

О. В. Савченко, аспірант (ORCID 0000-0002-4140-3055)
В. В. Ніжник, д.т.н., професор, нач. центру (ORCID 0000-0003-3370-9027)
Р. Р. Коваль, PhD, нач. сектору (ORCID 0000-0001-8970-2831)
Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту України, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА ІНДИВІДУАЛЬНИЙ ПОЖЕЖНИЙ РИЗИК

У роботі представлено результати експериментальних досліджень впливу систем проти-пожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик у будівлях. Показано, що сьогоднішній стан питання зумовлений відсутністю науково обґрунтованих закономірностей, які б кількісно описували вплив ефективного спрацювання систем протипожежного захисту на параметри небезпечних чинників пожежі та, відповідно, на розрахункові значення індивідуального пожежного ризику. Встановлено протиріччя між практичними підходами до забезпечення пожежної безпеки та методами оцінювання ризиків, у яких не враховується ефективність роботи технічних систем. Запропоновано програму та методику експериментального дослідження щодо перевірки теоретичних положень щодо впливу систем протипожежного захисту на динаміку розвитку пожежі, як похідну індивідуального пожежного ризику. Визначено критерії та контрольовані умови, а саме: температура, рівень задимленості, час спрацювання системи протипожежного захисту та час досягнення критичних значень для життя людини зазначених критеріїв. Отримані результати дозволили визначити коефіцієнти ймовірності ефективного спрацювання систем протипожежного захисту та провести валідацію теоретичних досліджень. Встановлено, що комплексне функціонування систем протипожежного захисту забезпечує синергетичний ефект, зменшуючи швидкість розвитку небезпечних чинників пожежі, подовжуючи час досягнення критичних значень таких критеріїв, як температура та задимленості, і тим самим підвищуючи рівень безпеки людей під час евакуації, тобто впливають на значення індивідуального пожежного ризику. Результати дослідження використані для удосконалення методики оцінювання індивідуального пожежного ризику, можуть бути використані під час розроблення нормативних вимог щодо оснащення об'єктів системами протипожежного захисту.

Ключові слова: протипожежний захист, ризик, ефективність спрацювання, сигналізація, пожежогасіння, протидимний захист

1. Вступ

Одним із головних завдань системи цивільного захисту є створення безпечних умов перебування людей у будинках, будівлях, спорудах і їх частинах, а також мінімізація ризиків виникнення та поширення пожеж і запобігання від їх небезпечних чинників.

Системи протипожежного захисту (далі – СПЗ) є важливою складовою для запобігання виникненню та розвитку пожеж, а також для мінімізації ризику загибелі людей. Встановлення СПЗ є технічним рішенням, яке безпосередньо сприяє зниженню загальних пожежних ризиків на об'єкті.

Стан розглянутої проблеми відзначається наявністю певних протиріч:
на практиці:

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

б) з іншого боку, при оцінюванні індивідуального пожежного ризику ефективність СПЗ не враховується;

в теорії:

а) з одного боку, існують підходи до математичного моделювання впливу СПЗ на індивідуальний пожежний ризик;

б) з іншого боку, відсутні науково обґрунтовані закономірності, які б визначали вплив СПЗ на розрахункові параметри ризику.

Наукова проблема полягає в існуванні суперечливої ситуації між практичним застосуванням систем протипожежного захисту та існуючими методами оцінювання індивідуального пожежного ризику. Незважаючи на доведену ефективність СПЗ у зниженні ймовірності виникнення та розвитку пожеж і мінімізації небезпечних чинників для життя і здоров'я людей, їх фактичний вплив не інтегровано в сучасні методики розрахунку пожежних ризиків. У теоретичному вимірі проблема ускладнюється відсутністю науково обґрунтованих закономірностей, які б кількісно описували вплив функціонування СПЗ на параметри небезпечних чинників пожежі та, відповідно, на індивідуальний пожежний ризик. Відтак наукова проблема виявляється у необхідності розроблення, формалізації та валідації таких закономірностей, що забезпечить можливість науково коректного врахування ефективності СПЗ у методах оцінювання індивідуального пожежного ризику.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Питання оцінювання індивідуального пожежного ризику розглядаються у численних працях вітчизняних та зарубіжних дослідників. У роботах [1–2] акцентовано увагу на визначенні показників ризику на основі ймовірнісних характеристик виникнення пожежі, розвитку небезпечних чинників та часу, необхідного для евакуації людей, але разом із цим такі підходи не дозволяють врахувати на об'єкті наявність СПЗ.

У нормативних документах – зокрема, [3–5] – наведені загальні положення щодо оцінювання ризиків та проектування СПЗ. Проте вони не враховують динаміку фактичного спрацювання СПЗ у реальних умовах пожежі.

Наукові дослідження [6, 7] свідчать, що ефективність функціонування автоматичних систем пожежної сигналізації, протидимного захисту та пожежогасіння суттєво впливає на швидкість розвитку небезпечних чинників пожежі. При цьому, експериментальні підтвердження цих процесів є обмеженими, а розрахункові моделі часто не враховують реальні затримки спрацювання або вплив комплексного застосування систем, що потребує валідації розрахункових моделей із використанням результатів експериментальних досліджень.

На сучасному етапі для оцінювання ефективності технічних систем широко застосовуються методи теорії ймовірностей. Ці підходи отримали розвиток у європейських країнах і передбачають розподіл системи на окремі елементарні компоненти, оцінювання їхніх характеристик та подальше прогнозування ефективності всієї технічної системи в цілому. Зокрема, дослідження впливу СПЗ на індивідуальний пожежний ризик розглянуті у роботі [8], але результати цих досліджень також є виключно теоретичними та не перевірені із умовами реального функціонування СПЗ.

Отже, наявні дослідження, присвячені ймовірності ефективного спрацювання різних інженерних систем та їхніх компонентів, включаючи СПЗ, не охоплюють безпосередньо питання ефективності спрацювання самих СПЗ. У свою чергу, роботи з оцінювання пожежних ризиків не враховують вплив СПЗ на рівень індивідуального пожежного ризику, а деякі результати теоретичних досліджень зазначеного питання не мають перевірки їх достовірності.

Стаття присвячена вирішенню нерозв'язаної частини проблеми наявності суперечностей між практичним застосуванням систем протипожежного захисту

та чинними методами оцінювання індивідуального пожежного ризику, яка полягає у відсутності залежностей, що визначають впливу систем протипожежного захисту на зміну параметрів небезпечних чинників пожежі (температура, задимленість) у часі. Для комплексного вирішення питання щодо впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику потрібно провести експериментальні дослідження, визначити коефіцієнти ефективності функціонування систем та порівняти отримані результати з теоретичними даними для подальшого удосконалення методів оцінювання індивідуального пожежного ризику.

3. Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є експериментальне дослідження впливу систем протипожежного захисту на зміну параметрів небезпечних чинників пожежі та оцінювання ефективності функціонування таких систем, як передумови зниження розрахункового значення індивідуального пожежного ризику.

Для досягнення вищезазначеної мети у роботі поставлені та вирішені такі завдання:

1. Розробити програму та методику експериментальних досліджень із урахуванням впливу різних типів систем протипожежного захисту.
2. Провести серію експериментів за різних умов функціонування систем протипожежного захисту (відсутність систем, наявність систем протипожежного захисту). Здійснити оброблення та статистичний аналіз експериментальних даних. Визначити коефіцієнти ефективності функціонування систем протипожежного захисту та порівняти експериментальні результати з теоретичними даними.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є робота систем протипожежного захисту під час пожежі. Предметом – вплив їх ефективного спрацювання на розрахункові показники індивідуального пожежного ризику. Гіпотеза дослідження – полягає у тому, що між теоретичними моделями впливу СПЗ на індивідуальний пожежний ризик та результатами їх експериментальної перевірки існуватимуть прийнятні розбіжності, що не перевищуватимуть 20 %, а також те, що СПЗ характеризуються різними рівнями ймовірності ефективного функціонування. Зокрема, очікувалося, що найвищий коефіцієнт ймовірності ефективної роботи становитиме для систем автоматичного пожежогасіння.

Методи дослідження включають комплексний аналіз та узагальнення раніше виконаних робіт, а також перевірку результатів на наявність викидів і квазивикидів за допомогою методу Граббса, метод експериментальних досліджень згідно з розробленою програмою та методикою експериментальних досліджень, яка описана у роботі [9]. У роботі використано такі вимірювальні комплекси інформаційно-вимірювальна система «Термоконт», лазерний випромінювач Н4А3КОМ, фоторезистор GL 5516 5-10, прилад приймальний контрольний пожежний «Спектра – 6М».

5. Розробка програми та методики експериментальних досліджень

З метою перевірки отриманих теоретичних результатів [8], які приведені у таблиці 1, щодо впливу СПЗ на розрахункове значення індивідуального пожежного ризику проведено експериментальні дослідження відповідно до розробленої програми та методики експериментальних досліджень [9]. Суть методу експериментального дослідження полягала у відтворенні розрахункових сценаріїв,

які розглядалися під час експериментальних досліджень, а саме, коли: досліджуване приміщення не оснащувалося СПЗ, приміщення, оснащувалося автоматичною системою пожежної сигналізації, приміщення, оснащувалося системою протидимного захисту, приміщення, оснащувалося автоматичною системою пожежогасіння. Для кожного сценарію проведено три окремі експерименти.

В якості досліджуваного приміщення використано приміщення об'ємом 43 м³, обладнане дверними прорізами та отворами у стінах, які застосовувалися як система природного протидимного захисту. Як пожежне навантаження використано твердий горючий матеріал (вогнище пожежі класу А), а саме дерев'яні бруски перерізом 50 мм × 50 мм та довжиною 250 мм, що укладені у п'ять рядів. Для імітації пожежі матеріал підпалювався у контрольованих умовах із фіксацією часу початку займання, як початку експерименту. Під час експериментального дослідження фіксувався час досягнення граничного значення для життя людини за температурою (70 °С) та втрата видимості (20 м або 0,1 дБ) згідно із ДСТУ 8828.

Для вимірювання параметрів небезпечних чинників пожежі використовувалися такі засоби вимірювальної техніки:

- термопари, що встановлювалися на висоті 1,7 м від підлоги вздовж стін приміщення на відстані 100 мм від поверхні стін;
- лазерний випромінювач і приймач лазерного випромінювання для визначення рівня задимлення (втрати видимості).

Схематичне зображення улаштування експериментального обладнання у дослідному приміщенні наведено на рис. 1. На рис. 2 приведено фото експериментальних досліджень.

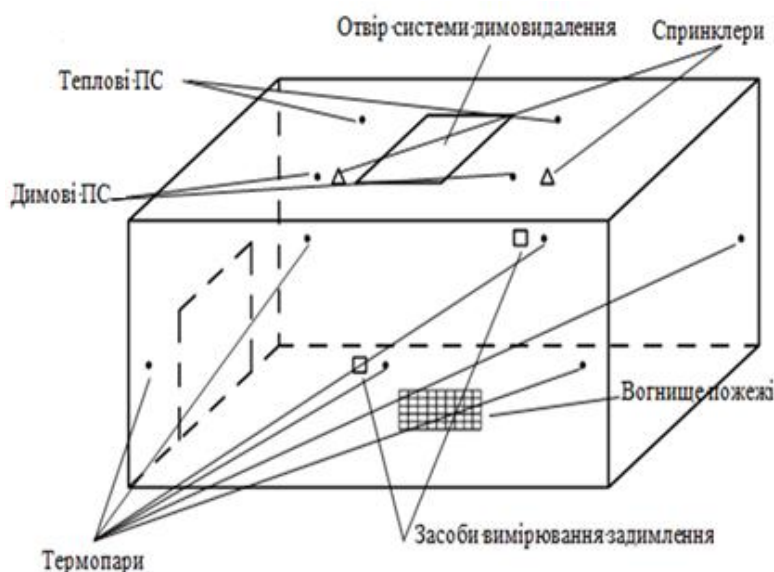


Рис. 2. Схематичне улаштування експериментального обладнання

Табл. 1. Значення коефіцієнтів ймовірності ефективного спрацювання СПЗ, що отримані за експериментальними дослідженнями [8]

Вид СПЗ	Значення коефіцієнтів ймовірності ефективного спрацювання СПЗ
Автоматична система 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

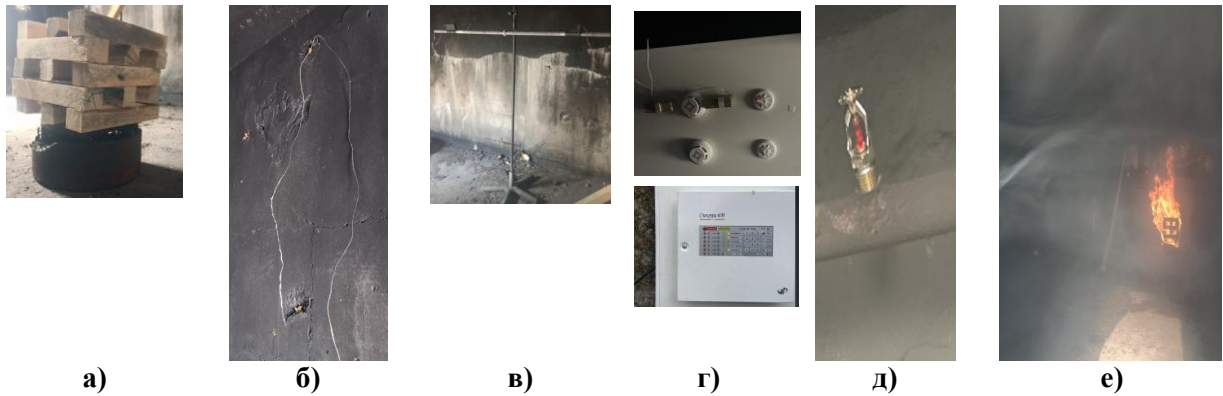


Рис. 2. Фото експериментальних досліджень: а – макета вогнища пожежі, б – улаштування термопар, в – улаштування лазерного вимірювача та приймача, г – улаштування автоматичної пожежної сигналізації, д – улаштування спринклера системи автоматичного пожежогасіння, е – моменту експериментального дослідження

Зазначена програма та методика експериментальних досліджень точно описує умови, які закладені під час теоретичних досліджень [8] та повинна бути реалізованою в такі ж послідовності щодо розрахункових сценаріїв теоретичного дослідження, щоб отримані результати коректно використати для проведення валідації теоретичних досліджень.

6. Дослідження впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик

Результати експериментальних досліджень представлені у вигляді залежностей зміни температури та рівня задимленості від часу для кожного зі сценаріїв експериментального дослідження. У процесі аналізу визначалися часові інтервали досягнення критичних для життя людини параметрів температури та видимості, а також час спрацювання СПЗ. Результати експериментальних досліджень представлені на рис. 3 та рис. 4.

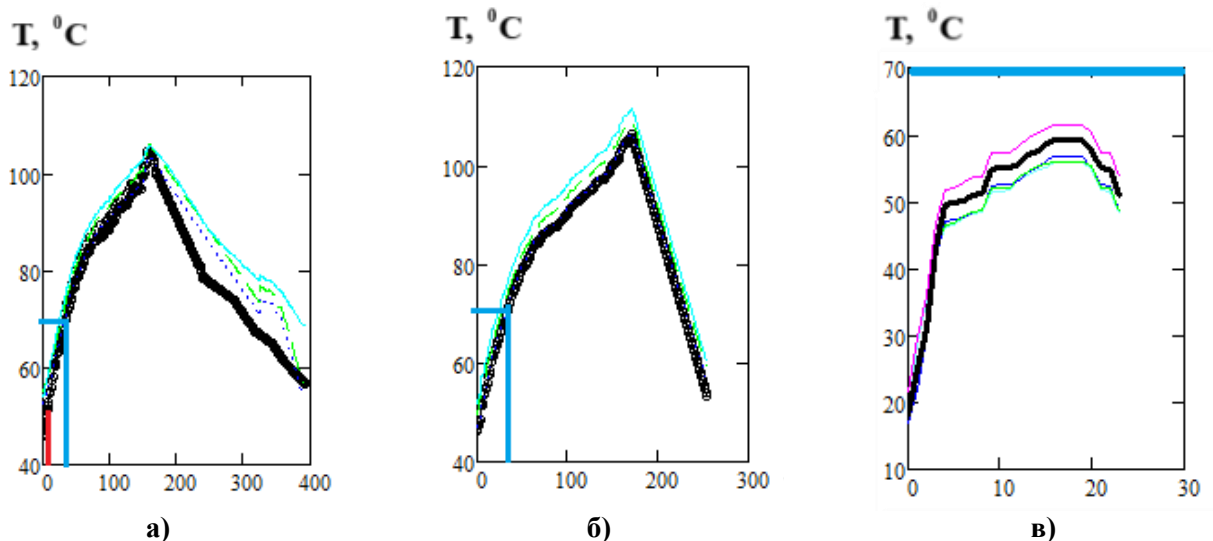


Рис. 3 Результати експериментальних досліджень за зміною температури для сценаріїв: а – приміщення не оснащене СПЗ, б – приміщення оснащене системою протидимного захисту, в – приміщення оснащене системою пожежогасіння

Отримані експериментальні дані перевірялися на наявність викидів та квазивикидів із використанням критерію Граббса, після чого проводилося усереднення результатів для подальшого аналізу.

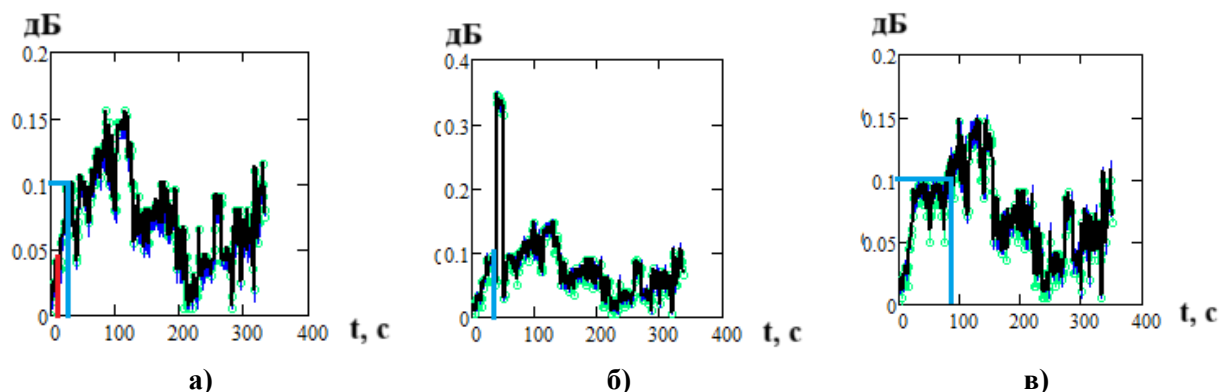


Рис. 4 – Результати експериментальних досліджень за втратою видимості: а – сценарій, за яким приміщення не оснащено СПЗ, б – сценарій, за яким приміщення оснащено системою протидимного захисту, в – сценарій, за яким приміщення оснащено системою автоматичного пожежогасіння

Коефіцієнт ймовірності ефективного спрацювання відповідної СПЗ визначався, як співвідношення отриманих результатів у експериментального дослідження для сценарію, за ким приміщення не оснащувалося СПЗ до відповідного сценарію, за яким приміщення оснащувалося відповідною СПЗ.

Аналізуючи усереднені дані експериментальних досліджень встановлено, що:

- у разі відсутності СПЗ критична для життя людини температура в приміщенні досягалася на 36-й секунді, а втрата видимості – на 28-й секунді експерименту;

- автоматична система пожежної сигналізації спрацювала на 15-й секунді від початку експерименту, що відповідає коефіцієнту ймовірності її ефективного спрацювання 0,58 (за температурою) та 0,52 (за втратою видимості). Порівнюючи ці дані із теоретичними даними, відхилення становить близько 3 % та 14 % відповідно;

- система протидимного захисту забезпечила досягнення критичної температури лише на 53-й секунді, а втрату видимості – на 56-й секунді експерименту, що відповідає коефіцієнтам ймовірності її ефективного спрацювання 0,32 та 0,4, що у порівнянні із теоретичними розрахунками показало відхилення близько 20 %;

- автоматична система пожежогасіння спрацювала на 7-й секунді експериментального дослідження, при цьому критична температура не досягалася протягом усього часу експерименту, а втрата видимості спостерігалася лише на 87-й секунді, що відповідає коефіцієнту ймовірності її ефективного спрацювання 0,89, що у порівнянні із теоретичними даними становить близько 7 %.

Отримані результати свідчать про високу достовірність теоретичних розрахунків [8] і дозволяють вважати, що експериментально визначені коефіцієнти ймовірності ефективного спрацювання СПЗ можуть бути застосовані для удосконалення методики розрахунку індивідуального пожежного ризику, що визначений ДСТУ 8828.

Встановлено, що комплексне функціонування систем пожежної сигналізації, протидимного захисту та пожежогасіння забезпечує найбільш ефективне зниження небезпечних чинників пожежі та суттєво подовжує час досягнення критичних значень температури і задимлення. Це створює додаткові умови для безпечної евакуації людей і підвищує рівень пожежної безпеки об'єкта в цілому.

7. Обговорення результатів дослідження впливу СПЗ на індивідуальний пожежний ризик

Аналіз експериментальних досліджень свідчить, що ефективність функціонування систем протипожежного захисту суттєво впливає на динаміку розвитку небезпечних чинників пожежі, а отже – на рівень індивідуального пожежного ризику. Порівняння теоретичних та експериментальних результатів показало, що розбіжності між ними не перевищують 20 %, що підтверджує адекватність застосованих теоретичних моделей та дає змогу використовувати комплексні результати для вдосконалення методики оцінювання індивідуального пожежного ризику. Таким чином, мета роботи щодо встановлення кількісних закономірностей впливу систем протипожежного захисту досягнута шляхом поєднання теоретичного моделювання та експериментальної перевірки.

Отримані дані свідчать про різний рівень впливу окремих систем на параметри небезпечних чинників пожежі. Автоматична система пожежної сигналізації демонструє стабільну роботу на початковій стадії пожежі, своєчасно фіксуючи ознаки займання, однак її вплив на зміну параметрів пожежі опосередкований і проявляється через активацію інших систем. Система протидимного захисту суттєво подовжує час досягнення критичних значень температури та задимленості, що підвищує безпеку евакуації, але її ефективність значною мірою залежить від правильності проектування та конфігурації. Автоматична система пожежогасіння виявилася найбільш результативною: раннє спрацювання запобігає досягненню критичних температур і значно зменшує втрату видимості. Комплексне застосування кількох систем забезпечує синергетичний ефект, коли сумарна ефективність перевищує ефективність кожної системи окремо.

Серед позитивних аспектів роботи варто відзначити доказовість коректності теоретичних моделей, можливість інтеграції отриманих коефіцієнтів ефективності у методики оцінювання індивідуального пожежного ризику та формалізацію впливу СПЗ на параметри пожежі. Це дозволяє підвищити достовірність оцінки рівня безпеки для людей і науково обґрунтувати необхідність оснащення об'єктів системами протипожежного захисту.

Водночас, робота має певні обмеження. Результати залежать від конкретних технічних параметрів систем та умов експлуатації об'єктів, а також не враховують повною мірою поведінку людей під час пожежі та можливу деградацію обладнання у часі. Ці фактори потребують подальшого дослідження та уточнення отриманих закономірностей.

Загалом, проведене дослідження дозволяє обґрунтовано коригувати існуючі методи оцінювання індивідуального пожежного ризику, визначати оптимальний баланс між рівнем пожежної безпеки та економічними витратами на проектування і встановлення систем протипожежного захисту, а також закладає наукову основу для подальшого вдосконалення будівельних норм і правил.

8. Висновки

1. Розроблено програму та методику експериментальних досліджень, що дозволяє кількісно оцінити коефіцієнти ймовірності ефективного спрацювання СПЗ. Порівняння теоретичних та експериментальних результатів показало розбіжність не більше ніж 20 %, що підтверджує коректність застосованих моделей та дозволяє використовувати комплексні результати для удосконалення методики оцінювання індивідуального пожежного ризику.

2. Встановлено чисельні значення коефіцієнтів ймовірності ефективного функціонування СПЗ становлять: для автоматичної системи пожежної сигналізації та оповіщення – 0,61; автоматичної системи пожежогасіння – 0,87; системи протидимного захисту та протипожежного водопроводу – 0,5. Дані свідчать про різний внесок кожної системи у зниження небезпечних чинників пожежі та підтверджують доцільність комплексного застосування СПЗ для досягнення синергетичного ефекту. Обмеження дослідження пов'язані з впливом геометрії приміщень, конфігурації повітряних потоків та технічних параметрів обладнання, що потребує подальших досліджень у визначеному напрямку.

Література

1. Koval R., Yemelienenko S., Kuzyk D. Assessing the risk of material damage of building construction of high-rise rooms due to fires and emergencies. *Construction Technologies and Architecture*. 2023. № 9. P. 49–57.
2. Wang Y., Zheng R., Li M. Risk assessment of fire safety in large-scale commercial and high-rise buildings based on intuitionistic fuzzy and social graph. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 89. Art. 109165. doi: 10.1016/j.jobe.2024.109165
3. ISO 16733-1:2024. Fire safety engineering – Selection of design fire scenarios and design fires. Geneva : International Organization for Standardization. 2024.
4. NFPA 550:2022. Guide to the Fire Safety Concepts Tree. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 2022.
5. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / M. J. Hurley et al. Cham : Springer, 2024. 3488 p.
6. Park J., Kwark J. Experimental Study on Fire Sources for Full-Scale Fire Testing of Simple Sprinkler Systems Installed in Multiplexes. *Fire*. 2021. Vol. 4. № 1. Art. 8. doi: 10.3390/fire4010008
7. Scaled experiment and numerical study on the effect of a novel makeup air system on smoke control in atrium fires. W. Lei et al. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 95. Art. 110237. doi: 10.1016/j.jobe.2024.110237
8. Theoretical Approaches to Justify the Coefficients of Influence of Fire Protection Systems on Individual Fire Risk / V. Nizhnyk, O. Savchenko, Y. Ballo, V. Nekora. *Eco-comfort and Current Issues in Civil Engineering : materials from the International Scientific Conference*. 2022. P. 299–306. doi: 10.1007/978-3-031-14141-6_30
9. Савченко О. В., Ніжник В. В., Савченко Т. О. Програма та методика експериментальних досліджень впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик. *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35(74). № 4. С. 348–353. doi: 10.32782/2663-5941/2024.4/54

O. Savchenko, Graduate Student

V. Nizhnyk, DSc, Professor, Head of the Research Center

R. Koval, PhD, Head of the Research Center

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF FIRE PROTECTION SYSTEMS ON INDIVIDUAL FIRE RISK

The paper presents the results of experimental studies on the impact of fire protection systems on individual fire risk in buildings. It is shown that the current state of the issue is determined by the lack of scientifically grounded patterns that would quantitatively describe the influence of effective operation of fire protection systems on the parameters of hazardous fire factors and, accordingly, on the calculated values of individual fire risk. A contradiction has been identified between practical approaches

to ensuring fire safety and risk assessment methods that do not take into account the effectiveness of technical systems. A program and methodology for an experimental study have been proposed to verify theoretical provisions regarding the influence of fire protection systems on the dynamics of fire development as a derivative of individual fire risk. Criteria and controlled conditions have been defined, namely: temperature, smoke level, response time of the fire protection system, and the time to reach critical values of these criteria for human life. The obtained results made it possible to determine the probability coefficients of effective operation of fire protection systems and to validate the theoretical research. It has been established that the integrated functioning of fire protection systems provides a synergistic effect, reducing the rate of development of hazardous fire factors, extending the time to reach critical values such as temperature and smoke level, and thereby increasing the level of human safety during evacuation, which ultimately affects the value of individual fire risk. The research results were used to improve the methodology for assessing individual fire risk and can be applied in the development of regulatory requirements for equipping facilities with fire protection systems.

Keywords: fire protection, risk, activation efficiency, alarm, fire extinguishing, smoke protection

References

1. Koval, R., Yemelienenko, S., Kuzyk, D. (2023). Assessing the risk of material damage of building construction of high-rise rooms due to fires and emergencies. *Construction Technologies and Architecture*, 9, 49–57.
2. Wang, Y., Zheng, R., Li, M. (2024). Risk assessment of fire safety in large-scale commercial and high-rise buildings based on intuitionistic fuzzy and social graph. *Journal of Building Engineering*, 89, 109165. doi: 10.1016/j.job.2024.109165
3. International Organization for Standardization. (2024). Fire safety engineering – Selection of design fire scenarios and design fires (ISO Standard № 16733-1:2024).
4. NFPA 550: Guide to the Fire Safety Concepts tree.
5. SFPE handbook of fire protection engineering. Springer.
6. Park, J., Kwark, J. (2021). Experimental study on fire sources for full-scale fire testing of simple sprinkler systems installed in multiplexes. *Fire*, 4(1), 8. doi: 10.3390/fire4010008
7. Lei, W., Zhang, Z., Zheng, Z., Tai, C., Zhang, L., Zhao, S. (2024). Scaled experiment and numerical study on the effect of a novel makeup air system on smoke control in atrium fires. *Journal of Building Engineering*, 95, 110237. doi: 10.1016/j.job.2024.110237
8. Nizhnyk, V., Savchenko, O., Ballo, Y., Nekora, V. (2022). Theoretical approaches to justify the coefficients of influence of fire protection systems on individual fire risk. In *Lecture Notes in Civil Engineering*, 299–306. doi: 10.1007/978-3-031-14141-6_30
9. Savchenko, O. V., Nizhnyk, V. V., Savchenko, T. O. (2024). Program and methodology of experimental research on the influence of fire protection systems on individual fire risk. *Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 35(74), 4, 348–353. doi: 10.32782/2663-5941/2024.4/54

Надійшла до редколегії: 10.09.2025

Прийнята до друку: 13.10.2025