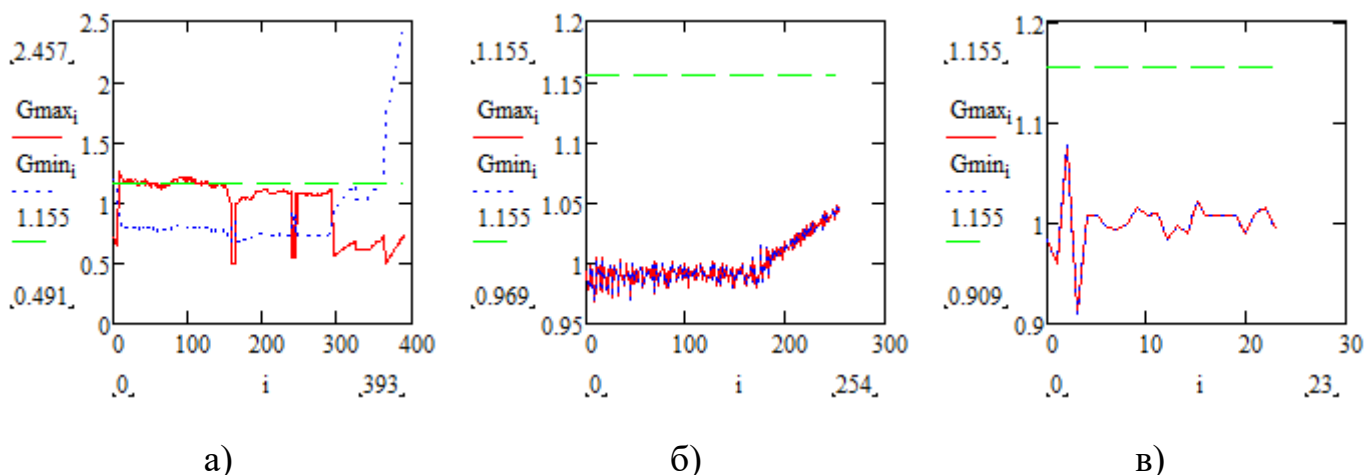


Рисунок 4.13 – Результати перевірки на наявність у експериментальних дослідженнях за небезпечним чинником пожежі підвищена температура викидів та квазівикидів за критерієм Граббса: а) споруда ВБ-40 не оснащена системами протипожежного захисту, б) споруда ВБ-40 оснащена системою протидимного захисту, в) споруда ВБ-40 оснащена автоматичною системою пожежогасіння

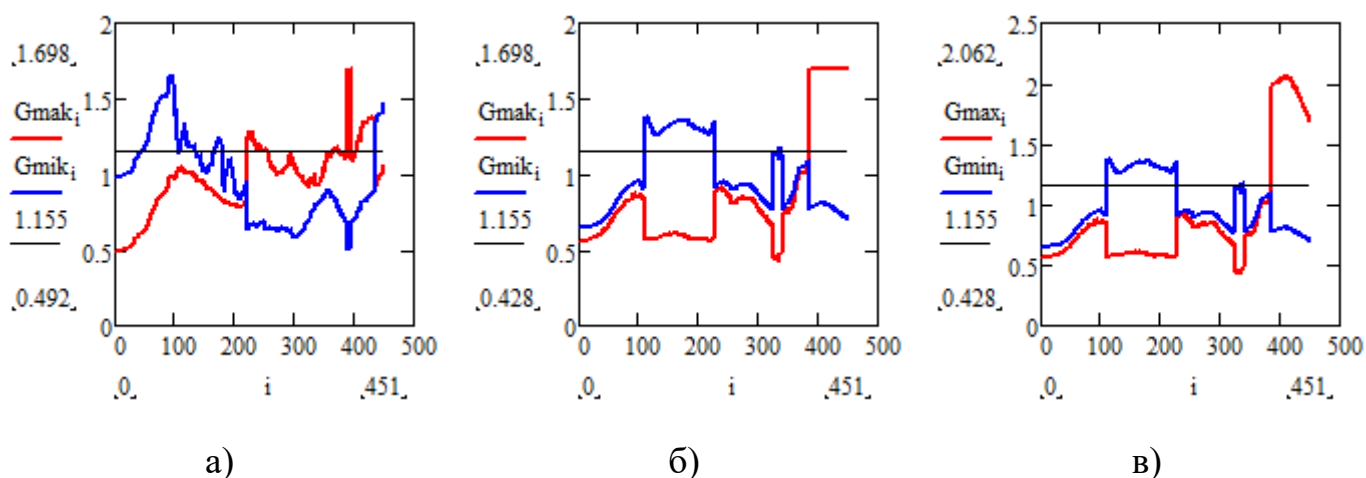


Рисунок 4.14 – Результати перевірки на наявність у експериментальних дослідженнях за небезпечним чинником пожежі втрата видимості викидів та квазівикидів за критерієм Граббса: а) споруда ВБ-40 не оснащена системами протипожежного захисту, б) споруда ВБ-40 оснащена системою протидимного захисту, в) споруда ВБ-40 оснащена автоматичною системою пожежогасіння

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

Узагальнені результати експериментальних досліджень наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Узагальнені результати експериментальних досліджень

№ п/п	Сценарій експериментального дослідження	Час досягнення небезпечним чинником пожежі критичного значення для життя людини, с
За небезпечним чинником пожежі підвищена температура		
1.	Споруда ВБ-40 не оснащена системами протипожежного захисту	36
2.	Споруда ВБ-40 оснащена системою протидимного захисту,	53
3.	Споруда ВБ-40 оснащена автоматичною системою пожежогасіння	Не досягнуто
За небезпечним чинником пожежі втрата видимості		
4.	Споруда ВБ-40 не оснащена системами протипожежного захисту	28
5.	Споруда ВБ-40 оснащена системою протидимного захисту,	56
6.	Споруда ВБ-40 оснащена автоматичною системою пожежогасіння	87

З метою визначення на скільки в середньому відхиляються значення і-го дослідження від середнього значення всіх досліджень обчислено середнє абсолютне відхилення за формулою 4.6.

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n} \quad (4.6)$$

Для вираження лінійних відхилень у відсотках з метою підвищення рівня інформативності аналізу визначимо середнє відносне відхилення за формулою 4.7.

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n \cdot \bar{x}} \cdot 100\% \quad (4.7)$$

Аналізуючи узагальнені результати експериментальних досліджень встановлено, що значення критичної для життя людини температури досягнуто на 36 секунді експерименту, а втрата видимості на - 28 секунді експерименту. Система пожежної сигналізації спрацювала на 15 секунді експерименту, що виражає ймовірність ефективного спрацювання систем пожежної сигналізації із значенням 0,58 та 0,52 відповідно, що у порівнянні із теоретичними даними становить близько 3% та 14 %. У разі функціонування систем протидимного захисту значення критичної для життя людини температури досягнуто на 53 секунді експерименту, що виражає ймовірність ефективного спрацювання систем протидимного захисту 0,32, а втрата видимості на - 56 секунді експерименту, що виражає ймовірність ефективного спрацювання систем протидимного захисту 0,4, що у порівнянні із теоретичними даними становить близько 20 %. Автоматична система пожежогасіння спрацювала на 7 секунді експериментального дослідження та по значенню температури не дала досягнути критичного значення для життя людини небезпечного чинника пожежі, а втрата видимості на - 87 секунді експерименту, що виражає ймовірність ефективного спрацювання систем автоматичного пожежогасіння 0,89, що у порівнянні із теоретичними даними становить близько 7 %.

Таким чином за результатами експериментальних досліджень показано адекватність використання методів теорії ймовірності на основі статистичних даних та із використанням методу, який заснований на польових комп'ютерних моделях та засобів обчислювальної газогідродинаміки, під час дослідження впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик, що у порівнянні із результатами експериментальних досліджень відносні відхилення склали близько

14 %, 20% та 7% відповідно для систем пожежної сигналізації, систем протидимного захисту та автоматичних систем пожежогасіння [192].

4.3 Висновки до розділу 4

1. Обґрунтовано перелік обладнання, необхідного для проведення експериментальних досліджень, який включає: споруду ВБ-40, вогнище пожежі класу А, засоби вимірювальної техніки та обладнання для фото- та відеофіксації процесу. Зокрема, для визначення критичних для життя людини параметрів пожежі застосовуються термопари ТХА з вимірювальним приладом “Термоконт” для контролю температури та лазерний вимірювач d6 мм Н4А3 з фоторезистором GL5516 (5–10 кОм) для оцінки втрати видимості.

2. Встановлено чітку послідовність проведення експериментальних досліджень та визначено вимоги з охорони праці, яких слід дотримуватися під час виконання робіт.

3. Встановлено, що значення критичної для життя людини температури досягнуто на 36 секунді експерименту, а втрата видимості на - 28 секунді експерименту для сценарію, коли споруда ВБ-40 не оснащена системами протипожежного захисту. Система пожежної сигналізації спрацювала на 15 секунді експерименту, що виражає ймовірність ефективного спрацювання систем пожежної сигналізації із значенням 0,58 та 0,52. У разі функціонування систем протидимного захисту значення критичної для життя людини температури досягнуто на 53 секунді експерименту, а втрата видимості на - 56 секунді експерименту. Автоматична система пожежогасіння спрацювала на 7 секунді експериментального дослідження та по значенню температури не дала досягнути критичного значення для життя людини небезпечного чинника пожежі, а втрата видимості на - 87 секунді експерименту.

4. Показано адекватність використання методів теорії ймовірності на основі статистичних даних та із використанням методу, який заснований на польових комп’ютерних моделях та засобів обчислювальної газогідродинаміки, під час

дослідження впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик, що у порівнянні із результатами експериментальних досліджень відносні відхилення склали близько 14 %, 20% та 7% відповідно для систем пожежної сигналізації, систем протидимного захисту та автоматичних систем пожежогасіння.

РОЗДІЛ 5 ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ПОЖЕЖНОГО РИЗИКУ

У цьому розділі представлені результати щодо розв'язання шостого завдання дослідження, а саме щодо розроблення пропозицій для удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику.

5.1 Зміна № 1 до ДСТУ 8828 «Пожежна безпека. Загальні положення»

За результатами проведених досліджень та відповідно до технічного завдання на розроблення проєкту Зміни № 1 до національного стандарту розроблено Зміну № 1 до ДСТУ 8828:2019 «Пожежна безпека. Загальні положення». Перша редакція проєкту зміни № 1 до національного стандарту складалась з 14 сторінок та титульного аркушу.

Відповідно до технічного завдання на розроблення проєкту Зміни № 1 до національного стандарту перша редакція проєкту офіційно оприлюднена на сайті Національного органу стандартизації, а також надіслана на розгляд до ДСНС України.

Додатково проєкт Зміни № 1 до національного стандарту надіслано на розгляд до ряду установ та організацій, перелік яких наведено нижче:

- Національний університет цивільного захисту України;
- Львівський державний університет безпеки життєдіяльності;
- Громадської спілки «Захист і надійність».

За результатом оприлюднення проєкту Зміни № 1 до національного стандарту отримано 4 відгуки, які включали 23 пропозиції та зауваження до проєкту Зміни № 1 до стандарту. Прийнято пропозицій – 7, прийнято частково пропозицій – 4, взято до відома пропозицій – 6, відхилено пропозицій – 6.

Загалом пропозиції стосувалися нормативних уточнень та посилань, орфографічних помилок, виправлення позначень основних параметрів, що входять до формул та доповнення або об'єднання термінів (визначення).

В цілому по тексту нормативного документа пропозиції стосуються використання як повної назви, так і скорочення, зустрічаються стилістичні та граматичні помилки, заміни (вилучення) або включення додаткових вихідних даних для проведення розрахунків, надання переліку засобів вирішення зазначених методів розрахунку шляхом конкретизації конкретних програмних комплексів.

Так наведено «Метод визначення рівня пожежної безпеки людей та індивідуального пожежного ризику»:

- в підпункті А.2.3 уточнено та подано у новій редакції наступного змісту: «де, $Q_{п,i}$ – частота виникнення пожежі в будівлі чи споруді впродовж року, що визначається на підставі статистичних даних або згідно із таблицею А.1а. У разі наявності статистичних даних та даних таблиці А.1а слід приймати максимальне значення частоти виникнення пожежі. При відсутності статистичних даних та даних у таблиці А.1а допускається приймати $Q_{п,i}=4 \cdot 10^{-2}$ для кожної будівлі. Статистичні дані – дані про кількість загиблих людей на пожежах, які ведуться ДСНС України або іншими центральними органами виконавчої влади за останні 5 років»;

- в підпункті А.2.3 у таблиці А.1а було розширено перелік найменувань будівель, додавши інформацію по частоті виникнення пожежі впродовж року в закладах позашкільної освіти $Q_{п,i}=2,22 \cdot 10^{-3}$, культових будинках та комплексах $Q_{п,i}=5,85 \cdot 10^{-5}$, будинках-інтернатах загального та спеціального типу $Q_{п,i}=2,09 \cdot 10^{-2}$, житлових будинках (багатоквартирних) $Q_{п,i}=4,51 \cdot 10^{-3}$, автосалонах $Q_{п,i}=1,67 \cdot 10^{-3}$, а також виробничих, складських будівлях та спорудах автостоянок (паркінгах) $Q_{п,i}=9,81 \cdot 10^{-4}$;

- в підпункті А.2.7 було уточнено та подано у новій редакції наступного змісту: «У разі відсутності відповідної системи протипожежного захисту або її несправності в цілому (окремих елементів), значення ймовірності ефективного спрацювання таких систем приймається рівним нулю»;

- в підпункті А.7.1 перший абзац пункту 1 таблиці А.3 було уточнено та подано у новій редакції наступного змісту: «Будинки і споруди дошкільних навчальних закладів, навчальних закладів з постійним перебуванням дітей

(інтернати, ліцеї з поглибленою військовою підготовкою, тощо), охорони здоров'я та відпочинку»;

- в підпункті А.7.1 перший абзац пункту 2 таблиці А.3 було уточнено та подано у новій редакції наступного змісту: «Гуртожитки, одноквартирні та багатоквартирні житлові будинки зокрема і блокованого типу. Готелі та аналогічні заклади розміщення та будинки інтернатів загального та спеціального типу»;

- в підпункті А.7.1 перший абзац пункту 4 таблиці А.3 було уточнено та подано у новій редакції наступного змісту: «Будинки і споруди науково-дослідних установ, проектних і громадських організацій та управління, навчальних закладів (за винятком навчальних закладів з постійним перебуванням дітей та дошкільних навчальних закладів»;

- в підпункті А.8.3 у формулі (А.51) було замінено значення «70» на «60».

Частково прийняті пропозиції та зауваження стосувалися:

- в підпункті А.2.7 речення «У разі відсутності відповідної системи протипожежного захисту значення ймовірності ефективного спрацювання таких протипожежних систем приймається рівним нулю» замінити на «У разі відсутності відповідної системи протипожежного захисту або її несправності в цілому (окремих елементів), значення ймовірності ефективного спрацювання таких систем приймається рівним нулю». Також відкоригована нумерація таблиць по тексту Зміни № 1 до національного стандарту;

- у таблиці А.1б в підпункті А.4 видалено частину даних для групи «Діти з обмеженими можливостями (спеціалізовані будинки для інвалідів», як така, що не відповідає реаліям активного впровадження інклюзивної освіти в Україні, та передбачає навчання таких дітей у закладах освіти нарівні із здоровими громадянами (інклюзія);

- у таблиці А.3 в підпункті А.7.1 «Навчальні заклади» замінено на «Навчальні заклади з постійним перебуванням дітей (інтернати, ліцеї з поглибленою військовою підготовкою, тощо)». Всі інші навчальні заклади (за винятком дошкільних) перенесено до пункту 4 таблиці А.3.

Взяті до відома пропозиції та зауваження стосувалися:

- Розділ 1. Сфера застосування. Запропоновано уточнити сферу застосування даного стандарту України;

- Розділ 3. Терміни та визначення понять. Запропоновано ввести термінологію «оцінювання пожежних ризиків» під час проведення розрахунків евакуації людей при певних сценаріях розвитку пожежі та часу настання критичних значень негативних чинників пожежі;

- Розділ 5. Загальні положення. Пункт 5.4 Метод визначення ймовірності виникнення пожежі (вибуху) в пожежонебезпечному об'єкті. Запропоновано навести перелік об'єктів та відповідні значення ймовірності виникнення пожежі в окремому додатку (хоча б типові) або прибрати взагалі цей пункт;

- Пункт А.6. Запропоновано у таблиці А.2а для розрахунку за імітаційно-стохастичною моделлю розмірність щільності потоку – кількість людей на одиницю площі навести дані щодо площі горизонтальної проекції дітей дошкільного віку та дітей з обмеженими можливостями;

- Підрозділ А.7.4 Запропоновано внести виправлення до таблиці А.7 «Площа горизонтальної проекції людей з обмеженою мобільністю» по показниках пропорцій проекції людини та додатково прописати вимоги щодо проекції дітей.

Відхилені пропозиції та зауваження стосувалися:

- Підрозділ А.3.2. Запропоновано додатково прописати, що розрахункова кількість людей, яка підлягає розрахунку часу евакуації повинна відповідати вимогам обов'язкового розрахунку згідно вимог ДСТУ 8855:2019 «Будівлі та споруди. Визначення класу наслідків (відповідальності)»;

- Підрозділ А.4. Запропоновано додатково пояснити аспекти вибору між інтенсивністю та швидкістю руху людського потоку різними ділянками шляхів евакуації в залежності від щільності людського потоку, що наведені в таблиці А.1;

- Підрозділ А.4. Запропоновано надати більш ретельніше вимогу щодо застосування підрозділу А.4 при проведенні розрахунку часу евакуації спрощеним аналітичним методом. Обмежити використання цього методу проведенням розрахунків часу евакуації людей для найпростіших будівель та споруд;

- Підрозділ А.4. Надати роз'яснення таблиці А.1д стосовно чому обрано співвідношення агентів різних груп мобільності (90% М1, 4% М2, 4% М3 та 2% М4) та яким чином здійснювати розрахунок, якщо таке співвідношення буде іншим;

- Пункти А.5 і А.6 та підпункти А.8.4 і А.8.5. Запропоновано вказати, що реалізація розрахунків можлива тільки за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Додатково вказати, які програмні продукти можна використовувати в Україні;

- Запропоновано додати у якості додатку значення показників пожежної небезпеки горючого навантаження в приміщеннях (за призначенням будівель).

У результаті розроблення Зміни № 1 було удосконалено існуючий метод, який наведено у стандарті за рахунок включення до нього нових розрахункових даних, зокрема параметрів руху змішаних людських потоків різних груп мобільності, ймовірність ефективного спрацювання систем протипожежного захисту, тощо.

Узагальнені дані щодо зауважень та пропозицій на першу редакцію проєкту Зміни № 1 до ДСТУ наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Узагальнені дані щодо зауважень та пропозицій на першу редакцію проєкту Зміни № 1 до ДСТУ

Розділ ДСТУ	Прийнят о пропози цій	Прийнят о частково пропозиц ій	Взято до відома пропозиц ій	Відхилен о пропози цій	Всього пропозицій по розділах
Розділ 1. Сфера застосування	-	-	1	-	1
Розділ 3. Терміни та визначення понять	-	-	1	-	1
Розділ 5. Загальні положення	-	-	1	-	1
Додаток А	7	4	2	6	19
Додаток Б	-	-	1	-	1
ВСЬОГО	7	4	6	6	23

На основі результатів дослідження розроблено удосконалений метод оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту, який впроваджений шляхом внесення зміни № 1 до ДСТУ 8828:2019 «Пожежна безпека. Основні положення». Затверджені наказом ДП «УкрНДНЦ» від 20.04.2023 № 77, надання чинності зміні № 1 до національного стандарту з 2023-06-01.

5.2 Розроблення алгоритму обґрунтування оснащеності об'єкту відповідною системою протипожежного захисту на основі управління пожежним ризиком

В основу алгоритму закладаємо поняття пожежної безпеки об'єкту, що відповідно до [186] означає – стан об'єкта, за якого ймовірність виникнення і розвитку пожежі та ймовірність впливу небезпечних чинників пожежі не перевищують унормованих допустимих значень.

В даному випадку ймовірність виникнення і розвитку пожежі слід виразити через ризик для пожежно-рятувальних підрозділів під час проведення рятувальних робіт і робіт з ліквідації пожежі, а ймовірність впливу небезпечних чинників пожежі слід виразити через індивідуальний пожежний ризик.

Алгоритм обґрунтування оснащеності об'єкту відповідною системою протипожежного захисту на основі управління пожежним ризиком повинен передбачати почергову послідовність оцінювання пожежного ризику для пожежно-рятувальних підрозділів під час проведення рятувальних робіт і робіт з ліквідації пожежі та індивідуальний пожежний ризик із різними комбінаціями оснащення об'єкту системами протипожежного захисту до моменту, коли кожний із зазначених пожежних ризиків становитиме унормоване допустиме значення [193, 194].

Схема алгоритму обґрунтування оснащеності об'єкту відповідною системою протипожежного захисту на основі управління пожежним ризиком наведена на рисунку 5.1.

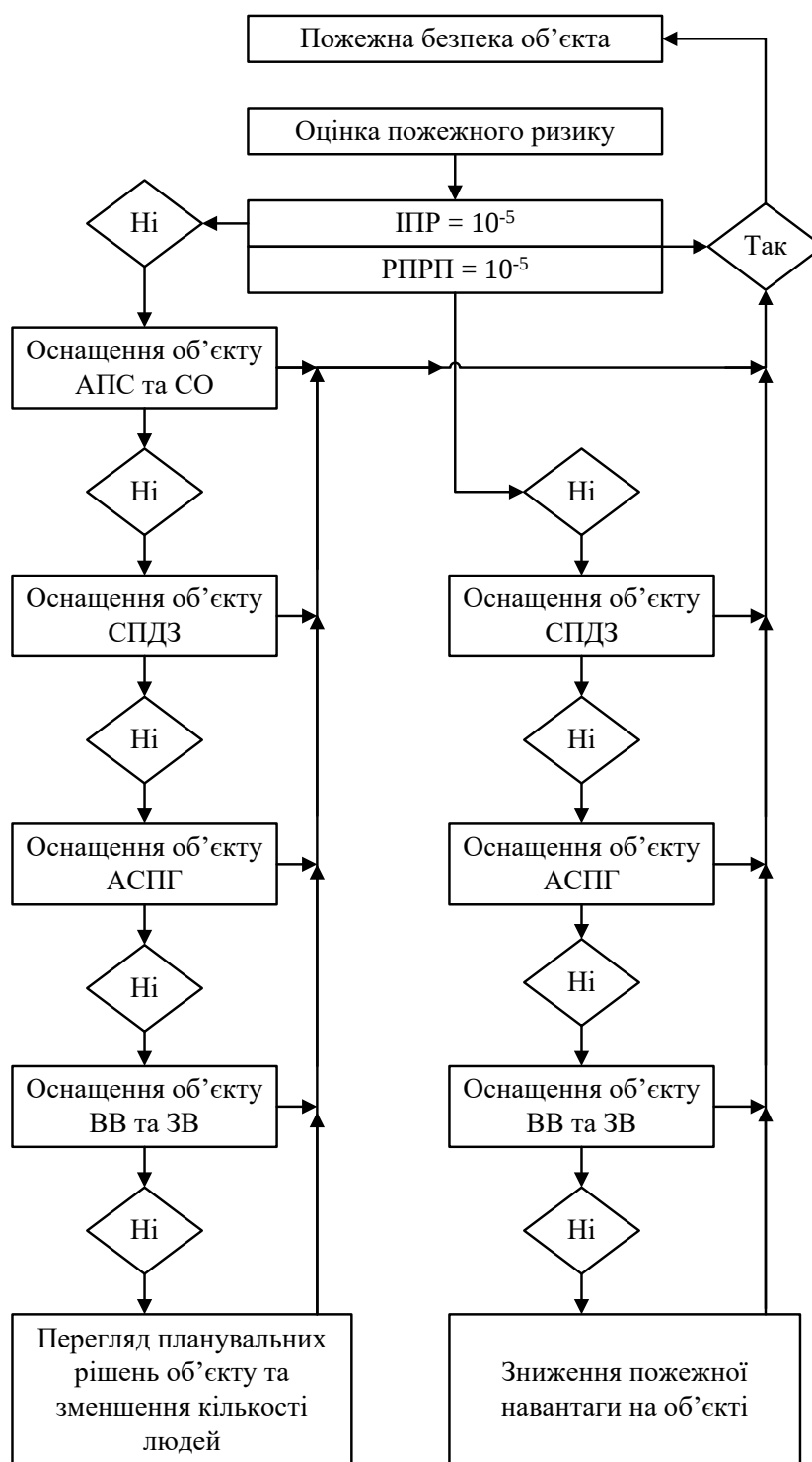


Рисунок 5.1 – Схема алгоритму обґрунтування необхідності оснащення об'єкту відповідною системою протипожежного захисту на основі управління пожежним ризиком

Таким чином, використовуючи результати дослідження розроблено алгоритм обґрунтування оснащення об'єкту відповідними системами протипожежного захисту на основі управління пожежним ризиком. Саме цим зумовлений економічна

ефективність роботи, що дозволяє на основі ризи-орієнтовного підходу оцінювати необхідність оснащення об'єктів будівництва відповідними системами протипожежного захисту. Зазначене дасть змогу знайти баланс між достатнім рівнем пожежної безпеки та мінімальними витратами на проектування та будівництва відповідних систем протипожежного захисту [195, 196].

5.3 Висновки до розділу 5

1. Розроблено удосконалений метод оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту, який впроваджений шляхом внесення зміни № 1 до ДСТУ 8828:2019 «Пожежна безпека. Основні положення». Затверджені наказом ДП «УкрНДНЦ» від 20.04.2023 № 77, надання чинності зміні № 1 до національного стандарту з 2023-06-01.

2. Розроблено алгоритм обґрунтування оснащеності об'єкту відповідними системами протипожежного захисту на основі управління пожежним ризиком. Саме цим зумовлений економічна ефективність роботи, що дозволяє на основі ризи-орієнтовного підходу оцінювати необхідність оснащення об'єктів будівництва відповідними системами протипожежного захисту. Зазначене дасть змогу знайти баланс між достатнім рівнем пожежної безпеки та мінімальними витратами на проектування та будівництва відповідних систем протипожежного захисту [197].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційного дослідження, що є завершеною науковою роботою, одержано рішення актуального науково-технічного завдання виявлення закономірності впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику, як наукового підґрунтя для удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику. Зокрема отримані такі основні результати:

1. Проаналізовано сучасний стан щодо впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику. Встановлено, що одним із технічних заходів, що може знижувати пожежні ризики є обладнання об'єктів системами протипожежного захисту. При цьому, такі системи впливають на рівень пожежного ризику як самотійно, так і спільною взаємодією, що можна врахувати відповідними коефіцієнтами. Запропоновано удосконалення структурної схеми систем протипожежного захисту шляхом врахування у складі такої схеми рівнів впливу відповідними системами протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику, що надає перспективи для подальшого розвитку методів оцінювання індивідуального пожежного ризику.

2. Обґрунтовано перелік ключових критеріїв, що мають найбільший вплив на результати досліджень, зокрема безвідмовність і ефективність функціонування систем протипожежного захисту як основні показники надійності. Ці характеристики оцінюються через тривалість досягнення критичних для життя людини значень небезпечних чинників пожежі, при цьому найшвидший з них - втрата видимості, визначається за допомогою коефіцієнта задимленості, що забезпечує об'єктивну кількісну оцінку ризику.

3. Обґрунтовані математичні моделі для дослідження закономірності впливу ефективності функціонування систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику. Показано, що оцінка впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику може здійснюватися двома основними методами: на основі теорії

ймовірності з використанням статистичних даних та за допомогою підходу, заснованого на польових комп'ютерних моделях і методах обчислювальної газогідродинаміки. Розроблено алгоритм дослідження, що дозволяє визначати вплив систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик і встановлювати відповідні ймовірності ефективного спрацювання систем. Адекватність запропонованих методів підтверджена порівнянням із результатами експериментальних досліджень: відносні відхилення склали приблизно 14 % для систем пожежної сигналізації, 20 % для систем протидимного захисту та 7 % для систем автоматичного пожежогасіння, що свідчить про достатню точність застосованих підходів та їх практичну придатність для оцінки ризику.

4. Обґрунтовано вплив систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику. Встановлено, що значення ймовірності ефективного функціонування систем протипожежного захисту становлять для систем пожежної сигналізації та оповіщення про пожежу – 0,61, для системи автоматичного пожежогасіння – 0,87, для систем протидимного захисту, внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопроводу – 0,5.

5. Досліджено закономірності впливу систем протипожежного захисту на розрахункові параметри індивідуального пожежного ризику. Встановлено залежність значення індивідуального пожежного ризику від ефективності спрацювання систем протипожежного захисту, що має вигляд рівняння:

$$R=0,0005-0,0255r_a-0,0034r_d+0,0075r_g+0,16r_ar_d-0,19r_ar_g+0,039r_d r_g+0,52r_ar_d r_g$$

6. Розроблені пропозиції щодо удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику. Розроблено алгоритм, що дозволяє обґрунтувати необхідність оснащення об'єкта відповідною системою протипожежного захисту на основі управління індивідуальним пожежним ризиком, та Зміну № 1 до національного стандарту *ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення*.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 22 січня 2014 р. № 37-р *«Про схвалення Концепції управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру»*: електрон. Ресурс. Кабінет Міністрів України; затв. 22.01.2014. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/37-2014-%D1%80#Text>.
2. ДСТУ 8828:2019 *«Пожежна безпека. Загальні положення»*: нац. стандарт України. затв. 27.02.2019; чин. від 01.01.2020; Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 87 с. (Національний стандарт України).
3. ДСТУ 9058:2020 *«Пожежна безпека. Визначення протипожежних відстаней між об'єктами розрахунковими методами. Основні положення»*: нац. стандарт України затв. 06.10.2020 ; чин. від 01.05.2021; Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. 87 с. (Національний стандарт України).
4. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2024 року: електрон. ресурс. Державна служба України з надзвичайних ситуацій; 2025. Режим доступу: <https://dsns.gov.ua/upload/2/3/0/1/6/1/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-za-12-misiaciv-2024-na-sait.pdf> (дата звернення: 13.10.2025).
5. Ключко А. М., Борисова Л. В., Нікітіна Л. О. Щодо статистичних даних у сфері пожежної безпеки. Вісник Національного університету цивільного захисту України. 2022. Вип. 2. С. 285-293.
6. Статистичні дані про кількість населення в Україні за 2022 рік: електрон. Ресурс. Міністерство фінансів України. Режим доступу: <https://index.minfin.com.ua/ua/reference/people/> (дата звернення: 18.11.2025).
7. Васильєв М. І. Моделі та методи ініціації проектів протипожежного захисту об'єктів на основі оцінки ризиків: дис. к.т.н. 05.13.22. Львів, 2018. 178 с.
8. *Fire Protection System Market Size, Share Growth Report, 2032*. (2024). Fortunebusinessinsights.com. <https://www.fortunebusinessinsights.com/fire-protection-system-market-104820>.
9. *From Occurrence to Consequence: A Comprehensive Data-driven Analysis of*

- Building Fire Risk*. arXiv.org, 2022. Mode of access. <https://arxiv.org/html/2503.22689v1>.
10. The ANSFR Project Final Report: Recommendations for Improving Fire Risk Assessment and Management in Europe. URL: electronic resource. European Commission, 2008. Mode of access https://ec.europa.eu/echo/files/civil_protection/civil/prote/pdfdocs/2008_ansfr_recommendations_en.pdf (дата звернення: 14.10.2025).
 11. Sekizawa A. Fire Risk Analysis: Its Validity And Potential For Application In Fire Safety. *Fire Safety Science*. 2005. 8. pp. 85-100. <https://doi.org/10.3801/iafss.fss.8-85>.
 12. Савченко О., Ніжник В., Одинець А., Несенюк Л. Аналіз статистичних даних про пожежі щодо ефективності спрацювання систем протипожежного захисту *XI Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. (28-29.10. 2021). Черкаси. ЧПБ НУЦЗУ. С. 52-53.
 13. Форма 302. Відомості про впровадження, технічний стан та спрацювання систем протипожежного захисту : звітна форма. Державна служба України з надзвичайних ситуацій.
 14. Вороновська Л. Філософія ризику та обґрунтування рішень у пожежній безпеці України в умовах війни. *Вісник Львівського університету. Серія філос.-політолог. студії*. 2023. Вип. 50. С. 30–39.
 15. Jaďud'ová J., Osvaldová L. M., Gašpercová S., Řehák D. The Analysis of Fire Protection for Selected Historical Buildings as a Part of Crisis Management: Slovak Case Study. *Sustainability* 2025. 17(15). 6743. <https://doi.org/10.3390/su17156743>.
 16. Kodur V., Kumar P., Rafi M. M. Fire hazard in buildings: review, assessment and strategies for improving fire safety. *PSU Research Review*. 2020. 4(1). pp. 1-23. <https://doi.org/10.1108/pr-12-2018-0033>.
 17. Fire Risk Assessment. URL: <https://www.firesectorfederation.co.uk/fire-risk-assessment/> (дата звернення: 14.10.2025).
 18. Completing a fire risk assessment. URL: <https://www.bedsfire.gov.uk/business/fire-risk-assessment> (дата звернення: 14.10.2025).

19. Малько О. Д. Оцінка ризиків в пожежній службі Німеччини. *Проблеми надзвичайних ситуацій* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 20 трав. 2021 р. С. 299-300.

20. Звіт про НДР «Провести дослідження та обґрунтувати загальні вимоги пожежної безпеки до об'єктів різного призначення» («ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА ОБ'ЄКТІВ»): УкрНДІЦЗ 2017. С. 22-23.

21. Вовк С. Я., Шаповалов О. В., Кушнір А. П., Ференц Н. О. Аналіз шляхів забезпечення протипожежного захисту висотних будівель. *Пожежна безпека*. 2025. № 46. С. 30-44.

22. Гуліда Е. М., Коваль О. М., Паснак І. В., Шарий В. В. Аналіз сучасного стану забезпечення пожежної безпеки промислових будівель та складів. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2019. Т. 29. № 2. С. 109-111.

23. Гуліда Є. М., Шарий В. В. Гарантування пожежної безпеки на відкритих складах виробничих об'єктів. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 4 (267-268). С. 39-46.

24. Павлюк Ю. Е., Шарий В. В., Снігур Б. В. Аналіз сучасного стану забезпечення пожежної безпеки в торговельно-розважальних закладах. *Пожежна безпека*. 2023. № 43. С. 113-122.

25. Kumar K., Virendra Kumar Paul. Significance of Fire Protection System Reliability for Structure Fire Safety. ResearchGate, 2023. pp. 42-50.

26. Thomas I. R. Effectiveness of Fire Safety Components and Systems. *Journal of Fire Protection Engineering*. 2002. 12(2). pp. 63-78. <https://doi.org/10.1177/1042391502012002784>.

27. Dormohamadi Mansoure, Kanafani K., Harpa Birgisdottir, Anders Dragsted, Hoxha, E. Assessing Environmental Impacts of Active Fire Protection and Egress Systems Using Environmental Product Declarations: A Review. *Cleaner Environmental Systems*. 2025. 100280–100280. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2025.100280>.

28. Савченко О., Ніжник В., Одинець А., Несенюк Л., Балло Я., Голікова С., Сізіков О., Жихарєв О., Вимоги пожежної безпеки до висотних громадських

будинків з умовною висотою від 100 м до 150 м. Науковий збірник «Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека». Київ. 2021. № 2(12). С. 30-42.

29. ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту»: чин. від 01.07.2015 ; Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 81 с

30. ДСТУ CEN/TS 54-14:2021 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Ч. 14. Настанови щодо побудови, проектування, монтування, пусконаладжування, введення в експлуатацію, експлуатування та технічного обслуговування (CEN/TS 54-14:2018, IDT)»: нац. стандарт України. чин. від 01.07.2021; Київ. ДП «УкрНДНЦ», 2021. 91 с. (Національний стандарт України).

31. ДСТУ CEN/TS 54-32:2019 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 32. Побудова, проектування, монтування, введення в експлуатацію, експлуатування та технічне обслуговування системи мовленнєвого оповіщення (CEN/TS 54-32:2015, IDT)»: нац. стандарт України / чин. від 01.01.2020. Київ. ДП «УкрНДНЦ», 2020. 81 с. (Національний стандарт України).

32. ДСТУ CEN/TR 12101-4:2016 «Системи протидимного захисту. Частина 4. Побудова систем димо- та тепловидалення (CEN/TR 12101-4:2009, IDT)». нац. стандарт України. чин. від 01.07.2017. Київ. ДП «УкрНДНЦ», 2017. 48 с. (Національний стандарт України).

33. ДСТУ CEN/TR 12101-5:2016 «Системи протидимного захисту. Частина 5. Настанови на базі функціональних рекомендацій та методи розрахування систем димо- та тепловидалення (CEN/TR 12101-5:2005, IDT)»: нац. стандарт України. чин. від 01.07.2017. Київ. ДП «УкрНДНЦ», 2017. 76 с. (Національний стандарт України).

34. ДСТУ EN 12101-6:2016 «Системи протидимного захисту. Частина 6. Технічні вимоги до систем зі створення різниці тисків (EN 12101-6:2005, IDT; EN 12101-6:2005/AC:2006, IDT)»: нац. стандарт України. чин. від 01.07.2017. Київ. ДП «УкрНДНЦ», 2017. 78 с. (Національний стандарт України). 35. ДСТУ EN 12845:2016 Стаціонарні системи пожежогасіння. Автоматичні спринклерні системи. Проектування, монтування та технічне обслуговування (EN 12845:2015, IDT). [Чинний від 01.09.2016]. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2017, 207 с. (Національний стандарт України).

36. ДСТУ Б CEN/TS 14816:2013 «Стаціонарні системи пожежогасіння. Дренчерні системи. Проектування, монтування та технічне обслуговування (CEN/TS 14816:2008, IDT)»: нац. стандарт України. чин. від 01.04.2014. Київ. ДП «УкрНДНЦ», 2014. 55 с. (Національний стандарт України).

37. ДСТУ CEN/TS 14972:2016 «Стаціонарні системи пожежогасіння. Системи пожежогасіння тонкорозпиленою водою. Проектування та монтування (CEN/TS 14972:2011, IDT)». нац. стандарт України. чин. від 01.08.2016; Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 74 с. (Національний стандарт України).

38. ДСТУ Б EN 13565-2:2013 «Стаціонарні системи пожежогасіння. Системи пінного пожежогасіння. Частина 2. Проектування, монтування та технічне обслуговування (EN 13565-2:2009, IDT)». нац. стандарт України. чин. від 01.04.2014; Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2014. 98 с. (Національний стандарт України).

39. ДСТУ EN 15001-1:2015 «Газова інфраструктура. Монтаж газопроводів з робочим тиском понад 0,5 бар для промислових і непромислових установок. Частина 1. Детальні вимоги до проектування, матеріалів, конструкцій, контролю та випробування (EN 15001-1:2009, IDT)». нац. стандарт України. чин. від 01.01.2016; Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 57 с. (Національний стандарт України)

40. ДСТУ 7052:2009 «Протипожежна техніка. Системи порошкового пожежогасіння стаціонарні. Частина 2. Проектування, конструкція та технічне обслуговування (EN 12416-2:2001+A1:2007, MOD)». нац. стандарт України. чин. від 01.01.2011; Київ. ДП «УкрНДНЦ», 2011. 34 с. (Національний стандарт України).

41. Коваль Р. Р., Ємельяненко С. О., Коваль І. Р. Щодо особливостей оцінки пожежних ризиків реабілітаційних центрів. *Комунальне господарство міст. Серія: Інформаційні технології та інженерія*. 2025. Том 4. № 192. С. 361-368.

42. ДСТУ 2273 «Пожежна техніка. Терміни та визначення основних понять»: нац. стандарт України / чин. від 01.04.2007; Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2011. 44 с. (Національний стандарт України).

43. ДБН В.1.2-7-2008 «Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека». [Чинний від 01.10.2008]. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2008, 34 с. (Національний стандарт України).

44. INTERPRETATIVE DOCUMENT Essential Requirement No 2 "SAFETY IN CASE OF FIRE"

45. ДСТУ CEN/TS 54-1 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 1. Вступ (CEN/TS 54-1:2011, IDT)»: нац. стандарт України. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2011. (Національний стандарт України).

46. ДСТУ CEN/TS 54-2 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 2. Прилади приймально-контрольні пожежні (CEN/TS 54-2:1997, IDT)». нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ», 2011. (Національний стандарт України).

47. ДСТУ CEN/TS 54-3 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 3. Оповіщувачі пожежні звукові (CEN/TS 54-3, IDT)». нац. стандарт України. Київ: ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

48. ДСТУ CEN/TS 54-4 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 4. Устаткування електроживлення (CEN/TS 54-4, IDT)». нац. стандарт України. Київ: ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

49. ДСТУ CEN/TS 54-5 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 5. Сповіщувачі пожежні теплові точкові (CEN/TS 54-5, IDT)». нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

50. ДСТУ CEN/TS 54-7 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 7. Сповіщувачі пожежні димові точкові розсіяного світла, пропущеного світла або іонізаційні (CEN/TS 54-7, IDT)». нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

51. ДСТУ CEN/TS 54-10 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 10. Сповіщувачі пожежні полум'я точкові (CEN/TS 54-10, IDT)». нац. стандарт України. Київ: ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

52. ДСТУ CEN/TS 54-11 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 11. Сповіщувачі пожежні ручні (CEN/TS 54-11, IDT)». нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

53. ДСТУ CEN/TS 54-12 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 12. Сповіщувачі пожежні димові лінійні пропущеного світла (CEN/TS 54-12,

IDT)». нац. стандарт України. Київ : ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

54. ДСТУ CEN/TS 54-13 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 13. Оцінювання сумісності компонентів системи (CEN/TS 54-13, IDT)». нац. стандарт України. Київ : ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

55. ДСТУ CEN/TS 54-16 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 16. Прилади приймально-контрольні систем мовленнєвого оповіщення (CEN/TS 54-16, IDT)». нац. стандарт України. Київ : ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

56. ДСТУ CEN/TS 54-17 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 17. Ізолятори короткого замикання (CEN/TS 54-17, IDT)» нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

57. ДСТУ CEN/TS 54-18 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 18. Пристрої вводу-виводу (CEN/TS 54-18, IDT)». нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

58. ДСТУ CEN/TS 54-20 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 20. Сповіщувачі пожежні димові аспіраційні (CEN/TS 54-20, IDT)». нац. стандарт України. Київ : ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України)

59. ДСТУ CEN/TS 54-21 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 21. Обладнання передавання сигналів пожежної тривоги та попереджень про несправність (CEN/TS 54-21, IDT)». нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

60. ДСТУ CEN/TS 54-22 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 22. Сповіщувачі пожежні теплові лінійні відновлювані (CEN/TS 54-22, IDT)». нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

61. ДСТУ CEN/TS 54-23 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 23. Оповіщувачі пожежні світлові (CEN/TS 54-23, IDT)». нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

62. ДСТУ CEN/TS 54-24 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 24. Компоненти систем мовленнєвого оповіщення. Гучномовці (CEN/TS 54-24, IDT)». нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

63. ДСТУ CEN/TS 54-25 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 25. Компоненти, які використовують радіозв'язок (CEN/TS 54-25, IDT)». нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

64. ДСТУ CEN/TS 54-26 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 26. Сповіщувачі пожежні монооксиду вуглецю точкові (CEN/TS 54-26, IDT)». нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

65. ДСТУ CEN/TS 54-27 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 27. Сповіщувачі пожежні димові для повітроводів (CEN/TS 54-27, IDT)». нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

66. ДСТУ CEN/TS 54-28 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 28. Сповіщувачі пожежні теплові лінійні невідновлювані (CEN/TS 54-28, IDT)». нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

67. ДСТУ CEN/TS 54-29 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 29. Сповіщувачі пожежні мультисенсорні. Сповіщувачі пожежні точкові з сенсорами диму і теплоти (CEN/TS 54-29, IDT)». нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

68. ДСТУ CEN/TS 54-30 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 30. Сповіщувачі пожежні мультисенсорні. Сповіщувачі пожежні точкові з сенсорами монооксиду вуглецю і теплоти (CEN/TS 54-30, IDT)». нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

69. ДСТУ CEN/TS 54-31 «Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 31. Сповіщувачі пожежні мультисенсорні. Сповіщувачі пожежні точкові сенсорами диму, монооксиду вуглецю і (додатково) теплоти (CEN/TS 54-31, IDT)». нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ». (Національний стандарт України).

70. ISO 8421-2:1987 «Fire protection - Vocabulary - Part 2: Structural fire protection»: [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.iso.org/ru/standard/15591.html>.

71. Ніжник В., Савченко О.В., Добряк Д., Кравченко Н. Аналіз сучасного стану управління індивідуальним пожежним ризиком із використанням систем протипожежного захисту *Науковий журнал «Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки»*, Київ: 2022. Т 33 (72) № 1. С. 328-333.

72. Хаткова Л., Дагіль В. Дослідження величини пожежного ризику під час транспортування та зберігання нафтопродуктів в умовах нафтобази. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2024. Том 8. № 1. С. 113-121.

73. Шарий В. В. Підвищення ефективності систем забезпечення пожежної безпеки складських приміщень: дис. д-р філос.: 261. Львів, 2022. 197 с.

74. Fiorentini L., Cancelliere P. Fire Protection Systems functional safety requirements in performance-based design: proposed workflow and a simple case application. *Journal of Physics Conference Series* 2024. 2885(1). 012088. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2885/1/012088>.

75. Festag S. The Statistical Effectiveness of Fire Protection Measures: Learning from Real Fires in Germany. *Fire Technology*. (2021). <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01073-y>.

76. Marsh Ltd, & New Zealand Fire Service Commission. (2008). Effectiveness of fire safety systems for use in quantitative risk assessments. *New Zealand Fire Service Commission*.

77. Ishola F., Oladokun V., Petinrin O., Olatunji O., Akinlabi S. A mathematical model and application for fire risk management in commercial complexes in South Africa. *Results in Engineering*. 2020. 7. 100145. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100145>.

78. Stephen G. Badger, Thomas Johnson. 1999 Large Loss Fires and Explosions. *NFPA Journal*. November. December 2000. p.79-82.

79. Оношко І. А., Ковалишин В. В. Аналіз методології оцінювання пожежних ризиків. *Пожежна безпека*. 2022. №41. С. 94-102.

80. Савченко О., Добряк Д., Ніжник В., Роль системи протипожежного захисту під час оцінювання індивідуального пожежного ризику / *XVII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи та розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів, (03.2022):- ЛДУБ С. 114-116.

81.Ouache R., Chhipi-Shrestha G., Hewage K., Sadiq R. An integrated fire risk management framework for smart-green multi-unit residential Buildings: Assessment of combustibility, extinguishing strategies, and impact prediction. *Journal of Building Engineering*. 2025. 109. 112975. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112975>.

82. Pravin Tathod, Kamlesh Mishra. Evaluation of Fire Protection Systems in Multiple Use High-rise Buildings for Fire Safety Optimization. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*. 2024. pp. 193-202. <https://doi.org/10.48175/ijarsct-18631>.

83. Мовмига Н. Є., Макаренко В. В., Бойченко М. О. Оцінка пожежного ризику. Безпека людини у сучасних умовах : зб. доп. 16-ї Міжнар. наук.-метод. конф., 6-7 груд. 2024 р., Харків, 2024. С. 62-64.

84. Оношко І. А., Кушнір А. П., Вовк С. Я., Кобко В. А. Аналіз можливостей підвищення протипожежного захисту авіаційних ангарів шляхом вдосконалення високотехнологічних систем виявлення пожежі. *Пожежна безпека*. 2023. № 43. С. 99-112.

85. Hassanain M. A., Al-Harogi M., Ibrahim A. M. Fire Safety Risk Assessment of Workplace Facilities: A Case Study. *Frontiers in Built Environment*. 2022. 8. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.861662>.

86. ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення». нац. стандарт України. Київ. ДП «УкрНДНЦ». - 1996. - 96 с. (Національний стандарт України).

87. Cvetković V. M., Dragašević A., Protić D., Janković B., Nikolić N., Milošević P. (2021). Fire Safety Behavior Model for Residential Buildings: Implications for Disaster Risk Reduction. *Papers.ssrn.com*. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3966944.

88. Malatinský A. Determining the degree of fire risk in a municipality. *Scientific Journal of the Military University of Land Forces*. 2025. 216(2). pp. 1–12. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.0222>.
89. Van Hees, P. Validation and Verification of Fire Models for Fire Safety Engineering. *Procedia Engineering*. 2013. 62. pp. 154–168. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.052>.
90. ДСТУ 2862-94 «Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги»: нац. стандарт України. Київ: ДП «УкрНДНЦ». 1997. 90 с. (Національний стандарт України).
91. Inside Risk: Selecting fire protection systems | Lockton. (2024). Lockton. <https://global.lockton.com/news-insights/inside-risk-selecting-fire-protection-systems>.
92. Yan-bo H., Bing H., Zhe Z. Research on Assessment Method of Fire Protection System. *Procedia Engineering*. 2011. 11. pp. 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.640>.
93. Taylor M., Appleton D., Keen G., Fielding J. Assessing the effectiveness of fire prevention strategies. *Public Money & Management*. 2019. 39(6), pp. 418–427. <https://doi.org/10.1080/09540962.2019.1579439>.
94. BS 9792:2025 | 1 Aug 2025 | BSI Knowledge. (2025). Bsigroup.com. <https://knowledge.bsigroup.com/products/fire-risk-assessment-housing-code-of-practice>.
95. MIL-STD-756A «Military Standard: Reliability Modeling and Prediction (18 Nov 1981)»: [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0700-0799/MIL_STD_756B_1072/.
96. MIL-HDBK-217 *Part Stress & Part Count*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://aldservice.com/reliability/mil-hdbk-217.html>.
97. Gray R.M. Probability, Random Processes and Ergodic Properties-Springer-Verlag, 1987.
98. MIL-HDBK-472 «Military Standardization Handbook: Maintainability Prediction (24 May 1966)»: [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-0300-0499/MIL_STD_472_1324/.

99. Durrett R. Probability, Probability, Theory and Examples *Wadsworth Publishing*, 1996.
100. Kallenberg O. Foundation of Modern Probability *Springer. Verlag*, 1997.
101. Mi H., Liu Y., Wang W., Xiao G. An Integrated Method for Fire Risk Assessment in Residential Buildings. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. pp. 1-14. <https://doi.org/10.1155/2020/9392467>.
102. Даник Ю. О., Кіріченко Д. О. Застосування систем штучного інтелекту для вирішення проблем пожежної безпеки. *Механіка та математичні методи*. 2025.Т. 7. Вип. 1. С. 152-172.
103. Ahmed W., Khudair B. H. Assessment Strategies of Fixed Firefighting system in Residential Multi-Story Building for Improving Fire Safety: A Review. *Journal of Engineering* 2022. 28(6). pp. 53-64. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2022.06.05>.
104. Bostani A. M., Pourebrahim, S. Integrated fire risk assessment using time-series satellite data and multi-criteria decision-making techniques. *Environmental and Sustainability Indicators*. 2025. 28. 100916. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100916>.
105. Костюченко Ю. В. Комплексування даних супутникових спостережень і математичного моделювання в задачах оцінки геоекологічних ризиків і безпеки : дис. д-ра техн. наук: 05.07.12. Київ, 2017. 378 с.
106. Hartzell A.L., Silva M.G., Shea H.S. MEMS Reliability. Springer, 2011. 291 с.
107. Arney, S. (2001) Designing for MEMS reliability. *MRS Bull* 26(4), 296.
108. D. M. Tanner et al. MEMS reliability: infrastructure, test structures, experiments, and failure modes (2000). Sandia Report SAND2000-0091, [Електронний ресурс. Режим доступу]: <http://mems.sandia.gov/tech-info/doc/000091o.pdf>.
109. Gad-el-Hak, M. (ed) (2002) The MEMS Handbook. Boca Raton, FL: CRC Press.
110. Boyce, B.L., Grazier, J.M., Buchheit, T.E., Shaw, M.J. (2007) Strength distributions in polycrystalline silicon MEMS. *J. Microelectromech. Syst.* 16(2), 179.
111. Srikar, V.T., Senturia, S.D. (2002) The reliability of microelectromechanical systems (MEMS) in shock environments. *J. Microelectromech. Syst.* 11(3), 206.

112. Ніжник В.В., Жихарєв О.П. Звіт про науково-дослідну роботу Дослідження впливу пожежних ризиків на комплекс заходів для уникнення або мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій на території зони відчуження (ПБ зони відчуження).. К.: ІДУ НД ЦЗ, 2021. 292 с.

113. Ніжник В., Фещук Ю., Жихарєв О., Циганков А., Савченко О. Оцінка стану оперативної обстановки території зони відчуження. *XII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. ЧПБ НУЦЗУ: 2021. С. 44-46.

114. Циганков А., Ніжник В., Балло Я., Сізіков О., Жихарєв О., Тесленко О. Вплив часу прибуття підрозділів пожежної охорони до місця виклику на тривалість гасіння пожежі на території зони відчуження. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. К.: №1 (9) 2020, с. 84-93.

115. Danzi E., Fiorentini L., Marmo L. (2020). FLAME: A Parametric Fire Risk Assessment Method Supporting Performance Based Approaches. *Fire Technology*. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01014-9>.

116. Brzezińska D., Bryant P. Risk Index Method – A Tool for Building Fire Safety Assessments. *Applied Sciences*. 2021. 11(8). 3566. <https://doi.org/10.3390/app11083566>.

117. Qian X. Evaluation on sustainable development of fire safety management policies in smart cities based on big data. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2023. 20(9). pp. 17003-17017. <https://doi.org/10.3934/mbe.2023758>.

118. Cleef L., Yang M., Britte Bouchaut, Genserik Reniers. Fire risk assessment tools for the built environment - An explorative study through a developers' survey. *Fire Safety Journal*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104169>.

119. Шевченко Н. Ю., Верещак О. О. Оцінка пожежного ризику: методика та інструментарій. Актуальні задачі сучасних технологій : *матеріали VII Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів*, 28-29 лист. 2018 р., Тернопіль, 2018. С. 196-197.

120. Бегун В. В., Потєтюєв С.Ю. Нова методика оцінки пожежного ризику. *Математичні машини і системи*. 2020. № 4. С. 125-135.

121. Дзюба Л. Ф., Чмир О. Ю., Пазен О. Ю., Кусій М. І. Оцінка ризиків пожежної безпеки підприємства *Вісник ЛДУБЖД*. 2024. № 29. с. 110-118.
122. Р. В. Климась та ін. Удосконалення методичних підходів до оцінювання пожежного ризику *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2016. № 2(2). С. 83-88.
123. Bukowski R. W., Stiefel S. W., Hall Jr. J. R., Clarke F. B. Fire risk assessment method: description of methodology BenJamln/Clarke Assoc. Kensington, MD, 1990. 86 p.
124. Михайлова А. В., Ніжник В. В. Щодо зарубіжного досвіду з визначення пожежного ризику. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2013. № 1 (27). С. 100-105.
125. Markert F. (2018). Methods supporting fire risk assessment and management. Knowledge For Resilient Society K-FORCE. <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/151156068/Untitled.pdf>.
126. Gehandler J. The theoretical framework of fire safety design: Reflections and alternatives. *Fire Safety Journal*. 2017. 91. pp. 973-981. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.034>.
127. Mandryk D., Zhyrak R. Theoretical prerequisites for the integration of fire safety into the architectural and planning organization of public buildings. *Urban Development and Spatial Planning*. 2025. 88. pp. 147-161. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2025.88.147-161>.
128. Савченко О.В., Ніжник В.В., Циганков А.О., Тесленко О.М. Аналіз сучасного стану технічного обслуговування систем протипожежного захисту *Науковий збірник «Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека»*. 2025 Київ № 2 (20). С.116-123.
129. Jurgita Šakėnaitė, Egidijus Rytas Vaidogas. (2010). Fire Risk Indexing and Fire Risk Analysis: A Comparison of Pros and Cons. ResearchGate; unknown. <https://www.researchgate.net/publication/228583397>.
130. Koutsomarkos V., Rush D., Jomaas G., Law A. Tactics, objectives, and choices: Building a fire risk index. *Fire Safety Journal*. 2021. 119. 103241. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103241>.

131. Захарова М. В. Метод вибору комплексів заходів і засобів протипожежного захисту в умовах невизначеності та аналіз його ефективності. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2013. №13. С. 38-42.

132. O'connor L., Al-Farsi F., Hassan B. (2024). AI Algorithms for Fire Risk Assessment: Machine learning models for predicting fire hazards in large spaces. <https://www.researchgate.net/publication/384326295>.

133. Pastor E. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2003. 29(2). pp. 139-153. [https://doi.org/10.1016/s0360-1285\(03\)00017-0](https://doi.org/10.1016/s0360-1285(03)00017-0).

134. Дишкант О.В., Дивень В.І., Доценко О.Г., Савченко О.В. Чинники, які впливають на швидкість евакуації *XXII-ий том міжнародної колективної монографії "MODERNÍ ASPEKTY VĚDY" ("Сучасні аспекти науки")*, 2022 Київ: С.516-526.

135. Тесленко О. М., Цимбалістий С. З., Кравченко Н. В., Доценко О. Г., Крикун О. М. Аналіз існуючих програмних комплексів для розрахунку часу евакуації людей під час пожежі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека* № 1 (7), 2019. С. 33-39.

136. Білошицький М. В., Кравченко Н. В., Тесленко О. М., Добряк Д. О., Цимбалістий С. З. Деякі питання токсичної дії продуктів горіння на людину IX Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист», НУЦЗУ ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля: 2019. С. 19-24.

137. Наказ МВС України від 06.06.2017 № 470 «Про затвердження Правил пожежної безпеки на ринках України»: зареєстровано в Міністерстві юстиції України 29.06.2017 за № 795/30663.

138. Kumar K., Paul V. K. A Critical Review of Risk Factors and Reliability Assessment Issues of Fire and Life Safety in Buildings. 2022. 37(3). pp. 23-33. <https://doi.org/10.1177/2977657020220303>.

139. Febri Anindita Suralaga, Sari N., Dina Dwi Nuryani, None Samino. Analysis of Risk Factors for Fire Protection. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*. 2024. 10(1). pp. 143–155. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i1.5402>.

140. Савченко О., Ніжник В., Добряк Д., Критерії для дослідження впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик. *Науковий журнал: Вчені записки таврійського Національного університету В.І. Вернадського, Серія Технічні науки*. Т. 34(73) № 1. Київ: 2023. С. 336-341.

141. Іванюта С.М. Антикризове управління: [навч. посіб.] Центр учбової літератури К., 2007. 288 с.

142. Dunbar J.H. Risk Management and Risk Assesment. *Russia – British Fire Safety and Protection Seminar*. 3-5 October 1995.

143. Бегун В.В. Безпека життєдіяльності: [навч. посіб.] УАННП “Фенікс”, К.: 2004. 328 с.

144. Kochnov O., Kochegarov A., Sazonova S. Mathematical modeling in the management of fire protection systems of objects. *Modeling of Systems and Processes*. 2023. 16(4). pp. 40-48. <https://doi.org/10.12737/2219-0767-2023-16-4-40-48>.

145. Choi M., Jun S. Fire risk assessment models using statistical machine learning and optimized risk indexing. *Applied Sciences*. 2020. 10(12). 4199. <https://doi.org/10.3390/app10124199>.

146. Климась Р.В., Михайлова А.В., Матвійчук Д.Я. Результати розрахунків імовірності виникнення пожеж у будівлях і спорудах різного призначення. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. К.: №2(22), 2010, с. 173-176.

147. Ніжник В.В., Климась Р.В., Сізіков О.О., Якименко О.П., Нетребя А.В., Довгошеєва Н.М. Удосконалення методичних підходів до оцінювання пожежного ризику. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. К.: №2(2), 2016, с. 83-88.

148. *The rising importance of fire safety and protection risks*. (2024). Arcadis.com. <https://www.arcadis.com/en-us/insights/blog/united-states/ali-khalid/2024/the-rising-importance-of-fire-safety-and-protection-risks>.

149. Gupta A., Kumar R., Yadav P., Naveen M. Fire safety through mathematical modelling. *Current Science*. 2001) 80(1). https://www.researchgate.net/publication/228763095_Fire_safety_through_mathematical_modelling.

150. Гуліда Е. М., Коваль О. М., Шарий В. В. Забезпечення протипожежного захисту виробничо-складських об'єктів промислових підприємств з урахуванням пожежного ризику. *Пожежна безпека*. 2019. №34. С. 28-34.

151. Admin. (2024). Fire Safety Regulations In Different Countries – Ken Institute. Ken Institute. <https://keninstitute.com/fire-safety-regulations-in-different-countries>.

152. Ніжник В.В. Аналіз теоретичних та експериментальних методів досліджень теплопередачі між будинками та спорудами під час пожежі. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. 2019. Вип. №3 (65)/2019. С. 86-92.

153. Konig J. and Walleig L. Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires. Part 2: A design model for standard fire expose. Tratek, Rapport I 0001001.-Stocholm.–June 2000.

154. 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.

155. 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. Кропивницкий. 390 Naukowy wydawany. *ВІР. Bezpieczenstwo i technika pożarnicza*. Vol. 51 ISSUE 3, 2018. 60-67. (Видання індексується бібліометричною платформою Index Copernicus).

156. D.A. Anderson, J.C. Tannehill, and R.H. Pletcher. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. *Hemisphere Publishing Corporation, Philadelphia, Pennsylvania*, 1984.

157. Ніжник В.В. Оцінка класу вогнестійкості самонесучої стіни залізобетонних модулів сховища відпрацьованого ядерного палива. Поздеев С.В.,

Отрош Ю.А., Ніжник В.В., Борис О.П. *«Пожежна безпека: теорія і практика»*. – Черкаси, 2015. №20. С. 81-90.

158. K. McGrattan [et al.] Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide. NIST Special Publication 1019-5. 2009. 176.

159. K. McGrattan [et al.] Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical model. NIST Special Publication 1018-5. 2009. 94p.

160. Tukmacheva M., Shestakov A. A complex mathematical model of information, functional, and fire safety of dangerous production facilities in the technosphere. Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2025. 2. <https://doi.org/10.61260/2307-7476-2025-2-23-39>.

161. Ніжник В.В., Крикун О.М., Кропивницький В.С., Ніжник В.В., Жихарев О.П., Добряк Д.О. Обґрунтування швидкості руху пожежних автомобілів для визначення дислокації пожежно-рятувальних підрозділів Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2018. Київ. № 1 (5). С. 21-25.

162. Guo J., Zhang Y., Zhao B., Wu S. The mathematical model based on the parameters of simulation results predicts the fire extinguishing resource demand of naval fires. Applied Sciences. 2024. 14(21). 10038. <https://doi.org/10.3390/app142110038>.

163. Поздеев С.В. Развитие научных основ определения пределов огнестойкости несущих железобетонных конструкций: дис. доктора тех. наук: 21.06.02 Черкаси. С. 351.

164. Ніжник В.В. Розвиток наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти: дис. доктора тех. наук: 21.06.2020 Київ.

165. Балло Я.В., Нижник В.В. и др. Определение воздействия пожара от наружных установок кондиционирования воздуха на фасады зданий *Восточно-Европейский журнал корпоративных технологий* 2022 Т 3, 10-117, С. 72-79 (2022).

166. NFPA 551 «Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments»: [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://catalog.nfpa.org/NFPA-551-Guide-for-the-Evaluation-of-Fire-Risk-Assessments-P1331.aspx>.

167. BS 7974 Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Code of practice. [Електронний ресурс]. Режим доступу <https://knowledge.bsigroup.com/products/application-of-fire-safety-engineering-principles-to-the-design-of-buildings-code-of-practice/standard>.

168. ДСТУ ISO 16732-1:2018 «Інжиніринг пожежної безпеки. Оцінювання пожежного ризику. Частина 1. Загальні положення (ISO 16732-1:2012, IDT)»: нац. стандарт України / Київ: ДП «УкрНДНЦ». 2019. 27 с. (Національний стандарт України).

169. Технічне керівництво SFPE з оцінки пожежного ризику.

170. Рекомендації європейської організації страхування та пенсійного забезпечення, 2013 рік.

171. Звіт міжнародної фінансової корпорації ICF. [Електронний ресурс. Режим доступу]: <https://finance.smr.gov.ua/posts/novivi/mizhnarodna-finansova-korporatsiya-ifc-v-ukraini>.

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

173. Нижник В.В., Фещук Ю.Л., Поздеев С.В. Методология прогнозирования пределов огнестойкости деревянных колонн с огнезащитной облицовкой *Международный научный журнал "Интернаука"*. 2018. № 14. С. 74-81.

174. Danchenko Y., Andronov V., Teslenko M., Permiakov V., Rybka E., Meleshchenko R., Kosse A., "Study of the free surface energy of epoxy composites using an automated measurement system", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol.1, No.12(91), pp. 9-17.

175. Vadim Nizhnyk, Olesya Savchenko, Yaroslav Ballo Valeriia Nekora Theoretical Approaches to Justify the Coefficients of Influence of Fire Protection Systems on Individual Fire Risk *International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering EcoComfort 2022: Proceedings of EcoComfort 2022* pp 299–306 Scopus DOI: 10.1007/978-3-031-14141-6_30.

176. Несенюк Л.П., Савченко О.В., Ніжник В.В., Нікулін О.Ф. Методи оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. К.: № 2 (14). С. 134-142.

177. Ніжник В.В., Савченко О.В., Некора В.С. Теоретичні підходи для дослідження закономірності впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗУ «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»* 2023. Т. 7 № 1 С.67-76.

178. Савченко О.В., Добряк Д.О., Кравченко Н.В., Луценко Ю.В., Ніжник В.В. Методика теоретичних досліджень з визначення коефіцієнтів ймовірної ефективності функціонування систем протипожежного захисту Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності: матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. Львів (30-31 березня 2023). ЛДУБЖД. 2023. С.156-158.

179. Ballo Ya, Yakovchuk R, Nizhnyk V, Sizikov O, Kuzyk A, Investigation of design parameters facade fire-preventing eaves for prevent the spread of fires on facade structures of high-rise buildings *Fire Safety*, №37, (2020) pp. 16-23.

180. Постанова Кабінету Міністрів України від 05.09.2018 № 715 «Про затвердження критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності та визначається періодичність здійснення планових заходів державного нагляду (контролю) у сфері техногенної та пожежної безпеки Державною службою з надзвичайних ситуацій»: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/715-2018-%D0%BF#Text>.

181. Ніжник В.В., Савченко О.В., Некора В.С., Одинець А.В. Дослідження впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику *The scientific heritage (Budapest, Hungary)* 2023. No 109 P. 64-70.

182. Ніжник В., Савченко О., Некора В., Несенюк Л. Теоретичні дослідження щодо ефективності функціонування систем протипожежного захисту *XIII*

Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». (26.03. 2022 року) Черкаси, С. 28-30.

183. Звіт за темою: “Провести дослідження та розробити методика розрахунку необхідної штатної чисельності працівників Державного пожежного нагляду для населених пунктів України” УкрНДІПБ МВС України, 1996 р.

184. Звіт за темою: «Визначити нормативи навантаження та обґрунтувати алгоритм розрахунку необхідної штатної чисельності інспекторського складу підрозділів запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України», 2022.

185. Butenko O., Topchiy A. Modeling fires based on the results of correlation analysis. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. 2023. 10(3). pp. 28–33. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.3.245>.

186. ДСТУ 2272:2006 «Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять»: нац. стандарт України / Київ: ДП «УкрНДНЦ». 2007. 32 с. (Національний стандарт України).

187. Boyce, B.L., Grazier, J.M., Buchheit, T.E., Shaw, M.J. (2007) Strength distributions in polycrystalline silicon MEMS. *J. Microelectromech. Syst.* 16(2), 179. [in English].

188. Ніжник В., Савченко О., Несенюк Л., Оношко І., Програма та методика експериментальних досліджень впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту».* 2024 Харків. С. 97.

189. Правила безпеки праці в органах і підрозділах ДСНС. Затверджені наказом ДСНС від 31.12.2025 № 1661.

190. Савченко О.В., Ніжник В.В., Савченко Т.О. Програма та методика експериментальних досліджень впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик *Науковий журнал «Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки»*, 2024 Київ Т. 35 (74) № 1. С. 348-353.

191. Інструкція з проведення міжлабораторних порівняльних випробувань у сфері пожежної безпеки. УкрНІЦЗ. Київ. 2007.

192. Савченко О.В., Ніжник В.В., Коваль Р.Р. Експериментальні дослідження впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик *Збірник наукових праць «Проблеми надзвичайних ситуацій»* № 2(42) (2025) С.285-294. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-42-18.

193. Сізіков О., Ніжник В., Балло Я., Голікова С., Савченко О. Систематизація процесу управління пожежною безпекою об'єкта захисту *Науковий збірник «Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека»*, 2019. Київ № 2 (8). С. 41-49.

194. Савченко О., Зенкін А., Козелло Н., Сізіков О., Ніжник В., Балло Я. Удосконалення протипожежного захисту об'єктів шляхом обґрунтування загальних положень системи управління пожежною безпекою *Вісник UAS «Стандартизація, сертифікація, якість»*, 2019 Київ № 6 (118). С. 18-25.

195. Савченко О., Козелло Н., Сізіков О., Ніжник В., Балло Я. Удосконалення протипожежного захисту об'єктів шляхом обґрунтування загальних положень системи управління пожежною безпекою *Міжнародна науково-практична конференція «Пріоритетні напрями досліджень в науковій та освітній діяльності»*. 2019. Львів: (5-6.12.2019) С. 45-47.

196. Савченко О.В., Ніжник В.В., Добряк Д.О., Кравченко Н.В. До питань ефективності функціонування систем протипожежного захисту Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: *Зб. наук. праць Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Львів: ЛДУБЖД, 2022. С. 227-229.

197. О.В. Савченко, В.В. Ніжник Удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту *Збірник наукових праць «Пожежна безпека»* Том 47. Львів, (2025).

ДОДАТОК А

Список публікацій за темою дисертації

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Сізіков О., Ніжник В., Балло Я., Голікова С., **Савченко О.** Систематизація процесу управління пожежною безпекою об'єкта захисту. *Науковий збірник «Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека»*. № 2 (8). Київ, 2019. С. 41-49.
2. Балло Я., Голікова С., Сізіков О., Жихарев О., **Савченко О.**, Несенюк Л. Вимоги пожежної безпеки до висотних громадських будівель з умовною висотою від 100 м до 150 м. *Науковий збірник «Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека»*. № 2 (12). Київ, 2021. С. 30-42.
3. Дишкант О., Дивень В., Доценко О., **Савченко О.** Чинники, які впливають на швидкість евакуації. *XXII-ий том міжнародної колективної монографії "MODERNÍ ASPEKTY VĚDY" ("Сучасні аспекти науки")*. Київ, 2022. С. 516-526.
4. Несенюк Л., **Савченко О.**, Ніжник В., Нікулін О. Методи оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. № 2 (14). Київ, 2022. С. 134-142.
5. Ніжник В., **Савченко О.**, Некора В. Теоретичні підходи для дослідження закономірності впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗУ «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. Том 7 № 1. Черкаси, 2023. С. 67-76.
6. **Савченко О.**, Ніжник В. Удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту. *Збірник наукових праць «Пожежна безпека»*. Том 47. Львів, 2025. С. 96–102.
7. **Савченко О.**, Ніжник В., Коваль Р. Дослідження впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик. *Збірник наукових праць «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. № 2(42). Черкаси, 2025. С. 285-294.
8. **Савченко О.**, Ніжник В., Циганков А., Тесленко О., Селіхов Д. Аналіз сучасного стану технічного обслуговування систем протипожежного захисту.

Науковий збірник «Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека». № 2 (20). Київ, 2025. С.116-123.

9. Ніжник В., **Савченко О.**, Некора В., Одинець А. Дослідження впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику. *The scientific heritage (Budapest, Hungary)*. № 109 (109) (2023). Р. 64-70.

10. **Савченко О.**, Зенкін А., Козелло Н., Сізіков О., Ніжник В., Балло Я. Удосконалення протипожежного захисту об'єктів шляхом обґрунтування загальних положень системи управління пожежною безпекою. *Вісник UAS «Стандартизація, сертифікація, якість»*. № 6 (118). Київ, 2019. С. 18-25.

11. Ніжник В., **Савченко О.**, Добряк Д., Кравченко Н. Аналіз сучасного стану управління індивідуальним пожежним ризиком із використанням систем протипожежного захисту. *Науковий журнал «Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки»*. Том 33 (72) № 1. Київ, 2022. С. 328-333.

12. Ніжник В., **Савченко О.**, Добряк Д. Критерії для дослідження впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик. *Науковий журнал «Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки»*. Том 34 (73) № 1. Київ, 2023. С. 336-341.

13. **Савченко О.**, Ніжник В., Савченко Т. Програма та методика експериментальних досліджень впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик. *Науковий журнал «Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки»*. Том 35 (74) № 1. Київ, 2024. С. 348-353.

14. Vadim Nizhnyk, **Olesya Savchenko**, Yaroslav Ballo, Valeriia Nekora Theoretical Approaches to Justify the Coefficients of Influence of Fire Protection Systems on Individual Fire Risk. *International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering EcoComfort 2022: Proceedings of EcoComfort*. 2022. pp 299–306 **Scopus**.

15. **Савченко О.**, Козелло Н., Сізіков О., Ніжник В., Балло Я. Удосконалення протипожежного захисту об'єктів шляхом обґрунтування загальних положень

системи управління пожежною безпекою. *Міжнародна науково-практична конференція «Пріоритетні напрями досліджень в науковій та освітній діяльності»*. Львів: (5-6.12.2019). Львівський науковий форум, 2019. С. 45-47.

16. **Савченко О.**, Ніжник В., Одинець А., Несенюк Л. Аналіз статистичних даних про пожежі щодо ефективності спрацювання систем протипожежного захисту. *XI Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. Черкаси, (28-29.10.2021 року). Черкаси, ЧПБ НУЦЗУ. С. 52-53.

17. **Савченко О.**, Добряк Д., Ніжник В. Роль систем протипожежного захисту під час оцінювання індивідуального пожежного ризику. *XVII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»*. Львів, (03.2022 року). Львів, ЛДУ БЖД. С. 114-116.

18. Ніжник В., **Савченко О.**, Некора В., Несенюк Л. Теоретичні дослідження щодо ефективності функціонування систем протипожежного захисту. *XIII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. Черкаси, (26.03. 2022 року). Черкаси, ЧПБ НУЦЗУ. С. 28-30.

19. **Савченко О.**, Ніжник В., Добряк Д., Кравченко Н. До питань ефективності функціонування систем протипожежного захисту. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: Зб. наук. праць Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Львів, ЛДУБЖД, 2022. С. 227-229.

20. **Савченко О.**, Добряк Д., Кравченко Н., Луценко Ю., Ніжник В. Методика теоретичних досліджень з визначення коефіцієнтів ймовірної ефективності функціонування систем протипожежного захисту *Проблеми та перспективи розвитку систем безпеки життєдіяльності: матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів*. Львів, (30-31 березня 2023). Львів, ЛДУБЖД. 2023. С.156-158.

21. Савченко О., Несенюк Л., Оношко І. Ніжник В. Програма та методика експериментальних досліджень впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту»*. Харків, НУЦЗУ, 2024. С. 97.

22. Савченко О., Ніжник В. Удосконалення підходів до управління індивідуальним пожежним ризиком на основі ефективності систем протипожежного захисту *Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми забезпечення державної безпеки»*. Київ, Київський інститут національної гвардії України, 2025. С. 413-414.

23. В. Ніжник, Ю. Фещук, О. Жихарєв, А. Циганков, О. Савченко Оцінка стану оперативної обстановки території зони відчуження. *XII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. ЧПБ НУЦЗУ, 2021. С. 44-46.

ДОДАТОК Б

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи



МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ГРОМАД ТА ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ

пр-т Берестейський, 14, м. Київ, 01135,
 тел.: (044) 351-40-96, (044) 351-40-35, (044) 351-40-01,
 E-mail: miu@mtu.gov.ua, сайт: www.mtu.gov.ua, код згідно з ЄДРПОУ 37472062

від _____ 20__ р. № _____

На № _____ від _____ 20__ р.

Національний університет
 цивільного захисту України

Довідка про впровадження

Результати дисертаційної роботи Савченко Олеси Вікторівни за темою «Удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту» використовуються Міністерством під час удосконалення чинної нормативної та нормативно-правової бази у будівництві в частині розвитку параметричного методу нормування, зокрема щодо визначення доцільності оснащення об'єктів будівництва системами протипожежного захисту на основі ризик-орієнтованого підходу, що передбачено Зміною № 2 до ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту».

Заступник Міністра

Наталія КОЗЛОВСЬКА



ДОКУМЕНТ СЕД

Підписувач Козловська Наталія Вікторівна
 Сертифікат 6FA97849F1B2570D0400000095C701005E030600
 Дійсний з 03.02.2025 12:33:58 по 03.02.2026 12:33:58

Міністерство розвитку громад
 та територій України



37117/26/14-25 від 16.12.2025

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

САВЧЕНКО Олесі Вікторівни

за темою «Удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику
з урахуванням впливу систем протипожежного захисту»

Даний акт складено про те, що в Українському союзі пожежної та техногенної безпеки впроваджено в практичну діяльність союзу результати дисертаційної роботи Савченко О.В. за темою «Удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту» в частині використання запропонованого удосконаленого методу оцінювання індивідуального пожежного ризику під час оцінюванні рівня пожежної безпеки об'єктів та індивідуального пожежного ризику, що дає змогу оцінювати необхідність оснащення об'єктів будівництва відповідними системами протипожежного захисту на основі ризик-орієнтованого підходу, чим забезпечується баланс між достатнім рівнем пожежної безпеки та обґрунтованими витратами на проектування та будівництва відповідних систем протипожежного захисту.

Президент - Голова правління

08.12.2025р.



Борис ПЛАТКЕВИЧ



**ФЛАГМАН
СИСТЕМ БЕЗПЕКИ**
ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ

07400, Київська область, м. Бровари,
пров. Соборний, буд. 2-Б
тел.: (067) 968-51-11
e-mail: flagman.sb@ukr.net
КОД ЄДРПОУ 40948746, ІПН 409487410294

№12-25/6

15.12.2025

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

САВЧЕНКО Олесі Вікторівни

за темою «Удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного
ризиків з урахуванням впливу систем протипожежного захисту»

Даний акт складено про те, що в ТОВ «ФЛАГМАН СИСТЕМ БЕЗПЕКИ» впроваджено в практичну діяльність організації результати дисертаційної роботи Савченко О.В. за темою «Удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту» в частині використання запропонованого удосконаленого методу оцінювання індивідуального пожежного ризику під час оцінюванні рівня пожежної безпеки об'єктів та індивідуального пожежного ризику.

Директор



Тетяна ЗІНЧЕНКО

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор
Національного університету цивільного
захисту України
з навчальної роботи
Олександр ДЖУЛАЙ

2025 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи за темою «Удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту» авторки САВЧЕНКО Олеси Вікторівни

Комісія у складі:

голови – начальника навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки, кандидата технічних наук, доцента Мельника В.П.

та членів – доцента кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки Національного університету цивільного захисту України, кандидата технічних наук, доцента Миргород О.В.;

старшого викладача кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки Національного університету цивільного захисту України Майбороди Р.І.

склали акт, який підтверджує, що результати дисертаційної роботи за темою «Удосконалення методу оцінювання індивідуального пожежного ризику з урахуванням впливу систем протипожежного захисту» мають теоретичне та практичне значення для освітнього процесу. Запропонований удосконалений метод оцінювання індивідуального пожежного ризику в частині значень ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту впроваджений в освітній процес на кафедрі державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки Національного університету цивільного захисту України в навчальній дисципліні «Системи забезпечення пожежної безпеки об'єктів» при підготовці здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 261 «Пожежна безпека». Впровадження результатів досліджень даної дисертаційної роботи дозволить підвищити якість провадження лекційних та практичних занять шляхом розширення знань здобувачів за рахунок практичного застосування нових наукових даних.

Голова комісії:

начальник навчально-наукового
інституту пожежної та техногенної безпеки,
кандидата технічних наук, доцента

Валентин МЕЛЬНИК

Члени комісії:

доцент кафедри державного нагляду
у сфері пожежної та техногенної
безпеки НУЦЗ України,
кандидат технічних наук, доцент

Оксана МИРГОРОД

старший викладач кафедри державного
нагляду у сфері пожежної та техногенної
безпеки НУЦЗ України

Роман МАЙБОРОДА